

N° d'ordre : D. U : 1666
E D S P I C : 348

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse

Présentée par

JONATHAN BOM

ingénieur CUST

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Titre de la thèse :

**Etude et mise en œuvre d'un convoi de véhicules urbains
avec accrochage immatériel**

Soutenue publiquement le 20 Juillet 2006 devant le jury :

M.	:	Roland	CHAPUIS	Président
Mme	:	Nadine	LE FORT-PIAT	Rapporteur et examinateur
M.	:	Bruno	JOUVENCEL	Rapporteur et examinateur
M.	:	Damien	SALLE	Examineur
M.	:	Benoit	THUILOT	Examineur
M.	:	François	MARMOITON	Examineur
M.	:	Philippe	MARTINET	Directeur de thèse

Résumé

Pour résoudre les problèmes liés au trafic important dans les métropoles, de nouvelles alternatives, appelées “Urban Transportation Systems”, voient le jour. Celles-ci sont basées sur des véhicules électriques en libre accès. Une fonctionnalité nécessaire de ces systèmes est leur capacité à se déplacer en convoi. Dans ce manuscrit de thèse, le travail présenté traite de la commande d’un convoi de véhicules urbains.

Dans ce mémoire, une modélisation cinématique de type tricycle est adoptée pour représenter le robot mobile. La transformation en système chaîné de ce modèle permet de découpler les commandes latérale et longitudinale.

La commande latérale basée sur des techniques de linéarisation exacte, permet d’assurer un suivi de trajectoire avec une très haute précision (puisque les non-linéarités du modèle ne sont pas approximées mais au contraire, explicitement prises en compte), indépendamment de la vitesse du robot.

La loi de commande longitudinale, basée également sur des techniques de linéarisation exacte, suit une stratégie de commande globale : l’état du convoi est pris en compte, et non pas seulement l’état du véhicule situé immédiatement devant. En fait, le comportement du convoi est étudié à travers les états du leader et du véhicule précédent. L’écart inter-véhicules à réguler est choisi égal à la distance curviligne parcourue le long d’un chemin de référence, ce qui permet d’assurer un comportement cohérent du convoi, y compris lors du suivi de trajectoires à forte courbure.

Afin de prodiguer un confort suffisant aux passagers et d’assurer un fonctionnement en toute sécurité, des fonctions de supervision sont greffées aux lois de commande nominales, décrites ci-dessus. Ce module de supervision, nommé “Monitoring”, gère également l’insertion ou la désinsertion de véhicules au sein du convoi.

Des expérimentations, portées sur des voitures urbaines réelles, nommées Cycabs, permettent de valider les performances de la commande. Pour cela, les véhicules sont équipés d’une communication sans fil de type WiFi. Deux modalités capteurs ont été envisagées pour localiser les véhicules : principalement un capteur RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System), mais également un système de vision monoculaire.

Mots-clés : *robot mobile, commande non-linéaire, convoi, AGV (Automatic Guided Vehicles).*

Abstract

To solve the problems related to the important traffic in the cities, new alternatives, called “Urban Systems Transportation”, have been proposed. Those are based on electric vehicles in free access. A necessary functionality of these systems is their capacity to work in platoon. In this manuscript of thesis, the work presented deals with the control of a urban vehicles platoon.

In this thesis, a tricycle kinematic modelling is used in order to represent the mobile robot. The transformation into chained system makes it possible to dissociate the lateral and longitudinal commands.

The lateral control law, based on exact linearization techniques, enables path following with high-precision (since the model non-linearities are not approximated, but taken explicitly into account), independently of the robot speed.

The longitudinal control law, based also on exact linearization techniques, relies on a global control strategy : the platoon state is taken into account, and not only the state of the preceding vehicle. More precisely, the behaviour of the convoy is studied through the states of both the leader and the preceding vehicle. The gap between cars is desired to be equal to a constant curvilinear distance travelled along the reference path. That allows to ensure a coherent behaviour in high-curved paths

In order to provide a sufficient comfort for the passengers and to ensure safety, supervision functions are added to the nominal control laws. This supervision unit, called “Monitoring”, manages also the entering and the leaving of vehicles within the platoon.

Experiments, relying on actual vehicles, named Cycabs, make it possible to validate the performances of the control laws. For that, the vehicles are equipped with a wireless communication (WiFi). Two kinds of sensors are envisaged : mainly a sensor RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System), and also a monocular vision system.

Keywords : *mobile robot, non-linear control laws, platooning, AGV (Automatic Guided Vehicles).*

Table des matières

Introduction	15
1 Etat de l'art	25
1.1 Véhicules communément employés pour des applications de service de type navigation en convoi	25
1.1.1 Les véhicules urbains	26
1.1.2 D'autres véhicules susceptibles d'intégrer des applications de service analogues	29
1.2 Fonctionnalités élémentaires pour la navigation en convoi	34
1.2.1 Spécification de la tâche de navigation en convoi	34
1.2.2 Localisation d'un convoi	34
1.2.3 Les systèmes de perception	37
1.2.4 Contrôle du convoi	42
1.3 Commande latérale d'un véhicule du convoi	45
1.3.1 Commandes basées sur un modèle linéarisé	45
1.3.2 Rappels sur les techniques de commande non-linéaires	57
1.3.3 Commandes basées sur un modèle non-linéaire	64
1.3.4 Bilan	69
1.4 Commande longitudinale de véhicules formant un convoi	70
1.4.1 Véhicules non communicants	70
1.4.2 Véhicules communicants : communication restreinte de proche en proche	72
1.4.3 Communication ouverte à l'ensemble du convoi	85
1.4.4 Bilan	91
1.5 Stratégie adoptée pour la réalisation d'un convoi autonome	93
1.5.1 Objectifs fixés	93
1.5.2 Modélisation du véhicule	93
1.5.3 Stratégie de commande employée	95
1.5.4 Mise en œuvre envisagée	97
2 Synthèse des lois de commande du convoi en situation standard	99
2.1 Modélisation cinématique tricycle des véhicules formant le convoi	101
2.1.1 Hypothèses de travail	101

2.1.2	Notations	102
2.1.3	Mise en équations et modèle d'état	103
2.2	La commande latérale	104
2.2.1	Les objectifs de commande	104
2.2.2	Difficultés liées à la commande d'un modèle tricycle non linéaire	105
2.2.3	Chaînage du système	105
2.2.4	Synthèse de la commande latérale	107
2.2.5	Découplage des commandes latérales et longitudinales	109
2.2.6	Simulations	110
2.3	La commande longitudinale du convoi	121
2.3.1	Objectifs de la commande	121
2.3.2	La commande de proche en proche	123
2.3.3	Commande référencée sur le leader	125
2.3.4	Simulations des deux approches de commande longitudinale	127
2.3.5	Une stratégie de commande globale	131
2.4	Gestion des saturations en vitesse et en accélération	139
2.4.1	Objectifs	139
2.4.2	Gains adaptatifs pour saturer la vitesse	140
2.4.3	Saturation en accélération	143
2.4.4	Validation des saturations en vitesse et en accélération par simulation	145
2.5	Bilan	152
3	Commande du convoi incluant les situations exceptionnelles via un Monitoring	153
3.1	Supervision de la commande du convoi	154
3.1.1	Confort et Sécurité du convoi	154
3.1.2	Gestion de la singularité de la commande	158
3.2	Insertion et désinsertion d'un membre dans le convoi	162
3.2.1	Insertion d'un véhicule	162
3.2.2	Désinsertion d'un véhicule	166
3.2.3	Synthèse de l'Insertion/Désinsertion de véhicules dans le convoi	168
3.3	Validation par simulation	169
3.3.1	Description des scénarii	169
3.3.2	Scénario 1 : en conditions standards	171
3.3.3	Scénario 2 : écart initial important	172
3.3.4	Scénario 3 : accrochage progressif en queue de peloton	172
3.3.5	Scénario 4 : arrêt brusque du leader	173
3.3.6	Scénario 5 : état singulier de la commande	177
3.3.7	Scénario 6 : désinsertion	179
3.3.8	Scénario 7 : insertion	181
3.3.9	Bilan des simulations	182
3.4	Bilan du Monitoring	183
3.4.1	Les différents composants du monitoring	183

3.4.2	Vers d'autres fonctionnalités	185
4	Implantation et validation expérimentale des lois de commande	187
4.1	Mise en œuvre sur véhicules urbains	187
4.1.1	Présentation du véhicule expérimental : le CyCab	188
4.1.2	Capteurs utilisés pour le retour d'état	189
4.1.3	Communication sans fil	195
4.1.4	Architecture du convoi	195
4.2	Expérimentations	203
4.2.1	Performances latérales	203
4.2.2	Performances longitudinales	215
4.3	Bilan	237
	Conclusion	239

Table des figures

1	Véhicule expérimental : Cycab	19
1.1	Une station de véhicules du programme CARLINK	26
1.2	Schéma illustrant le projet Lisélec	27
1.3	Exemple d'une flotte de véhicules "Serpentine"	28
1.4	Exemple d'un convoi de deux véhicules dans le cadre du projet Praxitèle	29
1.5	Convoi de 8 voitures réalisé dans le cadre du projet PATH	31
1.6	Prototype d'une navette formant le réseau MAGLEV	32
1.7	Navette du SkyWeb Express Personal Rapid Transit	33
1.8	Expression du véhicule dans un repère basé sur le chemin de référence	35
1.9	Schéma d'un convoi équipé de systèmes de perception relatifs	36
1.10	Balise magnétique utilisée dans le programme PATH	38
1.11	Dispositif expérimental du projet DAVINCI	40
1.12	Maquette utilisée dans le projet DAVINCI	40
1.13	Schéma de la commande	43
1.14	Le véhicule expérimental ARGO	47
1.15	Détermination de l'erreur latérale e_{lat}	47
1.16	Commande latérale implantée sur le véhicule ARGO	47
1.17	Introduction d'une orientation de référence	50
1.18	Détermination de l'orientation de référence	51
1.19	Schéma de commande latérale	53
1.20	Implantation et mesures par ultra-sons	73
1.21	Schéma de commande par platitude	75
1.22	Commande en vitesse	82
1.23	Conventionnel MRAC avec ajustement du modèle de référence	86
1.24	MRAC modifié	86
1.25	Notations utilisées dans l'article [137]	89
1.26	Accumulation des erreurs latérales avec une commande de proche-en-proche	96
1.27	Véhicule expérimental : Cycab	98
2.1	Démarche classique menant à la voiture autonome [116]	100
2.2	Démarche adoptée pour la mise en œuvre de la commande du convoi autonome	100

2.3	Modélisation d'un véhicule	102
2.4	Modélisation du convoi	103
2.5	Représentation de la distance d'établissement d_m	109
2.6	Chemin de référence utilisé pour l'ensemble des simulations	111
2.7	Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 0 . . .	111
2.8	Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 0 . .	112
2.9	Trajectoires suivies par le véhicule - Simulation 1	113
2.10	Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 1 . . .	114
2.11	Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 1 . .	115
2.12	Commande latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 1 .	116
2.13	Trajectoires suivies par le véhicule - Simulation 2	117
2.14	Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 2 . . .	118
2.15	Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 2 . .	119
2.16	Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 3 . . .	120
2.17	Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 3 . .	121
2.18	Comparaison des distances directes et curvilignes	123
2.19	Commande de proche-en-proche	124
2.20	Commande référencée leader	125
2.21	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 4	128
2.22	Commandes en vitesse - Simulation 4	128
2.23	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 5	129
2.24	Commandes en vitesse appliquées - Simulation 5	129
2.25	Contrôle longitudinal global	132
2.26	Communication pour une commande globale	132
2.27	Fonction σ_{i+1}	133
2.28	Valeurs singulières prises par e_{i+1}^i en fonction de e_i^1 pour a fixé positif .	135
2.29	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 6	137
2.30	Commandes en vitesse appliquées - Simulation 6	137
2.31	Paramètre σ_{i+1} - Simulation 6	138
2.32	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 7	138
2.33	Vitesses mesurées - Simulation 7	139
2.34	Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 8	145
2.35	Gain adaptatif - Simulation 8	146
2.36	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 8	146
2.37	Chemin de référence et configurations initiales du convoi - Simulation 9 .	147
2.38	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 9	148
2.39	Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 9	148
2.40	Evolution du gain adaptatif - Simulation 9	149
2.41	Evolution de σ_{i+1} - Simulation 9	149
2.42	Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 10	150
2.43	Evolution de σ_{i+1} - Simulation 10	150
2.44	Ecart curviligne avec le leader - Simulation 10	151
2.45	Ecart curviligne inter-véhicules - Simulation 10	151

3.1	Schéma de supervision gérant le Confort et la Sécurité du convoi	157
3.2	Evolution de c_{i+1}	158
3.3	Evolution de e_2^1 et de e_3^2	159
3.4	Zone d'influence de $(1 + A(z_{i+1})e_i^1)$ en fonction des erreurs longitudinales	160
3.5	Evolution de c_{i+1} après correction des défauts introduits par les saturations	161
3.6	Evolution de e_{i+1}^i après correction des défauts introduits par les saturations	162
3.7	Schéma représentant à quel moment déclencher les procédures d'insertion et de désinsertion	163
3.8	Le véhicule entrant est trop avancé pour insérer le convoi	164
3.9	Le véhicule entrant est en train d'insérer le convoi	164
3.10	Le convoi se reforme	165
3.11	Phases initiales de la désinsertion	167
3.12	Schéma de supervision gérant l'Insertion/Désinsertion d'un véhicule au sein du convoi	169
3.13	Distance curviligne avec le leader - Scénario 1	172
3.14	Distance curviligne avec le leader - Scénario 2	172
3.15	Distance curviligne avec le leader - Scénario 3	173
3.16	Distance curviligne avec le leader - Scénario 4a	174
3.17	Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4a	174
3.18	Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4a	174
3.19	Distance curviligne avec le leader - Scénario 4b	175
3.20	Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4b	175
3.21	Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4b	175
3.22	Distance curviligne avec le leader - Scénario 4c	176
3.23	Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4c	176
3.24	Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4c	176
3.25	Distance curviligne avec le leader - Scénario 5	178
3.26	Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 5	178
3.27	Vitesse longitudinale générée - Scénario 5	178
3.28	Configuration initiale du convoi - Scénario 6	179
3.29	Ecart curviligne avec le leader - Scénario 6	180
3.30	Vitesse longitudinale - Scénario 6	180
3.31	Configuration initiale du convoi - Scénario 7	181
3.32	Ecart curviligne avec le leader - Scénario 7	181
3.33	Vitesse longitudinale - Scénario 7	182
3.34	Les différentes étapes menant à l'obtention d'une commande en vitesse en conduite en convoi	184
3.35	Nécessité de la jonction de 2 convois en 1	185
3.36	Scission du convoi à l'approche d'une bifurcation	185
3.37	Illustration des risques que peuvent provoquer un chemin se recoupant .	186
4.1	Le véhicule expérimental Cycab	188
4.2	Fonctionnement du DGPS	190
4.3	Représentation d'un signal GPS	190

4.4	Le Sagitta : un capteur RTK-GPS	191
4.5	Implantation du capteur RTK-GPS sur Cycab	192
4.6	Extrait d'images issues d'une séquence vidéo	193
4.7	Exemple d'appariement de points entre une image du flux vidéo et l'image clé la plus proche	194
4.8	Architecture de commande de l'autoroute automatisée du programme PATH	196
4.9	Une architecture alternative basée sur une approche centralisée	200
4.10	Architecture adoptée pour le convoi urbain	200
4.11	Architecture utilisée pour les applications de conduite en convoi	203
4.12	Erreurs latérales en ligne droite	204
4.13	Chemin de référence	206
4.14	Erreurs latérales	206
4.15	Erreurs angulaires	207
4.16	Commandes latérales générées	207
4.17	Trajectoires effectuées et chemin de référence	208
4.18	Erreurs latérales	209
4.19	Erreurs angulaires	210
4.20	Commandes latérales sur l'angle des roues	210
4.21	Trajectoires des essais avec différents gains	212
4.22	Erreurs latérales	212
4.23	Trajectoires suivies par le véhicule	213
4.24	Ecarts latéraux avec le chemin référence	214
4.25	Exemple d'une acquisition vidéo surexposée	215
4.26	Ecart longitudinal	216
4.27	Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS	216
4.28	Ecart longitudinal	218
4.29	Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS	218
4.30	Gain adaptatif	218
4.31	Ecart longitudinal	219
4.32	Gain adaptatif	219
4.33	Ecart longitudinal	220
4.34	Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS	220
4.35	Ecart longitudinal	221
4.36	Chemin de référence	222
4.37	Configuration initiale - Scénario A	223
4.38	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario A	223
4.39	Commandes longitudinales appliquées aux véhicules - Scénario A	224
4.40	Evolution de σ - Scénario A	224
4.41	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario B	225
4.42	Commandes longitudinales appliquées - Scénario B	225
4.43	Evolution de σ - Scénario B	226
4.44	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario C	227
4.45	Commandes longitudinales appliquées - Scénario C	227

4.46	Evolution de σ - Scénario C	228
4.47	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario D	229
4.48	Commandes longitudinales appliquées - Scénario D	229
4.49	Evolution de σ - Scénario D	230
4.50	Configuration initiale - Scénario E	231
4.51	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario E	231
4.52	Evolution de σ - Scénario E	232
4.53	Commandes longitudinales appliquées - Scénario E	232
4.54	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario F	233
4.55	Evolution de σ - Scénario F	234
4.56	Vitesses mesurées par GPS - Scénario F	234
4.57	Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario G	235
4.58	Evolution de σ - Scénario G	236
4.59	Commandes longitudinales appliquées - Scénario G	236
4.60	Architecture centralisée susceptible d'être adoptée	237

Introduction

Le siècle dernier a vu s'imposer la voiture comme un élément incontournable dans la vie de tous les jours, comme en témoigne la constante augmentation du nombre de véhicules en circulation : actuellement, plus de 30 millions de voitures sont en circulation en France et déjà 4 familles sur 5 disposent d'au moins un véhicule privé de ce type. De plus, les infrastructures dédiées à la circulation de véhicules ne cessant de croître, attestent de la prépondérance de la voiture dans la vie quotidienne. Grâce à ces caractéristiques : sa vitesse de fonctionnement suffisamment élevée, sa dimension respectable et son autonomie adaptée au long trajet, la voiture privée suscite, en effet, un réel engouement du grand public, qui voit en elle de nombreux avantages indéniables :

- L'intimité : grâce à son habitacle personnel, la voiture se présente comme un espace privé, proche du foyer.
- La capacité de transport : la présence d'une banquette arrière et d'un coffre offre à l'usager la possibilité de transporter à la fois biens et individus.
- La liberté : l'usager est libre de ses mouvements, il n'a ni horaire, ni itinéraire à respecter.

Malheureusement, si la voiture dispose de son vaste éventail d'avantages hors agglomération, il n'en est plus de même en milieu urbain. En effet, plusieurs caractéristiques propres au contexte urbain ne sont pas propices à l'usage de la voiture :

- Les politiques environnementales, spécifiques au milieu urbain, visent à renforcer la présence de la nature dans la ville en supprimant les parkings pour en faire des espaces verts.
- Les zones et sens uniques de circulation imposés ne sont pas toujours les mieux adaptés. Il n'est pas rare d'effectuer de longs détours pour se rendre d'un point à un autre, pourtant très proches à vol d'oiseau.
- La présence trop importante de la voiture en centre ville.

Cet environnement particulier de travail suscite de nouveaux problèmes, qui nuisent ainsi à l'utilisation de la voiture. Parmi ces inconvénients, le fonctionnement d'un véhicule privé en agglomération n'offre pas le meilleur rendement d'énergie consommée par passager, provoquant un coût énergétique conséquent. De plus, les parkings deviennent de plus en plus saturés, et la recherche d'une zone pour garer son véhicule demeure un véritable calvaire. De même, la trop grande présence de la voiture provoque une saturation du trafic, qui engendre une perte de temps inéluctable. A ces inconvénients pour l'usager de la voiture, il convient de recenser les désagréments ressentis par les citoyens. Comme le pétrole reste encore essentiellement le carburant le

plus utilisé, des problèmes de pollution atmosphérique, liés à la diffusion massive de monoxyde de carbone, deviennent très préoccupants. Ensuite, les nuisances sonores, issues du fonctionnement mécanique des véhicules à combustion, font également partie des conséquences négatives de l'utilisation des voitures à combustion en ville.

Afin de s'affranchir de ces problèmes environnementaux majeurs, les déplacements non polluants (vélo, ou marche à pied) doivent être privilégiés. Si pour de courtes distances, ils procurent la solution optimale, dès que les distances parcourues deviennent trop longues, le temps mis pour le trajet et la fatigue endurée découragent les citoyens. A ces difficultés, les services publics offrent une solution par l'usage des transports en commun. Ces derniers apportent à l'utilisateur un moyen de transport de proximité adapté à la ville, baissant les coûts de déplacement, diminuant le stress occasionné par la conduite automobile, désengorgeant le trafic et réduisant les pollutions sonore et atmosphérique. Par conséquent, la complémentarité entre les transports en commun traditionnels et la marche à pied (ou le vélo) procurent un moyen de locomotion réduisant considérablement les difficultés liées à la voiture.

Cependant, même si les transports publics offrent d'ores et déjà une solution majeure aux problèmes recensés, l'utilisateur type de la voiture personnelle ne semble pas encore être prêt à se séparer de son moyen de locomotion favori. Actuellement, la voiture offre encore de nombreux avantages, que ne peuvent offrir les transports publics. Par exemple, comme la voiture ne dispose d'aucun horaire de fonctionnement, tout utilisateur de ce type d'engin peut compter sur celui-ci pour effectuer des trajets durant la nuit, notamment lorsque les transports en commun ne circulent pas. Ou encore, pour le transport d'objets encombrants : déménagement/emménagement, départ en vacances, achat de gros volumes, etc., l'usage d'une voiture permet le transport des objets en toute facilité.

Ces fonctionnalités de la voiture personnelle en milieu urbain, que ne peuvent procurer les transports en commun, ont amené les pouvoirs publics à se pencher sur de nouvelles alternatives proposant les atouts de la voiture tout en s'affranchissant des désavantages, liés à l'automobile.

Problématique

Une solution : les véhicules urbains en libre service

Dans les situations inadaptées aux différents moyens de transport actuels, il est donc nécessaire d'offrir une alternative au transport, tirant le maximum d'avantages et en réduisant les désagréments des moyens de transports traditionnels.

Ce nouveau type de transport se situerait donc, au croisement des transports en commun public (bus, tramways, métros), des véhicules personnels et des déplacements pédestres, sans venir toutefois remplacer ces différentes entités, mais plutôt en apportant une complémentarité aux services actuels.

L'objectif principal de ce dernier peut donc se résumer à concevoir un moyen de transport pouvant contenir biens et objets encombrants, disponible 24h/24h, non polluant, s'intégrant pleinement dans le réseau de transport urbain actuel, modulable en

fonction du nombre de passagers et offrant la même flexibilité que la voiture.

Une solution envisagée consiste à mettre à disposition des usagers des transports en commun (ou des utilisateurs de voiture personnelle) des véhicules urbains électriques en libre accès en des stations situées près des arrêts des transports publics (ou dans un parking à l'entrée de la ville, à disposition des utilisateurs de voitures personnelles pour se rendre en ville). Ces véhicules électriques (donc non polluants), plus petits que les voitures traditionnelles, seraient donc une ressource utilisée par un individu pour se rendre d'une station à une autre station, le temps du trajet. Ensuite, arrivé à la station de destination, le passager libère son véhicule, qui pourrait alors être utilisé par un autre éventuel utilisateur. Grâce à ce système, l'usager dispose d'un véhicule, est alors en mesure de circuler en toute autonomie et ne perd pas de temps pour se garer (le véhicule étant remis immédiatement à disposition).

Dans plusieurs villes pionnières à travers le monde, de tels systèmes ont été mis en place afin d'évaluer son bienfait. En France, l'opération Lisélec lancée à La Rochelle en septembre 1999, comprend 50 véhicules électriques, répartis par des agents d'exploitation sur 7 stations situées en des points stratégiques de l'agglomération rochelaise (centre ville, gare, campus,...), accessibles 24h/24, 7j/7, pour les personnes qui ont souscrit un abonnement. La croissance constante des abonnements sur le site de La Rochelle atteste d'un réel engouement du public pour le système, notamment grâce à la flexibilité renforcée du système.

Ensuite, une fonctionnalité des plus intéressantes et pratiques serait de permettre aux véhicules de circuler de manière totalement autonome sans la moindre intervention humaine. Ainsi, le fonctionnement automatique de ces véhicules urbains autoriserait la conduite totalement automatique des occupants d'un lieu à un autre. Ainsi, tout utilisateur du véhicule n'aurait plus besoin de le conduire, mais se laisserait, conduire, sans intervention et en toute sécurité, en un point de destination spécifié. En plus du transport de passager sans conducteur, cette fonctionnalité permettrait également au véhicule automatisé de se rendre d'un point à un autre sans passager. Dès lors, il serait envisageable d'imaginer le véhicule automatique, libre de passager, se rendant automatiquement à un point de rendez-vous fixé par un usager (pouvant être donc autre qu'une station). Arrivé au point de rendez-vous, l'utilisateur monterait dans le véhicule pour se rendre à destination voulue (manuellement ou automatiquement au gré du passager). Une fois que l'usager a quitté le véhicule à destination, le véhicule libre d'utilisateur rejoindrait une station pour maintenance ou rechargement des batteries, ou bien se rendrait directement en un nouveau point de rendez-vous fixé par un nouvel utilisateur.

Par la suite, afin d'augmenter le flux de circulation, plutôt que d'utiliser plusieurs véhicules fonctionnant indépendamment, il serait envisageable d'optimiser le fonctionnement des véhicules par leur marche en convoi (ce aussi bien pour le transport de passagers que pour le rapatriement des voitures urbaines vers une station). En effet, en imposant un faible écart entre les membres du convoi, les membres du convoi sont ainsi très proches les uns des autres de sorte à fluidifier le trafic. De plus, en assurant une distance

minimale de sécurité entre les véhicules, les risques de collision sont considérablement amoindris. La sécurité se trouve donc renforcée. Ensuite, ce mode de fonctionnement jouit d'une grande modularité. Le nombre de véhicules formant le convoi, est directement lié au nombre de passagers et seules les ressources nécessaires sont réquisitionnées, contrairement aux transports en commun qui ne peuvent pas s'adapter au nombre de passagers effectifs. Enfin, le convoi ne perdrait en rien en flexibilité, plutôt que de se rendre d'un point à un autre, le convoi pourrait toujours être conduit manuellement : les membres du convoi suivraient le véhicule de tête, alors, conduit manuellement.

Ainsi, le fonctionnement automatique d'un convoi de véhicule permettrait donc, en complément des services de transport existants, l'élimination des problèmes de parking, la réduction des problèmes environnementaux et un désengorgement conséquent du trafic urbain.

Le sujet traité dans cette thèse est ainsi en rapport avec la conduite en convoi autonome de véhicules urbains. Elle consiste à la mise en marche et validation d'un tel convoi par expérimentations sur véhicules réels.

Enfin, une telle innovation laisserait entrevoir de multiples applications possibles. Ainsi, l'intérêt de cet investissement dépasse largement les domaines d'application évoqués : trains de véhicules modulaires par exemple pour le tourisme en centre-ville,... En effet, la marche en convoi par arrimage immatériel peut avoir des retombées précieuses dans des milieux divers et variés, tels que l'industrie (gestion d'une flotte de chariots élévateurs), les parcs d'attraction (mise à disposition d'un mode de déplacement flexible), etc.

Programmes de recherche associés

Afin de réaliser un fonctionnement de ces véhicules urbains, plusieurs actions de recherche spécifiques doivent être menées dans des domaines très divers tels que l'informatique, les télécommunications, la perception, l'automatisme, etc.

En ce sens, plusieurs projets fédérateurs sont associés aux recherches effectuées dans le domaine. Grâce à son implication active dans ces différents projets, le LASMEA a ainsi confirmé son savoir-faire dans le domaine des Véhicules Intelligents.

Sur le plan national, le PREDIT 3 (Programme national de REcherche et d'Innovation dans les Transports) est un programme de recherche, d'expérimentation et d'innovation dans les transports terrestres, initié et conduit par les ministères chargés de la recherche, des transports, de l'environnement et de l'industrie, l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et l'ANVAR (Agence Nationale de la Valorisation de la Recherche). Stimulant la coopération entre secteurs public et privé, ce programme vise à favoriser l'émergence de systèmes de transport économiquement et socialement plus efficaces, plus sûrs, plus économes en énergie, et finalement mieux respectueux de l'homme et de l'environnement. Le PREDIT 3 (2002-2006) est encadré par trois objectifs généraux :

- Assurer une mobilité durable des personnes et des biens
- Accroître la sécurité des systèmes de transport

- Réduire les impacts environnementaux et contribuer à la lutte contre l'effet de serre

Ce vaste programme fédérateur s'organise autour de 11 groupes opérationnels parmi lesquels le groupe 9 : intégration des systèmes d'information et de communication. L'objectif de ce groupe opérationnel est l'étude, la proposition et le test des nouveaux systèmes ou services basés sur les technologies de l'information et de la communication dans les transports.

Un des projets nationaux associés à ce groupe opérationnel est le projet MobiVIP (Véhicules Individuels Publics pour la Mobilité en centre ville).

Le projet national MobiVIP s'intéresse aux recherches et expérimentations de briques technologiques visant à la mise en place de services de mobilité en milieu urbain basés sur un système de transport : les Véhicules Individuels Publics et sur un système d'information s'intégrant dans la politique de gestion globale des déplacements en centre ville. Engagé sur une période de trois ans (2003-2006), il réunit cinq laboratoires (le laboratoire I3S (Informatique Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis), L3I (Laboratoire Informatique, Image, Interaction de La Rochelle), Heudiasyc (HEUristique et DIagnostics des SYstèmes Complexes) de l'UTC (Université de Technologie de Compiègne), INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) et LASMEA) et six industriels (Robosoft, Ceolia, BeNomad, Caisse Commune, Transitec et Wysiyg) qui collaborent afin d'expérimenter, démontrer et évaluer l'impact des Nouvelles Techniques d'Information et de Communication sur un nouveau service de mobilité en centre ville. Ce service est constitué de petits véhicules urbains, nommés Cycab (voir Fig. 1), et s'intègre aux transports publics existants. Les recherches portent sur



FIG. 1 – Véhicule expérimental : Cycab

plusieurs thèmes transversaux dont la modélisation, la navigation, la conduite assistée, la conduite autonome et en convoi, les systèmes d'information et de communication.

Le groupe GRAVIR (GRoupe Automatique, Vision et Robotique) du LASMEA est particulièrement impliqué dans le projet MobiVIP par ses nombreuses contributions dans les domaines de la perception et localisation d'un véhicule dans son environnement et dans le guidage autonome de véhicules.

Sur le plan régional, plusieurs projets scientifiques déposés en collaboration avec la Région Auvergne, notamment dans le cadre de l'axe MSPI (Machines et Systèmes Performants et Intelligents) du CPER (Contrat de Plan Etat Région), contribuent à faire de l'Auvergne, et plus particulièrement de Clermont-Ferrand, l'une des références dans le domaine des Véhicules Intelligents.

Ainsi, les soutiens politiques et financiers de la Région Auvergne ont permis de soutenir la fédération de recherches CNRS TIMS (Technologies de l'Information, de la Mobilité et de la Sécurité). Cette fédération se constitue des laboratoires clermontois dans le domaine, c'est à dire le LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes), le LaMI (Laboratoire de Mécanique et Ingénieries), l'Unité de Recherche TSCF (Technologies et Systèmes d'information pour les agrosystèmes de Clermont-Ferrand) du Cemagref (Institut de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement) et le LASMEA. Depuis 2002, les quatre partenaires du site ont décidé de lancer, au travers du projet de recherche V2I (Véhicules et Infrastructures Innovants), un axe d'effort autour des véhicules citadins électriques en réinvestissant leur capital de compétence dans ce type d'application. Cette volonté s'est manifestée par une politique budgétaire volontariste afin d'acquérir des équipements spécifiques. La preuve de l'implication de la fédération TIMS, dans le domaine des véhicules intelligents, est reflétée par la création de PAVIN : la Plate-forme d'Auvergne pour Véhicules Intelligents, l'une des plus importantes plate-formes expérimentales de France à ce jour, et implantée sur le site des Cézeaux où se situent l'ensemble des membres de TIMS. Cette plate-forme expérimentale, équipée de l'informatique et des capteurs nécessaires à son fonctionnement, est constituée de 5 véhicules urbains et d'un véhicule tout-terrain circulant sur un site d'essai de 4000 m^2 , reflétant les différents contextes susceptibles d'être rencontrés en milieu urbain ou naturel. L'objectif de PAVIN est de mettre à disposition de partenaires académiques et industriels des plate-formes expérimentales équipées de capteurs et systèmes de traitement d'informations afin d'identifier et de lever des verrous technologiques liés au développement des Véhicules Intelligents circulant en environnements variés (routier, urbain ou naturel). Cette plate-forme est à la fois un outil et une application. D'une part, c'est un outil, car elle permet de valider les résultats de méthodes de différents champs disciplinaires qui pourraient être portées vers d'autres applications. D'autre part, elle est également considérée comme une application, car elle a aussi vocation à apporter des solutions à ce concept précis que sont les Véhicules Intelligents.

De plus, il est bon de rappeler la contribution du Conseil Régional d'Auvergne à travers le financement de cette thèse assuré par une bourse docteur-ingénieur (BDI) en cofinancement entre le CNRS et la Région Auvergne.

Enfin, le partenariat avec le SMTC (Société Mixte des Transports en Commun de la

ville de Clermont-Ferrand), pour la mise au point de véhicules autonomes électriques, fait du groupe GRAVIR un acteur local majeur du transport en commun.

Objectifs de la thèse

La thèse exposée ici s'inscrit pleinement dans les grands projets cités précédemment, en contribuant à l'avancée des travaux en rapport avec la commande de véhicules urbains. En effet, cette thèse a pour objectif principal la mise en œuvre de lois de commande régissant la marche en convoi autonome de véhicules urbains. Plus physiquement, les développements doivent aboutir à une application pratique, où un convoi formé de plusieurs véhicules électriques urbains soit en mesure de suivre un itinéraire commun en respectant un écart inter-véhicule constant.

Ainsi, la contribution principale des travaux présentés consiste à la synthèse de commandes adaptées à la conduite en convoi. La particularité de la commande du convoi proposée ici est de se baser sur un découplage exact des performances latérale et longitudinale. De cette manière, les lois de commande latérale et longitudinale ont pu être adressées indépendamment l'une de l'autre. Ainsi, à partir du savoir-faire du laboratoire, une loi de commande latérale basée sur des techniques de linéarisation exacte est générée. De même, les performances longitudinales sont régies par une commande basée sur la même approche. De plus, contrairement aux techniques habituellement rencontrées, la commande longitudinale ne tient pas compte uniquement du véhicule situé immédiatement devant le véhicule commandé. En effet, typiquement, seules les données sur le véhicule directement visible par le robot commandé sont utilisées pour se réguler longitudinalement. La particularité de la commande longitudinale développée est que l'ensemble du convoi est étudié. La loi de commande est ainsi dite globale. Pour cela, l'état du véhicule de tête est pris en compte dans la loi de commande. Dans la pratique, afin de pouvoir se représenter l'ensemble des éléments du convoi, une communication sans fil inter-véhicules transmet les différents états des véhicules, fournis par un système de perception suffisamment précis, et s'affranchit de tout contact physique entre membres du convoi. Enfin, un module de supervision permet d'anticiper et de réagir à un ensemble de situations susceptibles d'être rencontrées en pratique.

Organisation du manuscrit

La présentation des travaux réalisés dans le cadre de l'étude et la mise en marche d'un convoi de véhicules urbains avec accrochage immatériel, se structure autour de 4 chapitres.

L'objectif du premier chapitre est de situer les développements réalisés parmi les travaux existants. Pour ce faire, une synthèse des travaux effectués dans la commande de robots mobiles, scindée selon la nature du contrôle (latéral ou longitudinal), est d'abord effectuée. A partir de cet état de l'art, il apparaît que les techniques de découplage des commandes sont courantes, et que les deux types de lois (latérale et longitudinale) sont généralement adressés indépendamment. De nombreuses approches offrent des éléments

de solution au guidage latéral. De même, plusieurs travaux de recherche ont abouti sur des solutions permettant le suivi d'un véhicule en amont. En revanche, la commande longitudinale de plusieurs véhicules urbains, collaborant au sein d'un convoi autonome, ne peut être traitée par cette technique de suivi du véhicule précédent. En effet, les accumulations d'erreur d'un élément à l'autre du peloton provoquent des comportements inadéquats, et donc, ce type de commande, dite locale, est inenvisageable. Afin de résoudre ce problème, une commande globale est pressentie et présentée dans le deuxième chapitre.

Celle-ci considère le convoi dans son ensemble. Cependant, afin de réaliser la commande longitudinale d'un convoi autonome, il est nécessaire de générer une loi de commande latérale découplée des performances longitudinales afin de traiter la commande longitudinale indépendamment des performances latérales. L'utilisation d'une technique de l'automatique : les systèmes chaînés, permet de linéariser de manière exacte le système non-linéaire formé par les véhicules, et de générer donc une loi de commande latérale non-linéaire et découplée de la vitesse [121]. Ensuite, la commande longitudinale est abordée. Après avoir synthétisé une loi de commande longitudinale locale [15], l'état du véhicule de tête est pris en compte dans la consigne de commande. Par conséquent, la nouvelle consigne de commande longitudinale représente le convoi de manière plus globale, la commande synthétisée est ainsi dite globale [14]. De plus, il est à noter que l'écart régulé entre les différents membres du convoi est une distance curviligne le long de la trajectoire de référence (représentant la distance parcourue, plutôt que la distance euclidienne), et que la loi de commande longitudinale est également une loi non linéaire basée sur une approche linéarisation exacte.

Les commandes synthétisées permettent d'adresser les situations nominales (convoi déjà formé, sans comportement aberrant de l'un de ses membres). Par contre, il faut maintenant aborder la gestion des situations critiques auxquelles le système est susceptible d'être confronté, tout en assurant le respect du confort et de la sécurité des passagers. Cela amène à un troisième chapitre où il est question du fonctionnement intégrant les situations critiques. Pour cela, un monitoring (ou supervision) gère les différentes tâches auxquelles peut être amené le convoi en situations réelles. Ainsi, les gestions de l'arrêt et du redémarrage du convoi, de freinages critiques, de pannes, de la sécurité et du confort, et de l'insertion ou désinsertion d'un véhicule au sein du peloton sont abordées et traitées.

Enfin, le quatrième chapitre illustre et commente les différentes expérimentations réalisées sur véhicules réels.

En premier lieu, le matériel utilisé et son implantation permettant la mise en œuvre du convoi sur véhicules expérimentaux, est exposé. Tout d'abord, le véhicule expérimental : un Cycab est présenté (voir Fig. 1). Ensuite, même si la commande du convoi est indépendante de la technologie des capteurs utilisés pour se représenter l'environnement d'expérimentation (comme le prouve les expérimentations réalisées dans [99]), les différents systèmes de perception retenus pour l'application sont décrits, i.e. soit un capteur RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System), soit un capteur de vision monoculaire. Enfin, l'architecture du convoi, et notamment le protocole de communication inter-véhicules, forme le dernier grand point de ce cha-

pitre. Celui-ci présente une architecture spécifique au convoi et s'articulant autour de la communication sans fil entre éléments du convoi.

En second lieu, le comportement réel des commandes développées, en situations standards ou non, est visualisé et apporte une validation de l'ensemble des développements théoriques. Ainsi, les performances de la commande latérale sont étudiées. Puis, le fonctionnement en convoi est observé en conditions standards. Enfin, l'introduction d'aléas permet ensuite de valider le module de supervision, et notamment le confort et la sécurité.

Chapitre 1

Etat de l'art

Avant d'entreprendre la synthèse d'une loi de commande permettant le déplacement en convoi de véhicules, il est nécessaire de correctement définir les objectifs visés et fixer les performances attendues. Pour ce faire, les travaux réalisés dans des environnements de travail voisins permettent de se faire une idée globale des objectifs couramment désignés et des performances des commandes traditionnellement employées. Ainsi, en fonction des observations effectuées, le développement d'une stratégie de commande adéquate pourra être élaboré.

Ce chapitre traite de la méthodologie mise en œuvre pour aboutir sur une stratégie de commande parfaitement adaptée à la conduite en convoi de véhicules urbains. Tout d'abord, le cadre de travail est défini. L'ensemble des types d'engins analogues aux véhicules urbains et susceptibles d'intégrer des applications de service est recensé. Puis, les fonctionnalités permettant le fonctionnement en convoi sont décrites. Par la suite, un intérêt particulier est porté sur la fonctionnalité centrale qu'est la commande du convoi. Différentes commandes existantes sont détaillées et permettent de visualiser la diversité des approches pouvant être utilisées, selon le type de véhicule, l'environnement de travail et les objectifs désirés. Les commandes envisagées intègrent un modèle d'évolution du système sur lequel elles sont implantées, et sont présentées dans deux sections consacrées au contrôle respectivement des performances latérale et longitudinale. Durant la progression de ces sections, les commandes se complexifient graduellement pour finalement déboucher sur le développement d'une approche de commande adaptée à la conduite en convoi en milieu urbain.

1.1 Véhicules communément employés pour des applications de service de type navigation en convoi

Cette partie recense les différents types de véhicules sur lesquels des applications de service (dont le fonctionnement en convoi autonome) sont susceptibles d'être ou ont déjà été implantées.

1.1.1 Les véhicules urbains

Les véhicules urbains sont des voitures de faibles dimensions, tout particulièrement adaptées à la conduite en milieu urbain. En effet, ces engins sont généralement équipés d'un moteur électrique, produisant ainsi un faible bruit et ne polluant pas l'environnement. Ces solutions de rechange à l'automobile privée, font partie intégrante du système public de transport et sont employées en complément aux transports publics classiques (bus, tramway, ...) ou aux modes de déplacement non-motorisés (marche, vélo, ...). Ces nouveaux concepts de mobilité ont vu le jour dans des programmes de libre accès à une voiture partagée ("car-sharing" dans la littérature anglaise). Des projets très prometteurs ont ainsi vu le jour à travers le monde.

Par exemple, aux Etats-Unis, les concepts de car-sharing, ont été mis en place dans les projets CARLINK II en juillet 2001 à Palo Alto en Californie [109] et Intellishare en 1999 sur un campus de l'université California-Riverside, également en Californie (<http://evwebsvr.cert.ucr.edu/intellishare/>). Le projet CARLINK II, achevé en juin 2002, consistait en une flotte de 19 véhicules Civic (véhicules illustrés en figure 1.1), disponibles dans une station située sur l'axe reliant San Francisco à Silicon Valley et destinée à 107 usagers. Le projet CARLINK II s'achève sur un bilan positif, aussi bien d'un point de vue économique, technologique que humain. Les fonctionnalités offertes pour un coût d'abonnement jugé raisonnable permettaient aux usagers de se déplacer de manière plus aisée. L'expertise développée dans ce projet a été ré-investie dans le système Intellishare, qui est opérationnel actuellement et déploie une flotte de 20 véhicules Civic. Cette flotte répartie sur 6 stations (3 en 1999) est destinée à 400 abonnés. Avec une fréquentation de l'ordre de 120 trajets par jour (six ou sept voyages effectués pour un véhicule chaque jour), ce projet est considéré comme un grand succès (plus de 60 000 trajets ont déjà été effectués).



FIG. 1.1 – Une station de véhicules du programme CARLINK

Toyota, via le projet CRAYON [33] au Japon, mise également sur le partage de véhicules. Ce projet a été mis en place en 1999, majoritairement à Toyota City, et est

depuis toujours opérationnel. Il permet à 300 utilisateurs le partage de 50 véhicules urbains afin d'effectuer de courts trajets au sein et autour de Toyota City. Les objectifs futurs concernent l'amélioration des services offerts aux usagers, tout en réduisant la pollution atmosphérique et décongestionnant le trafic.

En France, à La Rochelle, un tel service est présent depuis 1999 dans le cadre du projet Lisélec (dont le schéma de principe est décrit sur la figure 1.2). Ce service est accessible 24 h sur 24 et 7 jours sur 7 pour circuler dans toute l'agglomération rochelaise. Moyennant un abonnement, le client bénéficie d'un accès à l'une des 50 voitures urbaines électriques, réparties sur 7 stations.



FIG. 1.2 – Schéma illustrant le projet Lisélec

Les avantages économiques, écologiques et pratiques, ainsi que l'engouement du grand public perçu dans les villes pionnières (le nombre d'adhérents souscrivant à ces services est en constante augmentation) encouragent les responsables politiques des agglomérations à s'équiper de tels systèmes de voitures en libre-accès.

Très vite, des fonctionnalités de conduite entièrement automatisée ont vu le jour sur ces véhicules, en particulier pour la marche en convoi autonome. Ceci s'intègre dans le cadre des développements pour les transports publics urbains (désignés par l'acronyme ITS : Intelligent Transportation Systems).

Une première solution, très simple sur le plan de la commande, est proposée par le projet BURST (Bright URban System for Transportation). Il devrait permettre le convoyage autonome de véhicules urbains nommés “Serpentine”, illustrés par la figure 1.3 [40]. Ceux-ci sont alimentés par induction à partir d’une voie active enfouie dans la chaussée, sans contact direct. De plus, celle-ci permet également de réaliser une commande par filoguidage. Un site pilote de démonstration sur les quais d’Ouchy de Lausanne (Suisse) est en place depuis 2001. A terme, ce projet devrait permettre d’équiper l’ensemble de l’agglomération de Lausanne avec ce type d’engins.



FIG. 1.3 – Exemple d’une flotte de véhicules “Serpentine”

Un autre exemple très représentatif est le programme Praxitèle, mené en France par l’INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) dans le cadre de LA Route Automatisée (LARA), débuté en 1993. Les recherches menées, et décrites de façon plus approfondie par la suite dans ce manuscrit, consistent au libre accès aux véhicules et à l’automatisation de voitures en convoi, dans le domaine de la route intelligente.

Le programme Praxitèle a donné naissance à des véhicules urbains électriques, équipés de moyens électroniques de gestion, de contrôle et de communication, nommés PRAXIS (ancêtres du Cycab, illustrés par la figure 1.4). L’expérience de Saint-Quentin-en-Yvelines, débutée en octobre 1997, visait à tester en grandeur réelle un nouveau mode de transport, basé sur l’usage en libre service automatisé de véhicules particuliers. 50 de ces engins ont été mis à la disposition des usagers, dans 15 stations. Avec près de 800 clients, 25 000 courses effectuées et 350 000 km parcourus, cette expérimentation s’est achevée en juillet 1999 sur un bilan très positif. Il en ressort que ce concept, complémentaire aux bus ou taxis, a été approuvé par 95 % des usagers. Ce constat encourage de telles innovations à l’avenir. Ce concept a été également adopté par Toyota, Nissan et Honda dans le cadre de l’ICVS (Intelligent Vehicle Car Sharing).

Enfin, ce programme de recherche a donné naissance à un consortium européen Cybercar/Cybermove, dont l’état d’avancement est décrit dans [93]. L’objectif du projet CyberCar est de réunir tous les acteurs européens dans le domaine afin d’examiner, d’échanger les meilleures pratiques, de se partager une partie du travail de développement et de progresser le plus rapidement possible dans la mise en pratique



FIG. 1.4 – Exemple d’un convoi de deux véhicules dans le cadre du projet Praxitèle

expérimentale. Plusieurs villes dans l’ensemble de l’Europe ont déjà accepté de participer à ce projet. Celles-ci étudieront, avec les associés du projet, la potentialité pour exploiter de tels systèmes et donneront éventuellement des contraintes spécifiques. Une part importante du projet portera sur le développement et l’essai de plusieurs technologies pour le perfectionnement des systèmes existants. Ces technologies adressent les problèmes de sécurité (e.g. évitement d’obstacles), la gestion de l’énergie, une meilleure gestion de la flotte et le développement d’interfaces utilisateur simples et standards.

Si certaines contraintes liées à la conduite en milieu urbain sont à prendre en compte, de lourdes considérations peuvent également être éliminées. En effet, en étudiant les spécificités propres à la conduite en milieu urbain, quelques hypothèses simplificatrices peuvent être introduites. Par exemple, l’environnement de travail peut être assimilé à un terrain plat non accidenté. De plus, compte tenu de leur faible vitesse de fonctionnement et du revêtement des surfaces de fonctionnement (généralement de l’asphalte), une hypothèse de roulement sans glissement est entièrement justifiée. Enfin, les véhicules urbains étant électriques, la modélisation du système de propulsion se trouve simplifiée comparée aux engins à combustion.

1.1.2 D’autres véhicules susceptibles d’intégrer des applications de service analogues

Mis à part les véhicules urbains, une grande classe de robots, plus ou moins similaires, est également susceptible d’intégrer des applications de service comme le fonctionnement en convoi autonome.

Ainsi, dans [8], des convois de bus autonomes sont étudiés dans le cadre d’un nouveau système de transit IMTS (Intelligent Multimode Transit System). Comme les bus présentent d’imposantes dimensions, et même s’ils fonctionnent aussi dans un environnement urbain, ils ne peuvent être assimilés aux véhicules urbains. Par exemple, rien que l’important poids d’un bus fait que les hypothèses de roulement sans glissement

ne peuvent être formulées. Il est ainsi nécessaire de se pencher sur une modélisation du véhicule décrivant sa dynamique. Les expérimentations ont été conduites sur une route (en milieu urbain) constituée de lignes droites et de faibles courbes. Des marqueurs magnétiques avaient été installés tous les 2 *m* le long du chemin. La précision du guidage latéral à une vitesse de 30 *km/h* est de 5 *cm* (en ligne droite et en courbe), c'est-à-dire une précision du même ordre que celle des balises magnétiques.

Dans un cadre extérieur à l'environnement urbain, des recherches sur la commande de véhicules automatisés sont également effectuées, notamment pour le transport sur voies rapides. Ainsi, les autoroutes automatisées (AHS : Automated Highway System) ont vu le jour en différents endroits de par le monde [30]. Les infrastructures de l'autoroute sont équipées de nombreux capteurs et de communication. Au Japon, des systèmes de conduite autonomes ACC (Adaptive Cruise Control) sont mis en place [116], [107]. Ceux-ci régulent automatiquement la vitesse des véhicules de manière à assurer entre eux un écart minimal. En 2000 à Tsukuba au Japon, une démonstration importante "Smart Cruise 21-Demo 2000" a été menée et a rassemblé 2400 visiteurs. Celle-ci présentait des dispositifs automatisés d'aide à la conduite avec communication infrastructure/véhicules. Parmi les démonstrations présentées, des systèmes de conduite autonomes ACC ont permis à un véhicule de maintenir un écart constant (erreur maximale de l'ordre de 1 *m*) avec le véhicule le précédant par le contrôle de l'accélération et du freinage, et ce à des vitesses de l'ordre de 90 *km/h*. L'issue de ces démonstrations laisse entrevoir de larges possibilités. Ces projets d'autoroutes automatisées devraient permettre en 2010 une conduite automatique des véhicules sur 7 secteurs d'autoroutes japonaises.

Cependant, le programme PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) reste de loin le projet de plus grande envergure à ce jour. PATH est un programme multi-disciplinaire créé en 1986 et ayant pour mission principale d'appliquer les technologies de pointe pour augmenter à la fois la capacité et la sécurité des autoroutes, tout en réduisant les problèmes de congestion du trafic, de pollution atmosphérique et de consommation énergétique. Les recherches effectuées dans le domaine des Systèmes de Transports Intelligents ITS traitent un large champ d'applications comprenant aussi bien les systèmes avancés d'information et de gestion des transports (ATMIS : Advanced Transportation Management and Information Systems), les outils d'aide à la décision et de mesure des performances des équipements routiers (AVCSS : Systèmes Avancés de Commande et de Sécurité des Véhicules) et la commande totale des véhicules. Un exemple de convoi formé de 8 voitures est présenté sur la figure 1.5. Les usagers des autoroutes équipées de balises magnétiques en Californie peuvent déjà se doter de systèmes d'aide à la conduite leur permettant de connaître en temps-réel l'état de l'infrastructure et du trafic.

Les applications, traitant de la conduite automatisée de véhicules routiers, présentent des caractéristiques très particulières et s'éloignent assez des conditions rencontrées en centre-ville. Les véhicules, généralement à combustion, nécessitent une modélisation approfondie de la dynamique du moteur. Ensuite, le fonctionnement à vitesse élevée (typiquement autour de 100 *km/h*) et les voies de circulation de faibles courbures im-



FIG. 1.5 – Convoi de 8 voitures réalisé dans le cadre du projet PATH

posent de nouvelles considérations. Les objectifs de commande peuvent se retrouver modifiés. Ainsi, pour tenir compte des variations de vitesse, tout en assurant la sécurité du convoi, l'objectif de la commande longitudinale est de maintenir, non pas une distance, mais un écart temporel entre véhicules. Enfin, les paramètres de modélisation de ces véhicules ne sont pas toujours constants en cours de fonctionnement : par exemple, les variations de vitesse ou d'accélération, ainsi que les intempéries susceptibles d'être rencontrées, sont quelques uns des facteurs engendrant la variation de ces paramètres. Les travaux exposés dans [54] et [53] traitent ainsi de l'influence des conditions routières et climatiques Canadiennes.

Le cadre de travail peut également sortir du domaine des transports. Ainsi, des recherches dans lesquelles des chasse-neiges fonctionnent en automatique de manière isolée [91] ou en convoi [72] ont également été entreprises. Là encore, la dynamique des véhicules, et en particulier le contact avec le sol, doit être particulièrement soignée, notamment pour éviter tout glissement inattendu. Des essais ont été effectués en conditions réelles sur un véhicule équipé d'un GPS centimétrique. Les expérimentations révèlent une erreur latérale maximale de 50 *cm* en ligne droite et de 1.0 *m* en courbe. Les erreurs moyennes sont de l'ordre de 10 *cm* et sont proches de la précision des capteurs.

Enfin, de nouvelles infrastructures sont également envisagées, qui bénéficieraient d'un fonctionnement automatique pour la régulation inter-véhicules.

Ainsi, des pelotons automatiques, composés de plusieurs navettes, devraient voir le jour dans le cadre du transport de passagers basé sur la technologie MAGLEV [71]. La technologie employée est très avant-gardiste, car elle se base sur une suspension électromagnétique EMS (ElectroMagnetic Suspension), et permet des vitesses de fonc-

tionnement supérieures à 500 km/h. Le système de transport serait alors composé de navettes (un prototype est présenté en figure 1.6) circulant en lévitation grâce à des champs électromagnétiques. Le Transrapid est un train monorail allemand basé sur cette technologie. La seule exploitation commerciale de ce type est à l'heure actuelle le Transrapid reliant sur 30 km Shanghai à son aéroport de Pu Dong, inaugurée en 2002 et dont le premier trajet commercial a eu lieu en mars 2004. Le concurrent japonais Maglev a pour objectif de construire une ligne Tokyo-Osaka, pouvant être parcourue en une heure. Le projet futuriste Swissmetro utilise les mêmes procédés mais les doublant de l'utilisation de tunnels sous vide d'air. Ceci a l'avantage de supprimer les frottements de l'air, qui deviennent très importants à de telles vitesses.



FIG. 1.6 – Prototype d'une navette formant le réseau MAGLEV

Encore à l'étude, un système de transport en commun automatisé fonctionnant à l'électricité est pressenti pour circuler dans les rues de Québec (sa mise en œuvre devrait débuter dans une vingtaine d'années). Il présente des coûts de déploiement inférieurs au tramway et de fonctionnement inférieurs à ceux des autobus. Ce système se nomme SkyWeb Express Personal Rapid Transit [5]. Il est composé de petites navettes individuelles, illustrées sur la figure 1.7, circulant sur une voie dédiée disposée à une hauteur permettant de ne pas empiéter sur les zones de circulation actuelles.

En dépit des différences existant entre ces différents véhicules et les véhicules urbains, les démarches adoptées pour parvenir à un fonctionnement en convoi s'avèrent souvent très intéressantes, car elles peuvent s'appliquer pour partie dans la synthèse de lois de commande pour le convoi, indépendamment des conditions de travail considérées.

Les nombreuses similarités entre les méthodologies employées pour ces différentes classes d'engins, s'expliquent par une structure commune pour tous les véhicules cités : ils sont tous équipés d'un unique essieu directeur (en mettant bien sûr de côté les véhicules mus par une suspension magnétique). Leurs modélisations reposent donc sur une base commune. Des développements ont également été proposés pour des véhicules équipés de plusieurs essieux directeurs. Par exemple, dans [2], le véhicule considéré



FIG. 1.7 – Navette du SkyWeb Express Personal Rapid Transit

a la capacité d'orienter les essieux avant et arrière indépendamment. La commande indépendante de ces deux trains directeurs permet de faire décrire au véhicule des trajectoire à très forte courbure, comme en témoignent les simulations effectuées pour le cas d'un bus. De même, dans [11], le véhicule commandé peut également commander l'angle des roues avant et arrière. Cependant, ces recherches, s'éloignant trop du cadre des véhicules urbains, ne seront pas commentées ici.

Les différents véhicules équipés d'un unique train directeur possèdent tous des propriétés et caractéristiques propres et donc, une dynamique spécifique. Cependant, en s'affranchissant des spécificités de la conduite des véhicules non-urbains et en tenant compte des hypothèses propres au fonctionnement des véhicules urbains (roulement sans glissement,...), il est alors possible de comparer les travaux existants. De cette manière, les différentes fonctionnalités élémentaires nécessaires à la navigation en convoi peuvent être étudiées, quels que soient l'environnement de travail et le véhicule expérimental. Celles-ci sont présentées dans la section suivante.

1.2 Fonctionnalités élémentaires pour la navigation en convoi

Afin de mettre en œuvre une application aussi élaborée que la navigation autonome en convoi, différentes fonctionnalités de base doivent être développées et mises en place. Après avoir spécifié la tâche visée (navigation en convoi), les fonctions élémentaires nécessaires sont présentées dans cette section.

1.2.1 Spécification de la tâche de navigation en convoi

La tâche de navigation en convoi consiste à amener une flotte de véhicules (disposés en file) d'un point à un autre dans l'environnement de navigation. Couramment, l'environnement de navigation en milieu urbain est représenté par une base cartographique métrique plane et fixe. Un processus de planification exploite ce modèle de l'environnement afin de spécifier le déplacement des robots pour réaliser la tâche. D'autres niveaux de représentation peuvent être trouvés dans [120] et [75]. Ces représentations peuvent se baser sur des cartes topologiques composées uniquement de nœuds et de liens.

Dans les travaux exposés ici, la tâche de navigation est exprimée par le suivi d'un chemin de référence (amenant les robots d'un point à un autre). Cependant, d'autres alternatives au suivi de chemin existent afin de spécifier la tâche de navigation. Ainsi, la tâche de navigation peut être d'amener un robot en un point d'arrivée tout en évitant une succession d'obstacles divers.

1.2.2 Localisation d'un convoi

L'objectif de la localisation du convoi est de permettre de situer l'ensemble des robots par rapport au chemin de référence, et de les situer les uns par rapport aux autres. La localisation du convoi est ainsi divisée en deux types de localisation. D'une part, une localisation absolue, définie comme la localisation de chaque véhicule par rapport au chemin de référence (représentant l'objectif de navigation). Cette localisation est exprimée dans un repère absolu et fixe (commun à tous les véhicules) et dans lequel le chemin de référence est également exprimé. D'autre part, une localisation relative, définie comme la localisation de chaque véhicule au sein du convoi.

1.2.2.1 Localisation absolue du convoi

Afin de réaliser la tâche de navigation (guidage des véhicules le long d'un chemin de référence), chaque véhicule du convoi doit être en mesure de se localiser par rapport au chemin. Celui-ci étant exprimé dans un repère absolu et fixe, une localisation de chacun des véhicules dans ce même repère doit être recherchée. Pour cela, il convient de se tourner vers des systèmes de perception absolus, qui seront décrits à la section 1.2.3.

Plusieurs représentation de cette localisation peuvent être considérées. La plus courante est celle illustrée par le schéma Fig. 1.8, qui permet de se représenter, sans la moindre ambiguïté, la localisation du véhicule par rapport à la trajectoire sur laquelle s'asservir.

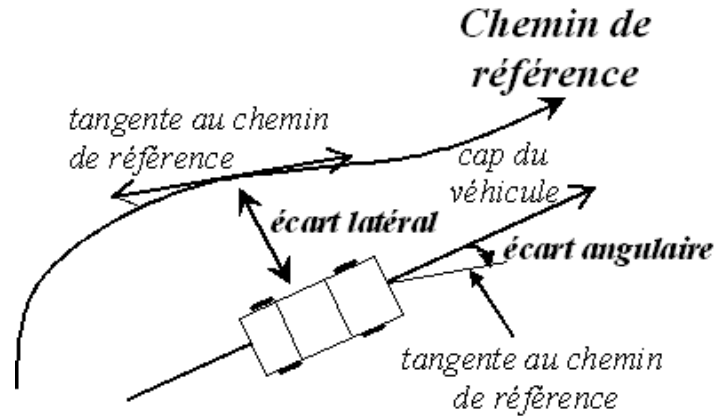


FIG. 1.8 – Expression du véhicule dans un repère basé sur le chemin de référence

1.2.2.2 Localisation relative au sein du convoi

La localisation absolue permet à un véhicule de se situer dans son environnement d'évolution. Cependant, la navigation en convoi impose également que chaque véhicule puisse se localiser relativement par rapport aux autres éléments du convoi. Pour cela, deux types d'approche peuvent être adoptés. D'un côté, chaque véhicule dispose d'un système de localisation relative embarqué permettant d'exprimer l'état de l'ensemble du convoi dans un repère lié à ce système de localisation. De l'autre, l'ensemble des localisations absolues réalisées dans un repère fixe commun peut être partagé au moyen de communications au sein du convoi.

Système de localisation relative

Grâce à un tel système, chaque véhicule peut a priori se localiser directement en fonction des autres éléments du convoi. Malheureusement, des limitations demeurent. Le champ d'action de tels systèmes est relativement restreint. Les caméras disposent d'un champ de vision limité. D'autres systèmes de perception permettant une localisation relative et offrant un champ d'action plus vaste (RADAR, capteurs ultrasons, ...), n'offrent pas toujours une portée suffisamment élevée. De ce fait, les capteurs relatifs sont avant tout utilisés pour repérer d'éventuels obstacles ou les véhicules les plus proches. Enfin, les risques de masquage n'autorisent pas l'usage de ce type de système pour la localisation au sein d'un convoi. Les éléments du peloton les plus en amont peuvent, en effet, sortir du champ de perception des capteurs ou être masqués par d'autres éléments. Le schéma donné par la figure 1.9 présente d'ailleurs ces phénomènes : si les véhicules 1 et 2 disposent d'une bonne visibilité, la voiture 3 ne peut localiser le premier véhicule qui est masqué par le deuxième, et le quatrième élément du convoi, à l'entrée de la courbure, est incapable de percevoir le moindre des véhicules en amont,

qui ont déjà quitté la courbure. Les systèmes de perception relative ne semblent donc pas être appropriés pour la localisation au sein du convoi

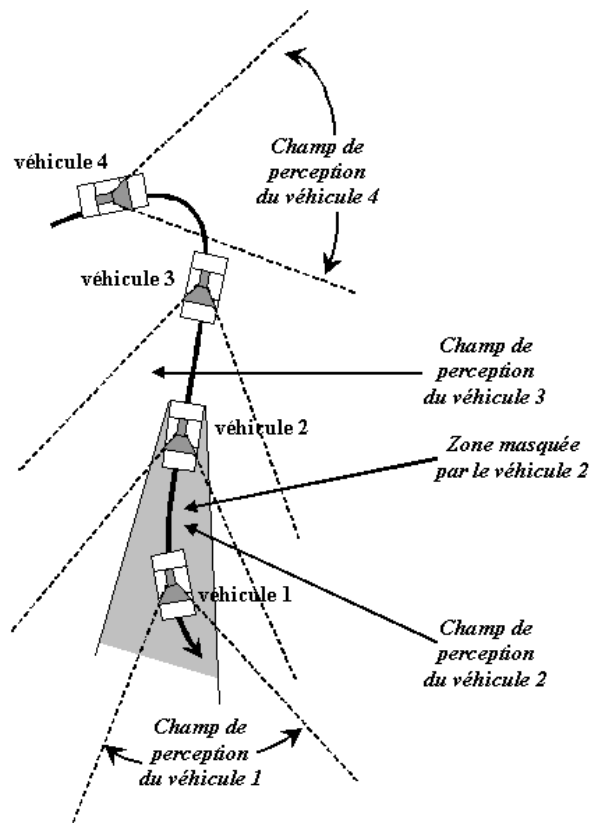


FIG. 1.9 – Schéma d'un convoi équipé de systèmes de perception relatifs

Communication au sein du convoi

Une autre approche consiste à mettre en commun les localisations absolues, disponibles au niveau de chaque véhicule, via une communication au sein du convoi.

L'apport de la communication ouvre un ensemble d'applications très diverses et permet, notamment par la signalisation des dangers en amont, une plus grande sécurité. De ce fait, les responsables politiques, au vu des possibilités offertes par la communication sans fil, encouragent de tels dispositifs. Par exemple, le programme européen CarTALK2000, présenté dans [95], fédère plusieurs instituts de recherche et industriels, et a pour objectif d'offrir une assistance au conducteur. Le gouvernement allemand vient également d'autoriser les grands constructeurs automobiles à développer les bases d'un standard de communication sans-fil inter-véhicules. Ce projet nommé NOW, pour "Network On Wheels" [19], fait partie du consortium Car2Car. Ce groupe, qui fédère la

plupart des grands constructeurs européens automobiles (Audi [74], BMW [61], Daimler, Chrysler, Fiat [6], Renault [105] et Volkswagen [74]), souhaite tester puis instaurer dans l'industrie un nouveau standard de communication sans fil. Très similaire au WiFi, ce réseau à base d'ondes radio serait exclusivement dédié à l'automobile. L'objectif est ainsi de renforcer la sécurité routière, conformément aux souhaits de la Commission Européenne.

Pour développer ces communications sans fil inter-véhicules, les normes 802.11 et IPv6 sont considérées, de même qu'un fonctionnement en mode ad hoc, à savoir les éléments se connectent les uns aux autres afin de constituer un réseau point à point (peer to peer en anglais), chaque élément du réseau jouant en même temps le rôle de client et celui de point d'accès. La mise en place automatique de liens temporaires entre des véhicules mobiles, en vue d'échange d'informations concernant le trafic, est aussi étudiée.

A priori, l'usage de communications entre les véhicules du convoi permettrait également à tous les membres du peloton de pouvoir se représenter l'état du convoi dans son ensemble, et ainsi, être en mesure, via une commande globale du convoi, d'adopter un comportement cohérent. Pour cela, deux types de communication se distinguent :

- La communication avec l'infrastructure consiste en une série d'échanges entre un véhicule et des éléments propres à la chaussée, dédiés à cet effet. L'avantage majeur de cette implantation est la centralisation de toutes les informations, et l'acquisition de toutes celles pertinentes au sein d'un véhicule. Cependant, les délais de transmission entre véhicules sont globalement plus longs, et une infrastructure communicante est obligatoire.
- La communication entre véhicules est une seconde possibilité. Généralement, les véhicules de tête transmettent leurs informations aux suiveurs. Cette approche a l'avantage d'être libre de toute infrastructure. Néanmoins, la communication est intra-véhicules, et donc, aucune information extérieure au peloton ne peut être reçue par le groupe, [124] [89].

Afin de tirer parti des avantages proposés par ces deux types de communication, leur cumul a également été considéré, comme par exemple dans [127] et [135].

Pour l'application de conduite en convoi, dès lors que les véhicules sont susceptibles de se déplacer en tout point de la ville, il semble préférable de disposer d'une communication entre les différents véhicules formant la flotte, plutôt que d'avoir recours à une communication avec l'infrastructure. De plus, l'intégration d'un système de perception relatif pourrait être envisagée pour suppléer le système de communication dans des situations critiques, en se concentrant, par exemple, sur la détection d'éventuels dangers locaux.

1.2.3 Les systèmes de perception

Afin d'obtenir une localisation absolue du convoi, des systèmes de perception absolue (couplés à une communication au sein du convoi) sont nécessaires. Ceux-ci sont présentés ci-dessous en deux grandes classes : la section 1.2.3.1 décrit les systèmes de

perception implantés dans une infrastructure spécifique, et la section 1.2.3.2 présente ceux qui sont embarqués sur les robots mobiles.

1.2.3.1 Systèmes de perception intégrés dans un environnement coopératif

Deux types de système sont exposés : l'un intégré directement à la chaussée, l'autre observant la scène à partir de l'infrastructure.

Systèmes intégrés dans la route

Parmi les systèmes de perception intégrés à la route offrant de très bonnes performances, plusieurs solutions technologiques peuvent être distinguées : par exemple les systèmes filoguidés, ceux à base de balises magnétiques ou de transpondeurs.

Dans les applications basées sur le filoguidage, les véhicules sont en mesure de se localiser par rapport au chemin de référence via un câble placé suivant cette référence. Les véhicules Golf-Cars développés par Yamaha [130] ont été étudiés pour utiliser ce type de capteur. Trois capteurs situés à l'avant du véhicule mesurent le champ créé par un câble, parcouru par un courant alternatif de l'ordre de 2 kHz , intégré dans la chaussée. Ainsi, le véhicule connaît à partir des différentes intensités mesurées son état par rapport au câble. Pour obtenir des informations additionnelles, notamment la vitesse à appliquer, des balises magnétiques sont également situées sous la route. Les travaux réalisés dans [20] et dans [106] utilisent également ces capteurs.



FIG. 1.10 – Balise magnétique utilisée dans le programme PATH

Les balises magnétiques peuvent aussi être utilisées pour décrire le chemin de référence. Le projet d'autoroute automatisée (AHS : Automated Highway System) [50] proposé dans le cadre du projet PATH (California Partners for Advanced Transit and Highways, <http://www.path.berkeley.edu/>), utilise ce type de capteurs, présentés

dans [136] et représentés sur la figure 1.10, pour la localisation des véhicules. Les balises magnétiques installées à San Diego sont placées tous les 1.2 m. La pose de ces balises doit être la plus précise possible, étant donné qu'elles définissent le chemin à suivre. Un équipement de 6 magnétomètres à flux (3 à l'avant, 3 à l'arrière) est nécessaire pour déterminer la position du véhicule par rapport au centre de la chaussée. Ce système de repérage magnétique est séduisant car il offre des performances très intéressantes : une précision de positionnement latéral de 5 mm et de 5 cm longitudinalement. Le système est également insensible aux conditions météorologiques : chutes de neige, accumulation d'eau sur la chaussée. Enfin, l'alternance de polarité de ces aimants crée un code binaire permettant de transmettre également les caractéristiques géométriques de la route. Deux chaussées de 8 miles de l'autoroute américaine Interstate 15 (en Californie) étaient équipées lors d'essais en 1997.

Ce système de localisation est également envisagé par Toyota dans le cadre du transport de passagers [8]. Ce système devrait équiper les premières lignes de bus des métropoles japonaises dans les années à venir.

Une technique très similaire aux balises magnétiques, consiste à baser le guidage sur des transpondeurs, comme cela est actuellement réalisé dans le projet People Mover de Frog Navigation Systems (<http://www.frog.nl>). Ce système de localisation est quelque peu plus sophistiqué, car il offre aux véhicules de nouvelles informations comme l'état de la circulation en aval. Un tel système est en fonctionnement depuis 1999 dans la ville de Capelle aan den IJssel (périphérie de Rotterdam). Actuellement, six navettes (pouvant atteindre 40 km/h) permettent de déplacer 2500 passagers chaque heure sur une piste s'étendant sur 2 km et comprenant 5 stations.

Tous ces capteurs offrent de bonnes performances de localisation. Cependant, il est nécessaire préalablement de baliser ou d'équiper l'infrastructure où évoluent les véhicules. Ceci engendre un coût élevé. Ainsi, à San Diego, l'Interstate 15 a été équipée d'aimants pour un coût proche à 10 000 dollars par mile, ce coût étant tout de même appelé à diminuer significativement lorsque le processus d'installation sera automatisé. Enfin, la portabilité des applications développées est quasi-inexistante.

Observation de la scène

Une autre méthode, à coût moins élevé, permettant de se représenter l'ensemble d'un convoi, consiste à observer les différents acteurs d'un point de vue extérieur au système. Ainsi, l'implantation judicieuse de capteurs fixes dans l'environnement de travail offre une observation générale de la scène, et ainsi, la localisation des différents éléments du peloton.

Cette approche est développée dans le projet DAVINCI (Design of an Automated Vehicle INtegrated Control Instruments, 1999-2003, [110]), pour entre autres, le contrôle d'un convoi de véhicules (les techniques de commandes utilisées seront décrites à la page 55). Comme schématisé sur la figure 1.11, un capteur visuel fixe intégré dans l'environnement de travail (une caméra haute résolution cadencée à 15 Hz) observant

les véhicules équipés de marqueurs, permet d'acquérir les vitesses latérales et longitudinales, ainsi que le cap des véhicules. Ceci revient quasiment à se retrouver avec un capteur de type GPS centimétrique fonctionnant en temps réel. Il est alors question de LPS (Local Positioning System). Afin de diminuer les coûts, les expérimentations ont été conduites sur des maquettes, représentées sur la figure 1.12. Des simulations sur des modèles de véhicule grandeur nature ont également été réalisées.

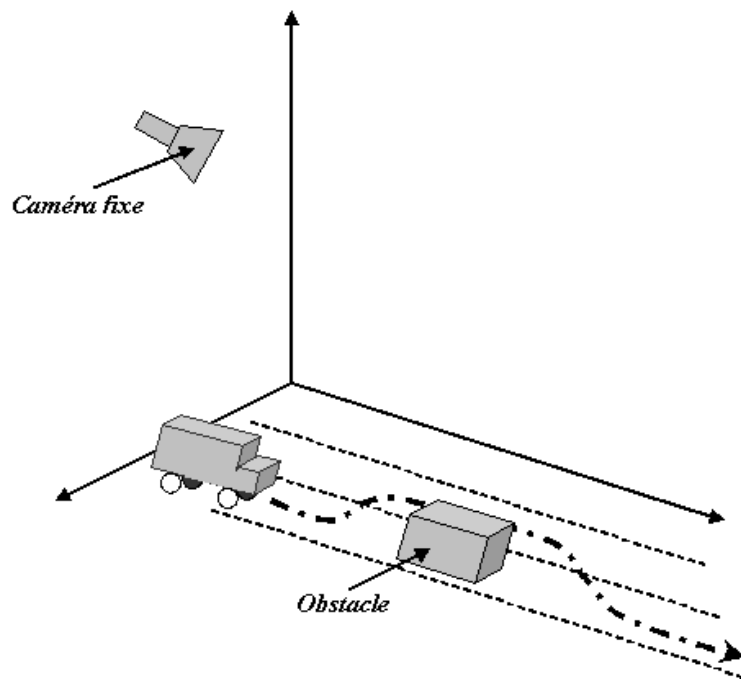


FIG. 1.11 – Dispositif expérimental du projet DAVINCI



FIG. 1.12 – Maquette utilisée dans le projet DAVINCI

Les performances d'une telle localisation atteignent une précision centimétrique. De plus, un avantage considérable est le fait que l'ensemble des mesures est collecté par un unique dispositif. Cependant, pour qu'une commande soit appliquée aux véhicules, il est nécessaire qu'une communication entre le dispositif et les véhicules soit présente,

soit pour transmettre l'ensemble des mesures en vue du calcul de la commande au sein du véhicule, soit pour transmettre la commande à appliquer déjà calculée en amont. De plus, en situations réelles, ce dispositif de localisation doit être judicieusement placé pour éviter tout risque de masquage. Au besoin, plusieurs dispositifs, ayant des points de vue complémentaires, peuvent être requis pour reconstruire les données masquées. Enfin, la nécessité d'équiper l'infrastructure rend cette approche difficile à déplacer.

1.2.3.2 Localisation autonome

Un premier type de systèmes de localisation absolue ne nécessitant aucune infrastructure spécifique est constitué par les systèmes de positionnement par satellites. Les capteurs GPS (Global Positioning System) permettent une localisation avec une précision de l'ordre de quelques mètres. De nouvelles technologies offrent de meilleures performances. Les capteurs D-GPS (Differential GPS) et RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) offrent des mesures d'une précision inférieure à 1 *m*, et allant jusqu'à 1 *cm* pour certains capteurs RTK-GPS. Malheureusement, si les performances de localisation sont très satisfaisantes pour les applications visées, le fonctionnement n'est pas toujours assuré en milieu urbain : la visibilité des satellites peut être occultée par les bâtiments. Pour lever cette limitation, les recherches présentées dans [21] proposent d'introduire une communication entre les récepteurs RTK-GPS afin d'obtenir une plus grande fiabilité et une plus grande précision de la localisation. Des essais, réalisés sur un convoi de 4 voitures, effectuant plusieurs manœuvres spécifiques, valident ces avancées.

Un second type de systèmes de localisation absolue couramment utilisés pour la navigation, et dont le coût est bien moindre que celui des récepteurs RTK-GPS, est constitué par les capteurs de vision. Dans [13], la localisation du robot mobile est réalisée grâce à une succession d'images clés, apprises lors d'une phase d'apprentissage et stockées dans une mémoire visuelle. Dans [100], la phase préalable permet cette fois de reconstruire la trajectoire de référence en trois dimensions, à partir de la séquence vidéo d'apprentissage filmée durant le parcours du chemin désiré. Cette trajectoire de référence reconstruite est alors utilisée pour localiser en temps-réel le robot mobile.

Enfin, afin de robustifier ces systèmes de perception, les différentes informations obtenues par les capteurs utilisés peuvent être complétées par celles fournies par les capteurs proprioceptifs. Ces capteurs ont pour propriété commune d'informer sur l'état interne du véhicule. De nombreuses mesures propres au robot sont susceptibles d'être effectuées : la vitesse longitudinale peut être évaluée grâce aux odomètres, tachymètres ou encodeurs montés sur les roues, les accéléromètres permettent de remonter les informations sur les accélérations du système, enfin des mesures angulaires peuvent être obtenues par des gyromètres ou des boussoles électroniques.

Pour combiner les mesures effectuées par un capteur absolu avec celles d'autres capteurs, généralement des capteurs proprioceptifs, l'une des méthodes les plus classiques est la fusion d'informations au moyen d'un filtre de Kalman. Généralement la localisation est effectuée à la fréquence du capteur ayant le taux de rafraîchissement le plus élevé, typiquement celui des odomètres. Le véhicule est donc en mesure de se loca-

liser entre deux mesures absolues. De plus, la localisation est également plus précise : l'évaluation des bruits de mesure des différents capteurs permet de donner plus ou moins d'importance à telle ou telle donnée capteur. Enfin, si la localisation absolue est prise en défaut, les données proprioceptives peuvent garantir temporairement une localisation satisfaisante.

Par exemple, dans le cadre du projet PATH, un capteur RTK-GPS combiné avec un système de mesure INS (Inertial Navigation System) est étudié, notamment dans [34]. Enfin, si les capteurs proprioceptifs sont souvent combinés avec le capteur GPS, ils peuvent également l'être avec d'autres capteurs offrant une localisation absolue. Dans [102] et [76], des mesures issues des proprioceptifs sont fusionnées avec un système de localisation cartographique.

1.2.4 Contrôle du convoi

Dès lors que les véhicules sont localisés à l'aide d'un système de perception, il est possible de développer les commandes permettant la navigation autonome en convoi. Pour l'ensemble des véhicules, les objectifs de la commande sont le suivi d'un chemin commun, tout en respectant un écart pré-défini avec les autres membres du convoi.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature. Deux grandes familles peuvent se distinguer : d'une part, les approches ne nécessitant pas la connaissance d'un modèle mathématique du système, décrites brièvement à la section 1.2.4.1, et d'autre part celles exploitant au contraire un modèle du système. Ces dernières sont introduites à la section 1.2.4.2 et discutées plus en détail aux sections 1.3 et 1.4, selon la modélisation adoptée pour représenter le système.

1.2.4.1 Commandes ne nécessitant aucune modélisation du véhicule

Parmi les techniques de commande ne s'appuyant pas sur une modélisation mathématique du système, il existe notamment les réseaux de neurones, qui sont capables de "rejouer", par apprentissage, un comportement observé. Des exemples de guidage latéral peuvent être trouvés dans [44], [65] et [119]. Par exemple, dans [65], en fonction des mesures reçues sur les différents capteurs (ceinture de capteurs ultrasoniques détectant d'éventuels obstacles, une caméra CCD, et un encodeur sur l'angle de direction), le système adapte sa commande en direction. Il est à noter qu'en cas de détection d'obstacles, le réseau de neurones régénère une nouvelle trajectoire. Enfin, la vitesse du véhicule est choisie à partir d'un apprentissage préalable.

Une autre approche consiste à utiliser la logique floue. Les travaux réalisés dans [26], [113] et [43] traitent ainsi de la navigation en convoi par cette technique. Les commandes basées sur la logique floue sont générées à partir de règles fondées sur l'expérience des utilisateurs et leur connaissance du système. Par exemple, dans [113], l'objectif est le suivi de véhicules en ligne droite et avec des virages à 90 degrés (typiques des carrefours en ville). Les tests se font sur des véhicules électriques standards : des Citroën Berlingo. Ils sont équipés d'un récepteur GPS différentiel, un réseau local sans fil, un capteur tachymétrique, et une caméra CCD pour l'évitement d'obstacles.

Le suivi de trajectoire est réalisé au moyen d'un contrôleur flou, actionnant l'orientation des roues, voir [38]. Les entrées de ce contrôleur sont l'orientation relative et l'écart latéral entre la voiture et le chemin de référence. Ces données sont déterminées grâce aux informations délivrées par le D-GPS. Le contrôle longitudinal est également assuré par un contrôleur flou, actionnant l'accélérateur, voir [84]. Les entrées de ce contrôleur sont l'accélération et l'erreur de vitesse. Le but de ce contrôleur est de s'assurer que la voiture circule à la vitesse désirée. Deux comportements-type sont prévus : l'un pour la ligne droite (avec une vitesse élevée et un angle de braquage faible), l'autre pour les virages (avec une vitesse faible et un angle de braquage élevé). L'architecture de la commande est structurée comme indiqué sur la figure 1.13. De plus, un protocole particulier est mis en place pour le changement de voies.

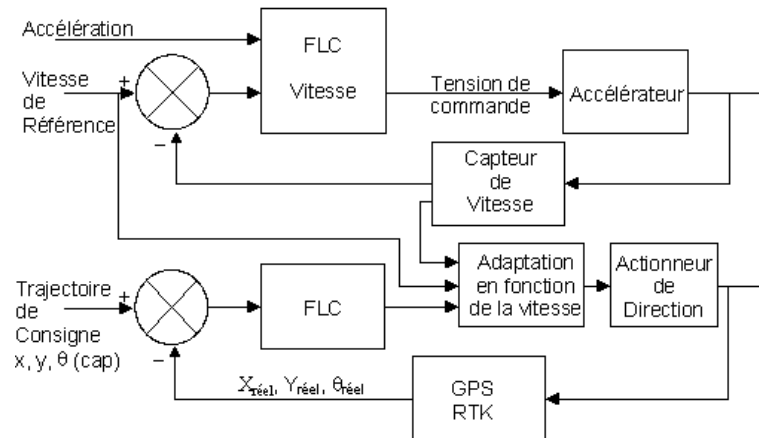


FIG. 1.13 – Schéma de la commande

Les coordonnées GPS des différents lieux de la zone d'évolution sont déjà enregistrées dans le véhicule. Ceci permet à l'utilisateur de n'entrer que les différentes rues que devra traverser l'engin pour établir la trajectoire de référence. La vitesse maximale en ligne droite est 65 km/h (vitesse maximale du Berlingo électrique). La vitesse en virage est fixée à moins de 6 km/h , pour des raisons de sécurité.

Durant les essais, effectués sur un circuit ayant toutes les caractéristiques d'un environnement urbain, le véhicule suit la trajectoire spécifiée à 55 km/h , avec une erreur latérale maximale de 22 cm en ligne droite. L'erreur entre les vitesses désirée (celle du véhicule précédent) et appliquée, est pour sa part inférieure à 1 km/h . La détection d'obstacles est faite sur une distance de sécurité de 10 m devant le véhicule. Si l'obstacle peut être évité, la vitesse est diminuée et l'orientation des roues modifiée, jusqu'à ce que l'obstacle soit complètement contourné, avant de reprendre un comportement classique. Sinon, le véhicule stoppe. Prochainement, le système satellitaire européen GALILEO devrait autoriser une plus grande précision de localisation.

L'avantage majeur de ces méthodes réside dans le fait qu'elles ne nécessitent pas

la connaissance de la dynamique du système étudié. Ainsi, tout développement mathématique complexe lié à une modélisation précise du système (où il faut tenir compte des différents paramètres dynamiques), de même que la synthèse du contrôleur, sont éliminés. Cette approche repose sur une très bonne expérience du comportement du robot, et permet dans ce cas d'obtenir des performances de régulation très satisfaisantes.

Néanmoins, ces méthodes présentent également des points faibles : d'une part, pour connaître précisément le comportement réel du système, de longues phases d'apprentissage et d'expérimentation doivent être réalisées. D'autre part, l'évaluation des performances et le comportement inculqué restent ceux donnés par l'homme lors de l'apprentissage. De ce fait, des dysfonctionnements ne sont pas à exclure (certains détails, ayant une importance non-négligeable, peuvent avoir été omis).

1.2.4.2 Commandes basées sur une modélisation du véhicule

A l'opposé, la modélisation mathématique d'un système tient compte de ces nombreux paramètres. Ensuite, les outils de l'automatique classique permettent de développer des lois de commande adaptées, dont la stabilité et les performances peuvent être éprouvées sans avoir recours à de multiples expérimentations. Finalement, les lois de commande générées par l'automatique classique ne sont pas limitées à un seul type de véhicule, mais sont applicables à d'autres classes d'engins. C'est pourquoi, la suite du manuscrit est consacrée aux approches basées sur une modélisation du système.

L'ensemble des commandes latérales présentées à la section 1.3 permettent de calculer l'angle à donner à l'actionneur de direction du véhicule pour que ce dernier suive un chemin de référence. Comme les modélisations couramment utilisées pour représenter le comportement latéral du véhicule sont fonction de sa vitesse longitudinale, il est nécessaire de prêter attention à celle-ci lors de la synthèse de la loi de commande latérale. Pour cela, soit la vitesse longitudinale est considérée comme un paramètre indépendant de la commande, soit elle est pré-estimée.

Dans le premier cas, la commande latérale est donc exprimée, entre autres, en fonction de la vitesse longitudinale, qui n'est qu'un paramètre de la commande parmi d'autres, comme dans [88], détaillé à la page 49.

Dans le second cas, il est considéré que le véhicule fonctionne dans une plage de vitesse donnée. Dès lors, il est possible de borner la vitesse, de modéliser le système autour de cette valeur, et ainsi de générer une commande adaptée à cette plage de fonctionnement. Ainsi, la commande obtenue est valable pour un voisinage de la vitesse de fonctionnement, comme par exemple dans [62], détaillé à la page 54.

Par conséquent, quelle que soit l'approche envisagée, les lois de commande latérale sont adressées indépendamment des lois de commande longitudinale. Par conséquent, les lois de commande latérale et longitudinale seront présentées ici dans 2 sections successives, respectivement les sections 1.3 et 1.4. L'objectif de commande latérale consiste à asservir chacun des véhicules sur le chemin de référence, en contrôlant l'actionneur de direction du véhicule. Celui de la commande longitudinale est d'imposer qu'un écart pré-défini demeure entre les véhicules, en contrôlant pour cela l'actionneur de vitesse du véhicule, laissé libre par la commande latérale.

1.3 Commande latérale d'un véhicule du convoi

Le positionnement des différents véhicules par rapport à la trajectoire de référence étant supposé réalisé par les systèmes de perception de l'environnement, la navigation autonome d'un véhicule peut être adressée. L'objectif général de celle-ci se résume au guidage du robot automatisé le long d'un chemin dit de référence.

Ce chemin peut être défini et représenté de différentes manières. Ainsi, le chemin de référence peut avoir été défini au préalable, par exemple durant un apprentissage en conduite manuelle. Ou bien, le chemin à suivre est déterminé en temps-réel, par exemple, sur la base de l'itinéraire d'un véhicule en amont. Dans ce dernier cas de figure, si une reconstruction de trajectoire est réalisée, alors la loi de commande appliquée pour le guidage latéral reste inchangée, l'objectif restant le suivi d'un chemin.

Classiquement, pour amener un système automatisé (dans le cas présent, un véhicule) à répondre à des objectifs fixés (ici le suivi de chemin), il est nécessaire de représenter le plus fidèlement possible le processus réel et ensuite, seulement, construire une loi de commande adaptée permettant d'obtenir les performances attendues.

Dans cette logique, différentes commandes latérales sont proposées se basant sur des modélisations de plus en plus élaborées, et reflétant de mieux en mieux le système réel. Ainsi, dans un premier temps, les lois de commande présentées se basent sur un modèle linéarisé du véhicule. Puis, dans un second temps, des modélisations non-linéaires sont utilisées, rendant la synthèse de commandes plus complexe.

1.3.1 Commandes basées sur un modèle linéarisé

La quasi-totalité des systèmes physiques peut être décrite comme étant des fonctions mathématiques faisant correspondre des réponses à des sollicitations. A partir de cette description mathématique, il est dès lors possible de synthétiser des lois de commande permettant au système réel d'atteindre les performances désirées par l'utilisateur. Cependant, la plupart des modélisations de processus réels, et en particulier celle des véhicules automobiles, sont non-linéaires, ce qui rend ardue la synthèse de la commande.

En partant du constat suivant : dans la plupart des applications mettant en jeu des véhicules, la plage de fonctionnement des voitures reste dans un proche voisinage d'une configuration donnée (par exemple, sur voies rapides, la vitesse des véhicules reste très élevée et l'angle de braquage des roues avant est maintenu autour d'une valeur nulle (faible courbure)), une approche simplifiant la synthèse des lois de commande consiste à linéariser la modélisation du véhicule autour de cette configuration. De cette manière, un modèle linéaire représentant le comportement du robot mobile dans un voisinage du point de fonctionnement choisi (en dehors de ce voisinage, le modèle linéarisé n'est plus valable) peut être utilisé pour générer une commande plus aisément.

1.3.1.1 Modélisation cinématique du véhicule

Dans ce paragraphe, seules des lois de commande basées sur des modélisations cinématiques sont abordées. Une telle modélisation se prête bien aux véhicules de dimension réduite, ne fonctionnant pas à vitesse élevée. En effet, les paramètres dynamiques n'ont alors qu'une infime incidence sur le comportement de ces véhicules, et il est alors possible de ne pas en tenir compte, ce qui permet notamment de ne pas compliquer la représentation du véhicule.

Commande linéaire P, PD, PID

Les approches suivantes sont basées sur des outils et commandes classiques de l'automatique linéaire, comme les contrôleurs P (Proportionnel), PI (Proportionnel Intégral), PD (Proportionnel Dérivé) et PID (Proportionnel Intégral Dérivé), visant à annuler les erreurs latérales en distance et en orientation du véhicule commandé.

Le projet ARGO, mené par les universités de Parme et de Pavie de 1997 à 2001, et présenté dans [17] et [18], a pour but d'augmenter la sécurité routière en contrôlant et supervisant les actions du conducteur, pour parvenir à long terme à assurer une conduite totalement automatique. Les fonctionnalités du système sont de trois types, selon l'autonomie du véhicule. En premier lieu, la conduite est faite normalement par un conducteur, qui est averti par un signal sonore ou lumineux en cas de danger potentiel. Le deuxième mode autorise le conducteur à rouler en condition normale, mais, en cas de danger, le système prend le contrôle du véhicule pour l'amener dans une situation sans danger. Enfin, le véhicule peut fonctionner sans conducteur : le système roule automatiquement, en suivant les voies de circulation ou le véhicule de devant, et détectant les éventuels obstacles sur le chemin (le changement de voies peut se faire automatiquement). Le guidage automatique du véhicule est présenté par la suite. Les spécifications fixées sont telles que les coûts doivent rester faibles, que les routes n'aient pas besoin d'infrastructures particulières, que tout véhicule extérieur au projet puisse être repéré sans capteur particulier ou amer.

Ainsi, le véhicule ARGO, illustré sur la photographie Fig. 1.14, doit être capable de garder une voie délimitée par des lignes, d'extraire la géométrie de la route, de localiser tout véhicule situé à l'avant et d'éventuels obstacles (dont les piétons). Pour cela, les informations reçues d'un traitement informatique des images acquises par stéréovision (caméras situées derrière le pare-brise) sont transmises au module de commande.

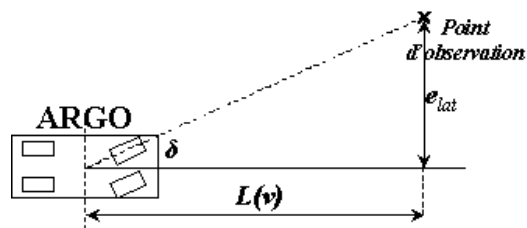
A l'origine, une commande latérale intuitive a été suggérée. Pour le suivi de lignes, deux opérations sont nécessaires. Tout d'abord, un point est défini à une distance L du système de vision. Cette distance est choisie de la sorte :

$$L = \begin{cases} L_{min} & \text{si } v < v_{min} \\ vt_l & \text{si } v_{min} < v < v_{max} \\ L_{max} & \text{si } v > v_{max} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{ll} v & : \quad \text{la vitesse} \\ t_l & : \quad \text{la constante de temps} \end{array} \quad (1.1)$$

En ce point, l'erreur latérale e_{lat} est calculée par le système de vision, voir la figure 1.15.



FIG. 1.14 – Le véhicule expérimental ARGO

FIG. 1.15 – Détermination de l'erreur latérale e_{lat}

Ensuite, cette erreur latérale e_{lat} est utilisée, au moyen d'un correcteur proportionnel, pour déterminer la commande à appliquer sur les roues avant :

$$\delta = K(v)e_{lat} \quad (1.2)$$

Le gain $K(v)$ est adaptable en fonction de la vitesse. Le schéma-bloc de cette commande latérale est représenté sur la figure 1.16.

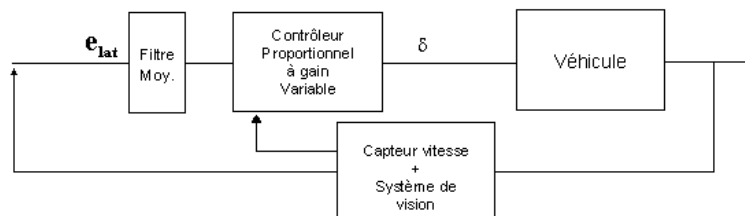


FIG. 1.16 – Commande latérale implantée sur le véhicule ARGO

Lorsqu'un véhicule est placé entre le système de vision et le point d'observation de l'erreur latérale e_{lat} , le véhicule "obstacle" est utilisé pour déterminer une erreur latérale équivalente à celle définie précédemment. Pour cela, la distance L' et l'erreur latérale e' entre le système de vision et le véhicule, sont évaluées par vision, et il en est déduit $e_{lat} = \frac{L}{L'}e'$. A partir de e_{lat} , la commande (1.2) est de nouveau utilisée pour obtenir le contrôle latéral. Les auteurs parlent alors de commande latérale en convoi.

Pour réaliser la conduite autonome, le véhicule expérimental ARGO est équipé de 2 caméras situées de part et d'autre de la partie supérieure du pare-brise (fréquence d'acquisition de 50 images par seconde). Ce système de stéréovision permet la détection de lignes et éventuellement (s'il y a lieu) de véhicules. Les différences relatives de cap, de vitesse et de distance entre le véhicule ARGO et le véhicule situé devant, sont déterminées par des algorithmes adaptés à ce type de capteur. De plus, un odomètre permet de relever la vitesse avec une précision de 9 cm/s. Afin de tester ce prototype, un essai a eu lieu du 1^{er} au 6 Juin 1998. Cette expérimentation, appelée "MilleMiglia in Automatica", consistait à parcourir deux mille kilomètres sous différentes conditions : trafic plus ou moins fluide, temps plus ou moins clément, différents revêtements de route, différents paysages (tunnel, montagne, ...) Ainsi, le véhicule ARGO a réalisé un circuit sur tout le nord de l'Italie, rencontrant toutes ces conditions. Les résultats sont satisfaisants : 94% de la conduite s'est faite en pilotage automatique total. Les portions sur lesquelles la voiture n'a pu être guidée automatiquement sont caractérisées soit par un flux de circulation élevé, soit par une route présentant des courbures ne permettant pas au système de vision de localiser les obstacles en amont et/ou conduisant à des incohérences de commande (le véhicule ayant tendance à couper les courbes).

Les travaux menés dans [89] traitent du suivi de poids-lourds avec remorques, utilisant une communication inter-véhicules. Le leader définit l'itinéraire que doit suivre son suiveur. A partir des mesures fournies sur chaque véhicule par les récepteurs RTK-GPS (toutes les 200 ms), et de la communication transmettant au suiveur la localisation et les commandes du véhicule de tête, le véhicule suiveur est capable de déterminer sa position par rapport à l'itinéraire défini par le leader. En exploitant cette donnée, la commande latérale proposée pour le suiveur est une commande proportionnelle dérivée (PD) :

$$\delta_F = \delta_L + c(v)(k_p \varepsilon + k_d \frac{d\varepsilon}{dt}) \quad (1.3)$$

δ_L et δ_F correspondent respectivement à l'angle de braquage du leader et du suiveur, ε est l'erreur latérale à annuler, k_p et k_d sont les gains du correcteur PD et le gain $c(v)$ est un paramètre de pondération dépendant de la vitesse. Dans l'équation (1.3), le terme δ_L apporte un élément de prédiction dans la loi de commande, tandis que le reste correspond à la régulation proprement dite. Aussi, le coefficient $c(v)$ permet de donner plus ou moins de poids à l'un des 2 éléments de la loi de commande : à faible vitesse, lorsque le véhicule effectue des manœuvres comme les demi-tours, $c(v)$ est choisi élevé de façon à donner du poids à la régulation latérale plutôt qu'à l'angle des roues du leader. A contrario, à vitesse élevée, $c(v)$ est choisi faible pour donner le poids, cette fois, à la partie prédictive de la loi de commande (1.3).

Cette loi de commande a été testée en simulation. Pour représenter de façon réaliste le comportement d'un poids lourd, le modèle utilisé dans ces simulations est un modèle dynamique. Les résultats de simulation, correspondant à différentes configurations de route (courbure, pente et inclinaison diverses), donnent des erreurs latérales n'excédant pas 1 *m* même lors de fortes variations de courbure, et ce quelle que soit la vitesse du véhicule.

Commandes optimales linéaires quadratiques

Pour asservir un véhicule le long d'un chemin, des techniques de commande linéaire optimale ont également été considérées. Pour un système donné, dont les équations sont connues, le problème de la commande optimale consiste à trouver la commande minimisant un critère donné.

Bien que les travaux menés dans [88], [87], [31] et [32], concernent la navigation autonome de véhicules agricoles, l'un des véhicules utilisés pour expérimenter les commandes proposées est une voiture électrique de golf, très similaire aux différents véhicules destinés au fonctionnement en milieu urbain. Les lois de commandes développées sont donc bien portables sur ce type de véhicule.

Les capteurs implantés sur ce véhicule sont un capteur RTK-GPS cadencé à la fréquence d'acquisition de 5 *Hz* et un odomètre mesurant l'angle des roues. Un filtre de Kalman étendu combiné à un observateur, nommé OKID (Observer/Kalman Identification Filter) permet de reconstruire l'état du véhicule à partir de ces mesures.

Un régulateur quadratique linéaire LQR a été développé pour la commande latérale. Les performances observées expérimentalement, cf. [88], montrent une erreur moyenne nulle et des écarts maximaux limités à 10 *cm*, aussi bien en ligne droite qu'en courbure. Les performances de la régulation sont donc du même ordre que la précision du système de localisation.

Dans [91], les mêmes développements sont repris et implantés sur un chasse-neige Bombardier MP, modélisé comme un unicycle, auquel sont intégrées les caractéristiques dynamiques du véhicule. Les erreurs latérales maximales observées sont de 50 *cm* en ligne droite et 1 *m* lors d'un virage à 180°. Les erreurs moyennes sont de l'ordre de 10 *cm*. Compte tenu des conditions expérimentales rencontrées (terrain enneigé et en pente), les performances sont acceptables, même si les erreurs maximales demeurent très importantes.

Enfin, dans le cadre du projet Praxitèle [66], une commande latérale développée dans [92] est également basée sur des commandes optimales. En mode Stop and Go, un contrôleur LQG (Linear Quadratic Gaussian) a été élaboré et a pour but de minimiser les erreurs latérale et angulaire. La commande optimale LQG est en fait composée de deux parties : un observateur de Kalman et une commande par retour d'état calculée à partir d'un contrôleur LQR ayant pour objectif d'annuler les erreurs de régulation latérale. La commande LQG permet d'adresser les 2 aspects (observation / commande) conjointement.

Des expérimentations ont été menées sur des sections à rayon de courbure égal à 200 m (les normes imposent que le rayon de courbure des autoroutes soit supérieur à 240 m). Le capteur utilisé pour localiser le véhicule est un système de vision. Les erreurs latérales maximales sont de l'ordre de 40 cm à 1 m/s et de 60 cm à 5 m/s. Les conditions d'expérimentation étant le suivi d'un véhicule en amont en mode Stop and Go sur voies rapides, les performances obtenues sont satisfaisantes : le véhicule ne quitte pas sa voie de circulation. Cette approche n'est cependant pas directement transférable sur des convois formés de plusieurs véhicules, car l'accumulation des erreurs engendrerait des sorties de route.

Imposition d'une orientation de référence dépendant de l'erreur latérale

Cette approche consiste à générer une orientation de référence que doit suivre le robot pour atteindre l'objectif fixé. Ce cap que doit prendre le véhicule est déterminé à partir du chemin de référence (tangente au point le plus proche) et de la position actuelle du véhicule.

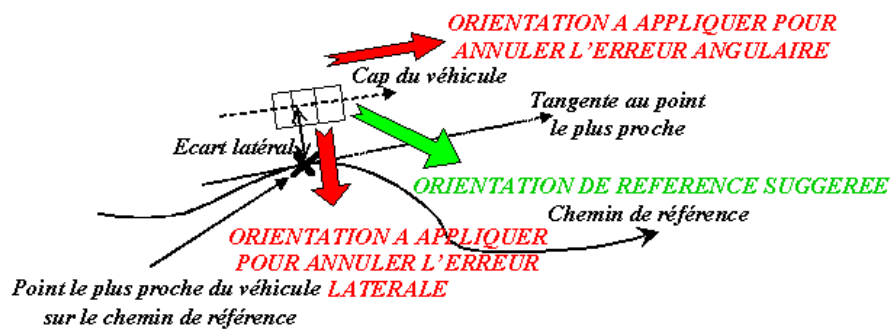


FIG. 1.17 – Introduction d'une orientation de référence

Le schéma Fig.1.17 détaille cette approche. Si la commande a pour seul objectif d'annuler l'écart latéral le plus vite possible, alors le véhicule peut être amené à braquer jusqu'à saturation. Si, au contraire, l'objectif est d'annuler l'erreur de cap, dans la plupart des cas, le robot mobile n'atteindra jamais le chemin de référence. Ces deux objectifs de commande ne semblent pas réalistes. A contrario, si ces derniers sont combinés au sein d'une consigne en orientation, alors la régulation du cap du véhicule sur cette consigne (à condition qu'elle soit correctement choisie) peut permettre à ce dernier de rejoindre le chemin de référence progressivement (et notamment, sans saturation sur la commande). La construction généralement proposée pour cette consigne de cap est une combinaison linéaire de l'erreur latérale du véhicule et de la tangente du chemin de référence au point le plus proche. L'objectif de la loi de commande est alors d'amener le véhicule à respecter cette consigne, et non plus d'annuler à la fois les erreurs latérale et angulaire. Ce nouvel objectif permet de mieux gérer les trajectoires effectivement suivies par le robot.

Une telle approche est proposée dans [7] pour la commande latérale d'un robot mo-

bile qui est dans ce cas une tondeuse. La consigne de cap θ_r , illustrée sur la figure 1.18, est donnée par :

$$\theta_r = \arg(\vec{t} + k\vec{n}) \quad (1.4)$$

où $\vec{t}$ est la tangente du chemin au point le plus proche, $\vec{n}$ est le vecteur d'erreur latérale, (ces deux vecteurs sont donc perpendiculaires), et le gain k permet de spécifier une convergence plus ou moins rapide (plus k est grand, plus de poids est donné à l'écart latéral dans l'objectif de régulation, et donc plus le robot va être conduit à converger rapidement vers la trajectoire de référence). Un contrôleur PID est alors utilisé pour réguler le cap du véhicule sur cette consigne de cap θ_r , et ainsi réaliser le suivi de chemin.

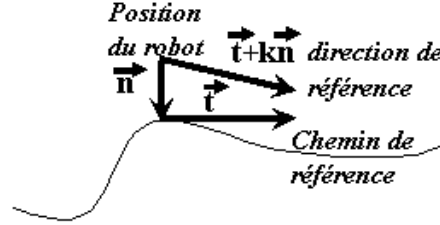


FIG. 1.18 – Détermination de l'orientation de référence

Les capteurs implantés sur le véhicule expérimental sont des encodeurs, un gyromètre et un capteur GPS dont la précision est variable entre 20 *cm* et 1 *m*. Ces données sont fusionnées au moyen d'un filtre de Kalman, et permettent une localisation du véhicule avec une précision de 20 *cm*. Les performances de la régulation dans des conditions réalistes pour un robot tondeuse, c'est-à-dire sur un sol naturel ondulé, sont du même ordre de grandeur que la précision du système de localisation, quelle que soit la courbure du chemin de référence, ce qui apparaît globalement satisfaisant pour l'application considérée.

Exactement la même approche est proposée dans [96] pour la commande latérale d'un véhicule à chenilles : le cap du véhicule est également régulé sur la consigne de cap (1.4), combinaison linéaire pondérée entre les erreurs latérale et angulaire. L'asservissement est réalisé cette fois uniquement par un contrôleur Proportionnel.

Le système de localisation du véhicule à chenilles est constitué par un capteur CP-DGPS et un gyroscope, cadencés respectivement à 1 *Hz* et 10 *Hz*. Un filtre de Kalman étendu est alors utilisé pour disposer d'une information de localisation à la fréquence de 10 *Hz*, et permet aussi de prendre en compte les éventuelles latences du capteur CP-DGPS. Une interface homme/machine déportée (communiquant avec le véhicule par liaison radio) permet à l'utilisateur de spécifier, d'une part la trajectoire de référence (l'utilisateur entre un ensemble de coordonnées, qui sont ensuite liées par des B-splines), et d'autre part la vitesse de parcours sur cette trajectoire. Les différents tests effectués présentent une erreur moyenne inférieure à 3 *cm* en ligne droite, proche de la précision capteur, ce qui est là encore satisfaisant pour une évolution sur un terrain accidenté. De plus, ces performances sont répétables : sur quatre essais identiques, les

écarts maximaux sont de l'ordre de 1 *cm*. Aucun résultat, par contre, n'est présenté pour le cas de suivi de trajectoire courbe.

Pour conclure, il faut noter que cette approche de commande requiert une phase d'apprentissage : plusieurs essais expérimentaux sont nécessaires pour définir la consigne de cap (et surtout la valeur de la pondération k), sans avoir au final la garantie que celle-ci assure dans tous les cas des performances optimales. De plus, la portabilité de ce type de commande sur un autre robot nécessite une nouvelle phase d'apprentissage.

1.3.1.2 Modélisation cinématique intégrant des aspects dynamiques ou modélisation dynamique du véhicule

Pour certaines applications, il peut être nécessaire de prendre en compte les paramètres dynamiques des véhicules. C'est particulièrement vrai lorsque des véhicules de grandes dimensions sont considérés, comme par exemple des poids lourds [4], des autobus [8], ou des voitures de tourisme [20],... Dans ce cas, il peut être essentiel de tenir compte du contact roues/sol, des actionneurs sur le moteur,...

Pour prendre en considération ces phénomènes, le plus naturel serait de se tourner vers des modélisations dynamiques de véhicules, comme dans [62]. Cependant, un tel type de modélisation requiert une identification de très nombreux paramètres souvent ardue, voire impossible. Une alternative pour tenir compte de ces aspects, consiste à ne considérer que des modèles dynamiques partiels, ne décrivant que les aspects dynamiques prépondérants dans l'application considérée. Généralement, ces quelques aspects dynamiques sont greffés sur un modèle cinématique classique (modèle bicyclette ou unicycle), comme dans [111]. La complexité limitée de ces modèles permet alors d'adresser beaucoup plus facilement la synthèse des lois de commande.

Commande linéaire P, PD, PID

Dans [20], le comportement latéral d'une voiture de tourisme est décrit par un modèle bicyclette complété pour tenir compte de la masse, de la vitesse longitudinale et de l'inertie du véhicule, ainsi que des conditions de contact des pneus sur le sol. Ce modèle est ensuite linéarisé de façon à obtenir une fonction de transfert entre l'erreur latérale $E(p)$ et la direction de la roue avant $\delta(p)$.

Un contrôleur par placement de pôles est alors synthétisé et est comparé à un contrôleur PID sur un véhicule réel (se localisant via un câble intégré à la route). Les deux contrôleurs offrent des résultats comparables : les expérimentations affichent une performance latérale de l'ordre de 10 *cm* pour des vitesses situées entre 20 *km/h* et 40 *km/h*, quelle que soit la commande utilisée. Cependant, le confort de conduite apparaît meilleur avec l'approche par placement de pôle (moins d'à-coups dans la commande). Enfin, les erreurs de régulation proviennent essentiellement d'incertitudes sur les paramètres dynamiques modélisés.

Un convoi de poids-lourds (Navistar), se positionnant par D-GPS, est abordé dans [4]. La modélisation dynamique proposée permet de tenir compte des performances du

moteur (accélérateur et frein) et du contact au sol. Les commandes latérale et longitudinale sont classiquement abordées indépendamment. Pour ce qui est de la commande latérale, des contrôleurs PD et PD-DD sont proposés.

La commande d'un convoi de poids lourds est également adressée dans [108]. Le véhicule leader est conduit manuellement, les autres véhicules s'asservissent sur le véhicule précédent. Deux modélisations dynamiques très poussées permettent de représenter les dynamiques latérales et longitudinales : ce sont des véritables modèles 3D dynamiques, permettant de prendre en compte tous les aspects mécaniques (moteur, boîte de vitesse, embrayage, cardan,...), et le contact avec le sol via la modélisation des roues (inertie des roues, suspension, direction, pneus,...).

Les commandes latérale et longitudinale sont considérées indépendamment l'une de l'autre. Pour la commande latérale, le modèle dynamique est linéarisé tangent. Ceci conduit à deux fonctions de transfert reliant d'une part la commande en direction à l'erreur latérale en distance $y_{act} - y_{ref}$ et d'autre part la commande en direction à l'erreur angulaire $\psi_{act} - \psi_{ref}$. Sur la base de ces deux fonctions de transfert, deux contrôleurs de type PD (Proportionnel Dérivé) sont synthétisées pour réguler ces 2 erreurs, voir figure 1.19. Les 2 commandes δ' et δ_{yaw} ainsi obtenues sont ensuite combinées linéairement, avec une pondération dépendant de l'état du véhicule, pour obtenir la commande en direction finalement appliquée sur le véhicule, voir aussi figure 1.19. Le principe des commandes présentées à la page 50 se retrouve, sauf que les deux objectifs de régulation ne sont plus combinés au niveau de la consigne, mais au niveau de la commande. La simulation d'un changement de ligne donne des erreurs latérales inférieures à 20 cm et à 2° en cap.

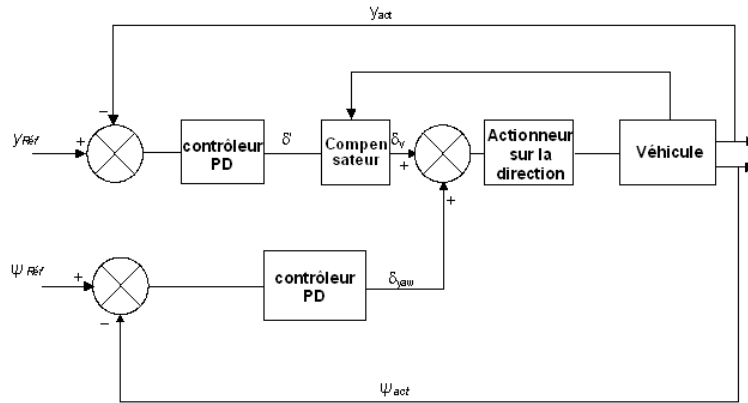


FIG. 1.19 – Schéma de commande latérale

Commande d'un point en avance

Une autre approche consiste à anticiper les erreurs par l'observation de celles-ci en amont du robot. Ceci est aisément réalisable avec les systèmes de perception par vision qui peuvent fournir directement une telle erreur. Ces techniques avaient déjà été

mentionnées au début de cette section, lors de l'étude des commandes reposant sur des modèles cinématiques (voir page 46). La mesure de l'erreur à une distance L dite "lookahead" permet de compenser des retards introduits par le traitement des mesures et les délais dus aux actionneurs physiques du robot. La commande est dite anticipative.

Dans [62], [63], [118], [73], le comportement latéral d'un véhicule de tourisme est représenté par un modèle dynamique non-linéaire, prenant en compte le contact sol-roues, les pneumatiques, l'actionneur de direction des roues, l'inertie, ... Ce modèle est ensuite linéarisé en supposant l'angle de direction des roues faible et le modèle de pneumatique linéaire. Il est finalement présenté sous la forme d'une représentation d'état.

Le système de localisation du véhicule est supposé constitué par un capteur visuel, permettant d'obtenir l'écart latéral y_L et angulaire ε_L à une distance d'observation L devant le véhicule (L correspond à la distance d'observation de la caméra), et d'un gyromètre pour obtenir une mesure de la vitesse de cap. Avec un tel équipement, l'intégralité du vecteur d'état peut être reconstruit au moyen d'un observateur. Plusieurs lois de commande latérales ont alors été envisagées :

- *un contrôleur de type "Lead-Lag"*. La représentation d'état du véhicule est d'abord convertie en une fonction de transfert. Les gains, pôles et zéros de la fonction de transfert du correcteur sont alors déterminés pour offrir les meilleures performances possibles en régulation. Malheureusement, les caractéristiques du contrôleur sont calculées pour une modélisation donnée (pour une observation à une distance L avec un retard donné, et à une vitesse v précise). Comme la modélisation du véhicule est sujette à varier, entre autres, en fonction de la vitesse longitudinale du véhicule, le contrôleur peut très vite ne plus être adapté à la situation courante du véhicule : si la vitesse augmente, des problèmes de stabilité peuvent apparaître.
- *Un retour d'état classique de type $u = Kx$* . Un tel contrôleur est également très sensible aux erreurs de modélisation. Il est là encore nécessaire de définir préalablement la vitesse longitudinale du véhicule et la distance d'observation L .
- *Une linéarisation entrée/sortie*. Cette approche est généralement utilisée pour linéariser des systèmes non-linéaires, voir section 1.3.2. Dans le cas présent, le modèle du véhicule a déjà été linéarisé tangent. La linéarisation entrée/sortie est ici proposée pour pouvoir prendre en compte explicitement la vitesse du véhicule au sein de la loi de retour d'état linéaire.

Ces lois de commande ont été réglées avec le souci de ne pas conduire à un jerk (dérivée de l'accélération) latéral trop élevé, afin d'assurer le confort des passagers, et d'assurer une erreur maximale inférieure à y_{Lmax} en cas de variation brutale de la courbure de référence.

Le véhicule expérimental, sur lequel est implantée la commande, est une voiture de tourisme Honda Accord LX. Le capteur de vision utilisé acquiert 30 images par seconde. Celles-ci sont traitées pour détecter les voies de circulation, qui sont alors suivies grâce à la commande latérale. Le véhicule est également équipé d'un gyromètre, comme mentionné ci-dessus. Enfin, les expérimentations ont été réalisées à 80 km/h.

Les contrôleurs “Lead Lag” et “retour d’état” fournissent des performances latérales satisfaisantes lorsque la vitesse réelle du véhicule est celle utilisée pour la synthèse de la loi de commande : l’erreur latérale reste inférieure à 60 *cm* dans le cas du contrôleur “Lead Lag”. Les performances sont un peu moindres avec le contrôleur “retour d’état”, où des erreurs supérieures à 1 *m* peuvent parfois être observées, notamment lors des changements de courbure. Ces performances sont cependant dégradées, comme attendu, dès que la vitesse réelle du véhicule varie (qu’elle soit plus élevée ou plus faible que celle utilisée dans le calcul du contrôleur). Les performances du contrôleur “linéarisation entrée/sortie” sont du même ordre de grandeur (l’erreur latérale reste inférieure à 1 *m*), mais restent cette fois identiques, quelle que soit la vitesse réelle du véhicule, puisque celle-ci est explicitement prise en compte dans ce contrôleur.

Enfin, les performances de l’ensemble de ces correcteurs peuvent être améliorées en introduisant une anticipation : les erreurs de régulation étant évaluées à une distance L en amont du véhicule, il est également possible de calculer la commande qu’il conviendrait d’appliquer au véhicule s’il se trouvait à une distance L en amont de sa position actuelle. Cette information additionnelle, appelée “terme Feedforward”, permet d’apporter de l’anticipation au sein des correcteurs précédents, et ainsi d’améliorer leurs performances, tout particulièrement lors des variations de courbure. Les expérimentations montrent que l’introduction du terme “Feedforward” apporte un gain de performances d’un facteur 2 : l’utilisation du terme “Feedforward” au sein des correcteurs “Lead Lag” et “Linéarisation entrée/sortie” permet de ramener les erreurs de régulation latérale à respectivement 30 *cm* et 50 *cm*.

La même approche est utilisée dans le projet DAVINCI (commande d’un convoi de véhicules par caméras déportées observant la scène, présenté à la page 39).

Le chemin, sur lequel doivent s’asservir les véhicules, est exprimé mathématiquement par une fonction à base de sinus [112], ou des splines de Bezier [111]. Ces dernières conduisent à un lissage du chemin plus adapté au changement de voies, et par leurs convexités, elles permettent de simplifier également la détection d’obstacles. Le système de vision déporté (LPS : Local Positioning System, voir page 39) permet d’évaluer l’erreur en amont des véhicules. La commande latérale consiste alors en un contrôleur PID, régulant cette erreur en amont, et développé sur la base d’un modèle dynamique de véhicule prenant notamment en compte le contact roue/sol (modélisation des pneus, . . .)

Les simulations montrent l’intérêt de réguler une erreur en amont (plus grande stabilité du système, plus grande régularité des commandes), mais aussi l’importance cruciale de la valeur donnée à la distance “lookahead” L pour que le comportement des véhicules ne présente ni retard ni avance. Ces conclusions ont été validées expérimentalement sur le véhicule DAVICAR (figure 1.12, page 40) pour le cas d’un changement de voies (modélisé par des splines de Bézier) à 5.5 et 8.3 *m/s*.

Les travaux présentés dans [97] reposent également sur la même idée. L’objectif est d’asservir un véhicule de tourisme sur un chemin de référence. La représentation du véhicule est basée sur un modèle bicyclette auquel a été ajoutée une modélisation linéaire des pneumatiques. Les grandeurs d’entrée sont l’angle de braquage des roues avant et les couples de freinage sur chaque roue.

Les grandeurs régulées sont les erreurs latérale et angulaire évaluées à une distance L en amont du véhicule. Une force virtuelle F , appliquée elle-aussi à une distance L en amont du véhicule, est alors utilisée comme intermédiaire de calcul : l'intensité à donner à cette force est tout d'abord calculée par un correcteur de type Proportionnel, puis les valeurs des véritables variables d'entrée (angle de braquage et couple de freinage) sont déduites de F .

Le véhicule expérimental est une Corvette. Son système de localisation repose sur un filtre de Kalman fusionnant les mesures issues d'un capteur D-GPS et des capteurs proprioceptifs. La précision globale du système de localisation est inférieure à 10 *cm*.

Les expérimentations, réalisées à 11 *m/s*, montrent que de façon répétable, l'erreur latérale est inférieure à 10 *cm* dans des sections à faible courbure, mais peut atteindre 70 *cm* dans les sections à forte variation de courbure, voir [98]. Ce dernier résultat n'est pas surprenant, car les variations de la courbure ne sont pas prises en compte dans la loi de commande. Comme dans l'application considérée, la largeur de la route est telle qu'une erreur latérale inférieure à 2 *m* demeure suffisante, ces performances sont acceptables. Cependant, la précision du système de localisation devrait permettre de meilleurs résultats en courbe.

Commandes robustes

Quel que soit le système considéré et quelle que soit la modélisation proposée, des différences plus ou moins grandes existent nécessairement entre le système réel et son modèle mathématique. Des commandes dites robustes ont été proposées en Automatique, afin de garantir la stabilité des asservissements en dépit des variations des paramètres de modélisation.

Une commande robuste couramment utilisée est la commande optimale H_∞ . Elle consiste à construire le gain K d'une loi de retour d'état $u = Kx$ pour minimiser le signal d'erreur d'asservissement dans le domaine fréquentiel.

Cette approche a été suivie dans [3]. Un modèle de véhicule très précis a tout d'abord été recherché par une identification brute. Le modèle obtenu étant d'ordre très élevé, des techniques de réduction d'ordre ont ensuite été utilisées pour simplifier le modèle en un ordre 3. Finalement, une loi de commande latérale a été synthétisée par approche H_∞ pour garantir une robustesse aux dynamiques qui avaient été négligées par la réduction d'ordre et de bonnes marges de stabilité à l'asservissement.

Le dispositif expérimental est un petit véhicule radio-commandé (modèle réduit d'une voiture réelle à l'échelle 1/10^{ième}), équipé d'une caméra. Les signaux vidéo sont transmis par liaison radio à un PC distant, qui calcule, à partir des informations reçues, la commande à appliquer et la retourne au véhicule. L'objectif est de maintenir le véhicule miniature sur une route de 30 *cm* de large.

Cet objectif est correctement atteint lors des expérimentations : l'écart latéral maximum est inférieur à 15 *cm*, le véhicule reste donc sur la chaussée. Le caractère robuste de la commande H_∞ a donc permis de bien prendre en charge les imperfections de modélisation amenées par la réduction d'ordre, de même que les changements de cour-

bure de la route à suivre.

1.3.2 Rappels sur les techniques de commande non-linéaires

Les modèles mathématiques comportent très généralement de nombreuses non-linéarités, dès le moment où ceux-ci décrivent le comportement des systèmes avec précision sur une large plage de fonctionnement. C'est bien sûr le cas pour les modèles décrivant le comportement des véhicules.

Dans la section 1.3.1, ces modèles avaient été linéarisés autour d'un point de fonctionnement, ce qui avait permis ensuite de développer des lois de commande latérales à partir des outils proposés par l'Automatique linéaire. Cependant, la linéarisation tangente d'un système ne représente correctement le système que dans le voisinage du point où a été effectuée la linéarisation. À mesure que l'état du système s'éloigne de ce voisinage, le comportement donné par le modèle linéarisé tangent peut diverger assez significativement du comportement réel du système. En conséquence, les lois de commande construites sur la base du modèle linéarisé tangent peuvent ne plus du tout répondre aux attentes, et même conduire à une instabilité.

Aussi, si le système est appelé à évoluer sur une large plage de fonctionnement et/ou si une très haute précision est attendue, alors les lois de commande doivent être construites directement à partir du modèle non-linéaire décrivant le comportement du système. Les principaux outils proposés par l'Automatique non-linéaire sont tout d'abord rappelés dans cette section, puis leur utilisation possible pour la commande latérale des véhicules est présentée à la section 1.3.3.

1.3.2.1 Séparation des commandes latérale et longitudinale

L'expression générale d'un système non-linéaire est donnée par :

$$\dot{X} = f(X) + g(X, U) \quad (1.5)$$

avec X et U les vecteurs d'état et de commande, et f et g deux fonctions non-linéaires.

Dans le cas des modèles cinématiques de véhicules, le vecteur de commande U peut être décomposé en deux sous-vecteurs u_v et u_δ , où u_v désigne les commandes longitudinales et u_δ les commandes latérales. Cette décomposition du vecteur de commande induit une décomposition de la fonction g avec une structure très particulière, présentée dans l'équation (1.6) :

$$\dot{X} = f(X) + g_v(X, u_v) + g_\delta(X, u_v, u_\delta) \quad (1.6)$$

Lorsque l'intérêt se porte exclusivement sur la régulation latérale, comme c'est le cas dans cette section 1.3, le vecteur de commande u_v devient un simple paramètre, pouvant éventuellement varier au cours du temps. En conséquence, le système (1.6) peut être ré-écrit comme :

$$\dot{X} = f(X) + g_{v,u_v}(X) + g_{\delta,u_v}(X, u_\delta) \quad (1.7)$$

ou encore :

$$\dot{X} = (f + g_{v,u_v})(X) + g_{\delta,u_v}(X, u_\delta) \quad (1.8)$$

Le comportement latéral du véhicule peut donc être modélisé comme un système non-linéaire, décrit par les fonctions $f + g_{v,u_v}$ et g_{δ,u_v} . La commande latérale peut donc être étudiée indépendamment de la commande longitudinale. Cette propriété reste vraie pour de nombreux modèles dynamiques.

1.3.2.2 Synthèse de lois de commande non-linéaires

En Automatique non-linéaire, deux approches sont principalement utilisées pour adresser la commande d'un système (1.5) : soit une fonction de Lyapunov est utilisée, soit une linéarisation de manière exacte du système (1.5) est recherchée. Ces deux approches sont brièvement rappelées ci-dessous.

Approche reposant sur des fonctions de Lyapunov

Avec cette approche, aucune transformation du système (1.5) n'est recherchée. La commande de ce système est adressée directement, en s'appuyant pour cela sur la théorie de la stabilité de Lyapunov.

Les théorèmes de Lyapunov, présentés en détail par exemple dans [129], permettent d'étudier la stabilité d'un système non-linéaire autonome :

$$\dot{X} = f(X) \quad (1.9)$$

Deux degrés de stabilité sont généralement considérés :

- la stabilité au sens simple, qui traduit que les solutions du système (1.9) peuvent être confinées aussi proche que voulue d'une configuration d'équilibre X_e , en choisissant pour cela une condition initiale X_0 suffisamment proche de X_e ,
- la stabilité asymptotique, qui traduit que les solutions du système (1.9) sont non seulement stables, mais de surcroît convergent asymptotiquement vers X_e lorsque la condition initiale X_0 est choisie suffisamment proche de X_e .

Pour établir la stabilité d'une configuration d'équilibre X_e , les théorèmes de Lyapunov s'appuient sur une fonction auxiliaire généralement notée $V(X)$, et appelée fonction de Lyapunov. Cette fonction doit nécessairement être localement positive définie. Les théorèmes de Lyapunov s'énoncent alors comme suit :

- si la dérivée de $V(X)$ le long des solutions du système (1.9) est négative, alors la configuration d'équilibre X_e est stable,
- si cette dérivée est localement négative définie, alors la configuration d'équilibre X_e est non seulement stable, mais aussi asymptotiquement stable.

Prouver que la dérivée de $V(X)$ est localement négative définie est en général particulièrement délicat. Aussi, pour établir qu'une configuration d'équilibre X_e est asymptotiquement stable, on procède très souvent en 2 étapes : dans un premier temps il est prouvé que la configuration X_e est un équilibre stable, puis il est établi que la seule solution du système (1.9) pour laquelle la dérivée de $V(X)$ est constamment nulle est l'équilibre X_e . Le théorème de LaSalle permet alors d'affirmer que X_e est un équilibre asymptotiquement stable.

Cet ensemble de résultats, qui permet de caractériser la stabilité des systèmes autonomes (1.9), peut aussi être exploité pour synthétiser des lois de retour d'état non-linéaires $U(X)$ pour les systèmes non-linéaires commandés (1.5). Pour cela, trois étapes sont effectuées :

- si l'objectif est de faire converger l'état du système (1.5) vers la configuration d'équilibre X_e , alors une fonction $V(X)$ localement positive définie autour de X_e est choisie,
 - $V(X)$ est ensuite dérivée. L'expression de cette dérivée dépend bien sûr de X et de $\dot{X}$, ou encore de X et de U en explicitant $\dot{X}$ avec l'équation du système (1.5),
 - il est vérifié ensuite s'il est possible de construire une fonction non-linéaire $U(X)$ telle que $\dot{V}(X, U(X))$ soit négative.
 - * s'il est possible de construire une telle fonction $U(X)$, alors les théorèmes de Lyapunov assurent alors que X_e est une configuration d'équilibre stable pour le système $\dot{X} = f(X, U(X))$, qui est bien un système autonome puisque la variable de commande a été exprimée en fonction de l'état.
- Le théorème de LaSalle permet alors de déterminer si X_e est une configuration, non seulement stable, mais aussi asymptotiquement stable. Si tel est le cas, alors la loi de retour non-linéaire $U(X)$ qui a été proposée répond à l'objectif initial : la loi de commande $U(X)$ assure que l'état X du système converge vers X_e .
- * si le théorème de LaSalle établit que X_e n'est pas asymptotiquement stable, ou s'il n'est possible de construire une fonction non-linéaire $U(X)$ telle que la dérivée de $V(X)$ soit négative, alors il faut reprendre l'ensemble de l'étude avec une autre fonction $V(X)$ localement positive définie autour de X_e .

La synthèse de lois de commande à partir de fonctions de Lyapunov s'appuie sur des outils mathématiques relativement simples, réclame en général peu de calcul, mais en contre-partie requiert de l'intuition et de l'expérience pour choisir une fonction de Lyapunov qui peut conduire à une loi de commande pertinente.

Approche linéarisation exacte

L'approche linéarisation exacte, contrairement à l'approche précédente, consiste à rechercher une transformation exacte (c'est-à-dire une transformation d'état et de commande inversible) permettant de ré-écrire le système non-linéaire (1.5) comme un système linéaire, de façon à pouvoir alors exploiter l'ensemble des outils de l'Automatique linéaire pour construire et régler les lois de commande.

Une présentation générale des techniques de linéarisation exacte peut être trouvée dans [55]. Pour le cas particulier des robots mobiles, il a été établi (par exemple dans [103]), que les modèles cinématiques de tels systèmes ne peuvent pas être linéarisés de manière exacte, mais peuvent cependant être convertis de manière exacte en systèmes chaînés qui présentent une large sous-structure linéaire.

L'expression générale d'un système chaîné de dimension n avec 2 entrées m_1 et m_2 ,

s'écrit :

$$\begin{aligned}
 \dot{a}_1 &= m_1 \\
 \dot{a}_2 &= a_3 m_1 \\
 \dot{a}_3 &= a_4 m_1 \\
 &\dots \\
 \dot{a}_{n-1} &= a_n m_1 \\
 \dot{a}_n &= m_2
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

Pour révéler la sous-structure linéaire du système (1.10), il suffit de considérer un changement d'échelle des temps. Pour cela, la notation suivante est introduite :

$$a'_i = \frac{d}{da_1} a_i \quad \text{pour } 1 \leq i \leq n \tag{1.11}$$

a'_i est la dérivée de a_i par rapport à la variable a_1 . Si, dans l'expression (1.10), les dérivées temporelles sont remplacées par des dérivées par rapport à a_1 , les $n-1$ dernières lignes du système chaîné se ré-expriment bien comme un système linéaire :

$$\begin{pmatrix} a'_2 \\ a'_3 \\ \dots \\ a'_{n-1} \\ a'_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_{n-1} \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} m_3 \quad \text{avec } m_3 = \frac{m_2}{m_1} \tag{1.12}$$

m_3 représente une nouvelle commande virtuelle, issue des commandes m_1 et m_2 .

Les systèmes chaînés sont particulièrement bien adaptés pour étudier la commande des robots mobiles, car il est très généralement possible de choisir la variable a_1 comme la distance parcourue par le robot le long d'un chemin de référence. Cette propriété est particulièrement avantageuse car :

- le comportement latéral du robot, par rapport au chemin de référence, peut alors être exprimé exclusivement au moyen des variables $a_2, \dots, a_n$. Par conséquent, au vu de (1.12), les lois de commande permettant d'assurer le guidage du robot le long du chemin de référence peuvent être construites et réglées très facilement : dans un premier temps, la loi de commande virtuelle m_3 est conçue au moyen des outils offerts par l'Automatique linéaire, puis, en inversant les transformations d'état et de commande, la loi de commande non-linéaire à appliquer concrètement sur les actionneurs du robot est déduite.
- les performances des lois de commande latérales peuvent aisément être rendues indépendantes du comportement longitudinal du robot.

En effet, la variable spécifiant l'évolution du système linéaire (1.12) n'étant pas le temps, comme usuellement, mais la distance a_1 parcourue le long du chemin de référence, le réglage des gains de la loi de commande linéaire m_3 permet de spécifier, non pas un temps de réponse, mais une distance de réponse. Par conséquent, pour un réglage donné des gains de commande, la trajectoire du robot sera identique, quelle que soit la vitesse de ce dernier, et même si celle-ci est variable.

Cette indépendance entre les performances latérale et longitudinale est particulièrement attractive dans l'optique de la conduite en convoi de véhicules, car les performances de suivi de trajectoire pourront être identiques pour tous les membres du convoi, quelles que soient les vitesses imposées par la loi de commande longitudinale à chaque élément du convoi, au vu des inter-distances entre les véhicules.

Les techniques de platitude reposent sur le même principe que l'approche linéarisation exacte, mais permettent d'adresser un ensemble plus large de systèmes non-linéaires. La définition d'un système plat est la suivante :

Un système non-linéaire (1.5), avec $X \in \mathbf{R}^n$, $U \in \mathbf{R}^m$ est dit plat, s'il existe 2 entiers (α, β) et m variables différentiellement indépendantes $Z = (z_1, \dots, z_m) = \psi(X, U, \dot{U}, \dots, U^{(n-1)})$, tels que $X = \psi_X(Z, \dot{Z}, \dots, Z^{(\alpha)})$ et $U = \psi_U(Z, \dot{Z}, \dots, Z^{(\beta)})$.

Z est alors appelée sortie plate ou sortie linéarisante.

Lorsqu'un système non-linéaire (1.5) est plat, et c'est le cas pour la très grande majorité des modèles cinématiques de robots mobiles, alors la planification et le suivi de trajectoires peuvent être adressés simultanément, et résolus d'une manière simple et directe. En effet, il suffit de procéder comme suit :

- les données d'entrée d'un problème de planification sont généralement l'état initial X_0 et l'état final X_f désiré pour le système. La première étape consiste, à partir de ces données X_0 et X_f , à calculer les valeurs initiales et finales des sorties plates et de leurs dérivées.
- l'étape suivante consiste à choisir une trajectoire quelconque liant les valeurs initiales et finales des sorties plates, et respectant les conditions aux limites posées sur la dérivée de ces variables. Le choix de cette trajectoire $Z(t)$ est complètement libre. Quelle que soit celle-ci, la trajectoire correspondante dans l'espace d'état du système peut être évaluée au moyen de la fonction ψ_X , et correspond toujours à une trajectoire admissible pour le système.
- la commande boucle ouverte $U(t)$ permettant d'exécuter cette trajectoire s'obtient là encore de manière directe, en reportant simplement la trajectoire choisie $Z(t)$ dans la fonction ψ_U .

Si pour des raisons de robustesse, il est préférable d'envisager une commande boucle fermée $U(X)$, son obtention ne pose cette fois encore aucune difficulté, car le système dynamique formé par les sorties plates consiste simplement en des chaînes d'intégrateurs.

L'attrait des techniques de commande reposant sur la platitude dépend essentiellement du sens physique présenté par les sorties plates. Lorsque celles-ci sont des variables abstraites, alors une trajectoire a priori naturelle $Z(t)$ peut conduire dans l'espace d'état à une trajectoire $X(t)$ qui ne présente aucun bon sens physique. Dans ce cas, les techniques de platitude peuvent être impossibles à mettre en œuvre. A l'inverse, si les sorties plates présentent un sens physique, alors il est cette fois très vraisemblable qu'une trajectoire naturelle $Z(t)$ pour ces variables conduise à une trajectoire également naturelle pour les grandeurs physiques contenues dans le vecteur d'état X du système. Dans

ce cas, les techniques de platitude présentent un intérêt évident pour commander ces systèmes.

Une large part des modèles cinématiques de robots mobiles sont plats. Lorsque les sorties plates sont directement les coordonnées d'un point fixe du robot, les techniques de platitude sont particulièrement intéressantes. A l'inverse, lorsqu'elles correspondent aux coordonnées d'un point mobile dans le repère du robot, la synthèse de lois de commande par cette approche est cette fois beaucoup plus difficile.

1.3.2.3 Stabilisation des véhicules sur une configuration fixe

Les techniques de commande non-linéaire présentées ci-dessus offrent des solutions très pertinentes pour commander les robots mobiles, à la condition toutefois qu'il ne soit pas demandé à ceux-ci de s'arrêter. En effet, ces lois de commande deviennent toutes singulières si la vitesse du robot s'annule.

Ces singularités découlent d'une propriété intrinsèque de ces systèmes : sous l'hypothèse de roulement sous glissement, les robots mobiles sont des systèmes non-holonomes, c'est-à-dire que certaines directions d'évolution ne sont pas instantanément possibles. Dans le cas des robots mobiles, ceux-ci ne peuvent pas instantanément évoluer latéralement, il leur est nécessaire de réaliser un mouvement en "créneaux". Or, il a été prouvé (théorème de Brockett, [16]) que les systèmes non-holonomes ne peuvent pas être stabilisés au moyen de lois de retour d'état continues, fussent-elles non-linéaires. Par conséquent, les techniques de commande non-linéaire présentées précédemment, qui conduisent à des lois de retour d'état continues comme il est en général recherché (car de telles lois évitent les à-coup dans le comportement du système, sollicitent moins les actionneurs, ...), peuvent être envisagées, avec beaucoup d'avantages, pour réaliser un suivi de trajectoires (qui est le problème étudié ici). Par contre, elles ne peuvent structurellement pas stabiliser un robot mobile, c'est-à-dire l'arrêter sur une configuration précise. Ceci est particulièrement difficile à adresser et est encore un problème ouvert aujourd'hui.

Une synthèse des approches envisageables pour stabiliser un système non-holonyme est présentée dans [77], et rappelée brièvement ci-dessous.

Si seule une partie du vecteur d'état du système non-holonyme doit être stabilisée, alors les lois de retour d'état continues peuvent tout à fait être utilisées. Par exemple, pour le cas du robot mobile le plus simple, c'est-à-dire le robot unicycle, il est montré que ce système n'est bien sûr pas complètement linéarisable de manière exacte, mais peut par contre être partiellement linéarisé : son vecteur d'état est de dimension 3 ($X = (x, y, \theta)$, avec (x, y) coordonnées du centre de l'essieu arrière et θ le cap du robot), et le plus grand sous-espace linéarisable de manière exacte est de dimension 2. S'il est choisi de linéariser la partie du modèle du robot qui correspond aux variables x et y , alors celles-ci peuvent ensuite être stabilisées, c'est-à-dire amener le robot en une position cartésienne donnée, au moyen de lois de retour d'état continues. Par contre, dans ce cas, la partie du modèle resté non-linéaire n'est pas contrôlée, c'est-à-dire que la valeur du cap θ du robot lors de son arrêt n'est pas maîtrisée.

Stabiliser l'intégralité du vecteur d'état d'un système non-holonyme est cependant un objectif atteignable : en effet, les critères de commandabilité proposés pour les systèmes non-linéaires (condition de rang sur l'algèbre de Lie) établissent que ces systèmes sont commandables en tout point.

Une première possibilité est d'envisager des lois de retour d'état discontinues. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature, voir par exemple [22]. Cependant elles ne sont pas complètement satisfaisantes, car d'une part les discontinuités de la commande introduisent des sollicitations importantes sur les actionneurs du système, et d'autre part ces lois de commande sont très sensibles aux erreurs de mesure : une petite erreur sur la mesure de la position du robot peut engendrer, du fait de la discontinuité, une commande totalement différente de celle qui aurait été intuitivement attendue, et donc une trajectoire du robot aberrante sur un plan pratique.

Une autre possibilité, permettant de préserver la continuité de la commande tout en contournant l'obstruction mise en évidence par le théorème de Brockett, est d'envisager des lois de retour d'état continues mais instationnaires, c'est-à-dire dépendant non seulement de l'état mais aussi explicitement du temps. L'idée centrale de cette approche (voir par exemple [103] et [78]) est d'exciter le système, au moyen de la variable temps, jusqu'à ce qu'il ait convergé vers la configuration désirée. Ces lois de commande, dont la synthèse repose sur des fonctions de Lyapunov, permettent effectivement de stabiliser l'intégralité du vecteur d'état du système non-holonyme, mais conduisent à des trajectoires peu réalistes d'un point de vue pratique car très oscillantes (ce qui est somme toute logique étant donnée l'idée centrale de cette approche).

Ces différents résultats montrent la difficulté de stabiliser un système non-holonyme d'une façon satisfaisante sur un plan pratique. Aussi, il a été proposé récemment de relâcher ce problème en cherchant à stabiliser l'état des systèmes non-holonomes, non plus sur une configuration donnée, mais dans un voisinage borné de cette configuration. Ce nouvel objectif, baptisé stabilisation pratique dans [80], paraît naturel dans le cas des robots mobiles : en effet, ces systèmes ne requièrent un positionnement extrêmement précis qu'exceptionnellement. Dans la très grande majorité des cas, comme par exemple lors d'un accostage, une grande précision est souhaitée sur le positionnement latéral et sur l'erreur de cap, mais par contre les exigences sur le positionnement longitudinal le long du quai peuvent être relâchées sans pour autant compromettre la manœuvre.

Pour parvenir à la stabilisation pratique d'un système non-holonyme, une approche par fonctions dites "transverses" a été introduite dans [82] et [83]. Dans le cas d'un système où n est la dimension du vecteur d'état et m celle du vecteur de commande, les fonctions transverses s'écrivent $f(\alpha) = f_n(\alpha_n) f_{n-1}(\alpha_{n-1}) \dots f_{m+1}(\alpha_{m+1})$ avec $\alpha = (\alpha_{m+1}, \dots, \alpha_n)$ un vecteur de $n - m$ variables oscillatoires. Les variables du vecteur α reprennent le rôle de la variable temporelle utilisée dans les retours d'état instationnaires, c'est-à-dire elles excitent le système pour le forcer à poursuivre sa convergence, à la différence cette fois que l'excitation cesse lorsque l'état du système entre dans un voisinage de la configuration désirée, voisinage dont la taille et la forme peuvent être spécifiées par l'expression donnée à la fonction transverse f . Il est prouvé dans [81] et [79] que tout système non-linéaire commandable, c'est-à-dire satisfaisant la condi-

tion de rang sur l'algèbre de Lie, admet des fonctions transverses, et peut donc être stabilisé au sens d'une stabilisation pratique.

Ces techniques ne seront cependant pas mises en œuvre dans suite, car l'objectif des travaux est la conduite en convoi de véhicules urbains, c'est-à-dire essentiellement une opération de suivi de chemin pour laquelle les techniques non-linéaires présentées auparavant apportent des solutions tout à fait satisfaisantes. La stabilisation du convoi ne sera pas abordée.

1.3.3 Commandes basées sur un modèle non-linéaire

1.3.3.1 Commande reposant sur un calcul direct sur le modèle non-linéaire

Les capteurs de vision permettent d'observer le chemin que doit suivre le véhicule : ce peut être soit des lignes blanches sur la route, soit le chemin suivi par un véhicule précédent. Par conséquent, une première possibilité de commande consiste simplement à exploiter le modèle non-linéaire du véhicule pour déterminer l'angle de braquage à lui appliquer pour qu'il suive le chemin perçu par la caméra.

Un algorithme, permettant de suivre un véhicule en amont localisé par vision, est présenté dans [126]. Le chemin que doit suivre le robot est modélisé par une courbe cubique, dont les coefficients sont estimés à partir de l'observation visuelle. L'angle de braquage à appliquer sur le véhicule pour qu'il puisse suivre cette trajectoire cubique est alors déterminé directement à partir du modèle cinématique non-linéaire du véhicule (modèle tricycle). Cette approche est ensuite adaptée pour pouvoir utiliser un modèle dynamique de véhicule, et ainsi mieux prendre en compte son comportement réel.

Une approche similaire a été proposée dans le cadre du projet Praxitèle. Dans [27] et [28], l'objectif est qu'au sein d'un convoi, chaque véhicule reproduise la trajectoire du véhicule le précédant. Pour cela, tous les véhicules sont équipés d'un capteur de vision, permettant de suivre l'évolution de la position et du cap du véhicule en amont. L'angle de braquage à appliquer est alors calculé à partir d'un modèle cinématique non-linéaire (modèle tricycle) dans le but que les véhicules suivent au mieux la trajectoire perçue par leur capteur de vision. Plusieurs solutions ont été avancées et comparées :

- l'orientation des roues du véhicule suiveur est calée sur une reconstruction de l'orientation des roues du leader, obtenue à partir des mesures capteurs.
- l'orientation des roues du véhicule suiveur est calculée pour que ce dernier puisse décrire une trajectoire polynomiale du troisième ordre, joignant sa configuration courante à celle du véhicule précédent.
- une trajectoire polynomiale d'ordre 4 a également été considérée, afin de pouvoir intégrer dans les calculs la courbure courante du véhicule suiveur.
- la dernière méthode consiste à suivre le chemin (méorisé) du véhicule leader. Cette méthode est basée sur des techniques de linéarisation exacte, et est par conséquent présentée à la page 67.

Les expérimentations ont été réalisées avec des véhicules Ligier électriques équipés de balises infrarouges. Les capteurs de vision sont des caméras linéaires orientables (de

façon à pouvoir suivre le véhicule précédent dans les courbes) cadencées à 1 KHz et équipées elles-mêmes d'un flash infrarouge. Des capteurs proprioceptifs sont également utilisés pour connaître les vitesses longitudinale et angulaire des véhicules.

La première approche conduit à des résultats médiocres : le véhicule suiveur coupe les courbes tracées par le véhicule de tête, et les erreurs latérales peuvent atteindre 60 cm . Les deux approches s'appuyant sur des trajectoires polynomiales fournissent de meilleurs résultats (erreur latérale inférieure à 8 cm avec une trajectoire polynomiale d'ordre 3), malheureusement les commandes calculées apparaissent trop oscillantes. La propagation de ces oscillations au sein d'un convoi serait vite préjudiciable à son bon fonctionnement. C'est pourquoi, les auteurs mettent finalement en avant l'approche linéarisation exacte, présentée à la page 67.

1.3.3.2 Commande Lyapunov

L'utilisation de fonctions de Lyapunov est proposée dans [90] pour construire des lois de commande directement à partir du modèle cinématique non-linéaire d'un véhicule urbain électrique. L'objectif n'est pas, comme classiquement, un suivi de chemin (c'est-à-dire un guidage latéral du véhicule le long d'un chemin de référence, la vitesse étant contrôlée indépendamment (manuellement ou automatiquement)), mais une poursuite de trajectoire : l'objectif est que le véhicule parcourt une trajectoire de référence avec une loi horaire spécifiée à l'avance. Pour ce type de problème, les commandes latérale et longitudinale du véhicule ne peuvent plus être traitées indépendamment, mais au contraire doivent être étudiées simultanément.

La synthèse de ces 2 lois de commande repose sur la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + (1 - \cos \theta_e)/K_y \quad (1.13)$$

où x_e , y_e et θ_e représentent les 3 erreurs de poursuite, respectivement en abscisse, en ordonnée et en cap, et K_y est un paramètre de réglage permettant de donner plus ou moins de poids à l'erreur d'orientation par rapport aux erreurs de positionnement. Cette fonction de Lyapunov, très proche de la norme euclidienne sur l'erreur de poursuite, est bien sûr localement positive définie autour de l'erreur de poursuite nulle. La construction des lois de commande est réalisée exactement selon la méthodologie présentée à la page 59 : la fonction V est tout d'abord dérivée, de façon à faire apparaître les 2 variables de commande. Les lois de commande sont alors construites pour imposer que la dérivée de V est négative, puis le théorème de LaSalle est utilisé pour prouver la convergence de l'erreur de poursuite vers 0. Les calculs détaillés et l'expression des lois de commande peuvent être trouvés dans [56].

Le véhicule expérimental est une voiture électrique fabriquée par Yamaha. Son système de localisation est constitué par un LADAR pouvant détecter des balises sur une aire de 10 m de rayon, à la précision de ± 5 cm et à la cadence de 10 Hz , et d'odomètres pouvant remonter des données à la cadence de 100 Hz . Ces 2 informations sont fusionnées au moyen d'un filtre de Kalman, ce qui permet au véhicule de pouvoir

continuer à se localiser, même si temporairement aucune balise n'est détectée par le LADAR (les balises placées dans l'environnement sont espacées tous les 50 m). Enfin, un système de navigation permet de recalculer en temps-réel la trajectoire de référence si le LADAR détecte un obstacle sur la trajectoire initiale.

Les résultats expérimentaux correspondent tout à fait aux attentes. Cependant, il est difficile de transposer cette approche au problème de la conduite en convoi, étant donné que les commandes latérale et longitudinale ne sont pas découplées.

1.3.3.3 Commande linéarisée exacte

Les modèles cinématiques de robots mobiles, comme rappelé à la section 1.3.2 page 59, ne sont pas complètement linéarisables de manière exacte, mais peuvent par contre être convertis de manière exacte sous une forme dite chaînée (système d'équations (1.10)). Cette propriété est exploitée dans [45] pour la commande latérale de véhicules urbains, dans le cadre de LA Route Automatisée (LARA).

Les véhicules sont représentés par un modèle cinématique tricycle. Par conséquent, leur vecteur d'état est de dimension 3 (2 coordonnées pour repérer la position d'un point du véhicule + 1 coordonnée pour décrire son cap), et donc le comportement latéral des véhicules, après conversion sous forme chaînée, se présente comme un système linéaire (1.12) de dimension 2, qui peut encore être écrit de façon plus compacte comme un double intégrateur :

$$a_2'' = m_3 \quad (1.14)$$

Il est montré, lors de la conversion sous forme chaînée, que la variable a_2 peut directement être choisie comme l'écart latéral, noté y , entre le véhicule et la trajectoire de référence. De plus, la vitesse des véhicules étant supposée constante, il n'est pas nécessaire d'introduire le changement d'échelle des temps (1.11), de sorte que des dérivées temporelles dans toutes les équations peuvent être gardées. En conséquence, l'équation (1.14) du comportement latéral des véhicules s'exprime très simplement comme :

$$\ddot{y} = m_3 \quad (1.15)$$

L'équation (1.15) est un système linéaire d'ordre 2 très simple. Aussi, tous les outils de l'Automatique linéaire peuvent être envisagés pour réguler y à 0 et ainsi assurer que les véhicules suivent fidèlement leur trajectoire de référence. Dans [45], la commande virtuelle m_3 est choisie comme un correcteur PD. L'inversion des transformations d'état et de commande ayant conduit à la forme chaînée permet de revenir ensuite à la commande réelle, c'est-à-dire à l'angle de braquage à appliquer concrètement sur les roues avant du véhicule. Cette loi de commande est bien sûr non-linéaire, et prend explicitement en compte toutes les non-linéarités du modèle cinématique des véhicules (puisqu'au cours de la synthèse de la loi de commande, le modèle n'est pas approximé, mais converti de manière exacte en une forme plus simple, ici une forme chaînée).

Les véhicules expérimentaux sont des voitures Ligier électriques. Elles sont équipées d'un système caméra/flash infrarouge permettant, grâce aux réflecteurs catadioptriques installés dans l'environnement, d'obtenir une localisation absolue à une cadence de

100 Hz . Ces informations sont ensuite fusionnées, au moyen d'un filtre de Kalman étendu, avec celles renvoyées par les capteurs proprioceptifs (encodeurs et capteur d'orientation des roues avant). Les expérimentations, réalisées avec une vitesse longitudinale de 1 m/s , montrent des performances de régulation latérale satisfaisantes, y compris lors des courbes où l'erreur maximale est de l'ordre de 10 cm , c'est-à-dire proche de la précision du système de localisation. Les non-linéarités telles que la courbure, puisqu'elles sont explicitement prises en compte dans la loi de commande grâce à l'approche linéarisation exacte, ne dégradent pas significativement les performances (comme c'est le cas lorsque le modèle du véhicule est approximé par un modèle linéaire avant de calculer la loi de commande, voir section 1.3.1).

Dans les travaux [27], préalablement cités à la page 64, la quatrième solution proposée consiste à asservir le véhicule suiveur sur le chemin mémorisé du véhicule précédent. La loi de commande latérale est synthétisée également en exploitant la forme chaînée, comme dans les travaux mentionnés ci-dessus, à la différence que le changement d'échelle des temps (1.11) est cette fois utilisé. Cela permet, lors du réglage de la loi de commande, de spécifier une distance de convergence plutôt qu'un temps de convergence, ce qui a plus de sens pour l'application envisagée (le réglage de la loi de commande non-linéaire est réalisé très simplement en spécifiant les gains du correcteur PD choisi pour la commande virtuelle m_3 dans l'équation (1.15)).

Les expérimentations, réalisées avec le même dispositif que celui présenté à la page 64, montrent lors des virages des performances de régulation latérale cette fois satisfaisantes, comme il était attendu puisque la courbure est désormais explicitement prise en compte dans la loi de commande.

Enfin, dans le cadre du projet ARGO, les lois de commande linéaires proposées pour la commande latérale des véhicules dans [17] et [18], et présentées précédemment à la page 46, montrent des limitations dès que la trajectoire à suivre présente une courbure élevée : le véhicule a alors tendance à couper le virage. Comme dans les travaux [27] détaillés ci-dessus, des techniques de linéarisation exacte sont proposées dans [17] pour correctement prendre en compte la non-linéarité introduite par la courbure de la trajectoire. Le véhicule est, encore une fois, représenté par son modèle cinématique non-linéaire (modèle tricycle). La loi de commande non-linéaire est alors construite, non pas en convertissant ce modèle sous une forme chaînée, comme dans [27], mais en exploitant le fait que ce modèle est un système plat.

Plus précisément, le système de stéréovision monté sur le véhicule (présenté à la page 48) permet de connaître la consigne de régulation latérale à une distance L en amont du véhicule. Une trajectoire reliant cette consigne et la position courante du véhicule est alors générée au moyen de G^2 -splines. Cette trajectoire peut enfin être utilisée comme trajectoire de référence pour les sorties plates du système, puisque ces dernières, dans le cas du modèle cinématique tricycle, sont directement les coordonnées du centre de l'essieu arrière du véhicule. Puisque le système dynamique formé par les sorties plates consiste en de simples chaînes d'intégrateurs, voir page 61, la synthèse d'une loi de commande non-linéaire permettant le suivi de cette trajectoire est alors immédiate.

Des simulations réalisées avec un modèle dynamique de véhicule prenant en considération la masse, l'inertie, les caractéristiques des pneumatiques, ... de façon à se rapprocher du comportement réel, ont montré des performances latérales satisfaisantes : même lors de forts changements de courbures, les erreurs latérales restent inférieures à 20 cm, ce qui n'était bien sûr pas du tout le cas avec les lois linéaires présentées à la page 46.

Les performances de régulation élevées obtenues avec les lois de commande construites par une approche linéarisation exacte découlent du fait que l'intégralité du modèle décrivant le système est explicitement pris en compte lors de la synthèse de la loi de commande. S'il se trouve maintenant que le modèle comporte des imperfections paramétriques ou structurelles, alors les performances de la loi de commande, construite alors sur un modèle partiellement faux, sont immédiatement dégradées, voire inférieures à celles qu'il est possible d'obtenir avec une simple loi de commande linéaire. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour conférer une plus grande robustesse aux lois de commande non-linéaires.

Une première possibilité consiste à toujours utiliser une approche linéarisation exacte, mais à introduire dans le modèle du système des éléments de perturbation, dont l'amplitude est évaluée en temps-réel.

C'est l'approche proposée dans [68] et [69] pour développer la commande latérale d'un véhicule agricole. Sur de tels sols, le modèle cinématique tricycle classiquement utilisé pour décrire le comportement des véhicules urbains n'est plus valide : en effet, ce modèle tricycle repose sur l'hypothèse d'un roulement sans glissement des roues sur le sol, ce qui n'est bien sûr pas réaliste dans le cas d'une évolution en champ. Les phénomènes de glissement peuvent être correctement décrits au moyen d'un modèle dynamique de véhicule. Cependant, dans le cas d'un véhicule agricole, un tel modèle serait d'une part très large, et d'autre part comporterait de très nombreux paramètres difficiles à identifier, voire constamment variables comme les conditions de contact entre les roues et le champ. Il serait donc très difficilement exploitable pour développer des lois de commande. Aussi, il a été proposé de rendre compte du phénomène de glissement en introduisant des perturbations structurées dans le modèle cinématique tricycle, perturbations dont les amplitudes sont évaluées en temps-réel au moyen d'un observateur. La loi de commande latérale est alors développée, toujours sur la base d'une approche linéarisation exacte, mais sur le modèle cinématique étendu. Plus précisément, la loi de commande non-linéaire est construite en convertissant ce modèle cinématique étendu sous une forme chaînée, puis des techniques prédictives sont ajoutées pour corriger les retards bas-niveau, qui ne sont pas négligeables sur les véhicules agricoles.

Le véhicule expérimental est un tracteur CLAAS Ares 640, équipé d'un capteur RTK-GPS offrant une précision de localisation de ± 2 cm. Les expérimentations, réalisées avec une vitesse longitudinale de 8 km/h, consistent en des suivis de trajectoires courbes (succession de virages) sur terrain plat et de trajectoires rectilignes sur sol en pente, deux situations où les phénomènes de glissement sont importants. La loi de commande basée sur la linéarisation exacte du modèle cinématique tricycle, qui ignore les glissements, conduit à des erreurs latérales pouvant atteindre 80 cm. A

l'inverse, la loi de commande basée sur la linéarisation exacte du modèle cinématique étendu permet de garder des erreurs latérales inférieures à 15 *cm*, ce qui est l'objectif visé pour les applications automatisées en agriculture de précision (du même ordre de grandeur que la précision obtenue par conduite manuelle). Cette dernière loi de commande offre donc une bonne robustesse vis-à-vis de l'occurrence des glissements.

Une autre possibilité consiste à mettre en œuvre des techniques de commande robustes. Par exemple, dans [1], une commande par modes glissants est proposée pour le suivi de trajectoires dans le cas de véhicules routiers se déplaçant à haute vitesse. Le principe des techniques à modes glissants consiste à attirer l'état du système vers une zone saine (la surface glissante) où les perturbations qui peuvent éventuellement l'affecter dégradent peu son comportement global.

1.3.4 Bilan

Les techniques de commande non-linéaire, présentées à la section 1.3.2, et appliquées pour la commande latérale de véhicules dans la section 1.3.3, offrent clairement des potentialités que n'ont pas les lois de commande linéaires présentées à la section 1.3.1 : elles permettent, d'une part d'assurer une plus grande sécurité, dans le sens que leur validité peut être assurée sur une très large plage de fonctionnement, et non réduite à un voisinage autour de la trajectoire de référence, comme c'est le cas pour les lois de commande linéaires reposant sur une linéarisation tangente du modèle du système, et d'autre part de proposer une précision de régulation très élevée, car les non-linéarités des modèles de véhicules, comme par exemple la courbure des trajectoires, peuvent explicitement être prises en compte dans la loi de commande. Au vu des applications considérées dans ce mémoire, qui demandent le transport de passagers dans des environnements urbains très contraints (voies de circulation étroites) le long de trajectoires pouvant présenter de fortes courbures (comme sur les croisements à angle droit), les 2 aspects sécurité et précision sont particulièrement importants, et conduisent à se tourner vers des techniques de commande non-linéaire.

Parmi les différentes techniques de commande non-linéaire présentées à la section 1.3.2, il a été choisi de s'appuyer sur une approche linéarisation exacte, et plus précisément sur les techniques qui reposent sur une conversion préalable des modèles non-linéaires sous une forme chaînée. En effet, dans une application urbaine comme celle considérée ici, les véhicules évoluent à vitesse modeste sur des sols asphaltés. Par conséquent, leur comportement peut raisonnablement être décrit par un modèle cinématique, dont il est connu qu'il peut être converti sous une forme chaînée. Un grand intérêt de cette expression chaînée, rappelé à la page 60, est qu'elle permet de rendre indépendantes les performances de régulation latérale et longitudinale, ce qui est une propriété particulièrement avantageuse dans l'optique de contrôler un convoi de véhicules. C'est la raison principale qui a motivé cette approche. Par conséquent, la loi de commande latérale développée au Chapitre II se rapproche des lois de commandes envisagées dans [45] ou [27], et présentées respectivement aux pages 66 et 67.

1.4 Commande longitudinale de véhicules formant un convoi

Les commandes latérale et longitudinale d'un véhicule sont très généralement adressées indépendamment l'une de l'autre, comme rappelé à la section 1.2.4.2. Un état de l'art sur les commandes latérales a été dressé à la section 1.3. Cette section s'intéresse maintenant à la commande longitudinale des véhicules, dans l'optique d'assurer leur déplacement en convoi.

Il est possible de distinguer 3 grandes classes de commandes longitudinales, selon que les véhicules du convoi ne communiquent pas, ou communiquent de proche en proche (chaque véhicule communique avec celui qui le précède), ou au contraire tous les véhicules du convoi peuvent s'échanger des données. Ces trois grandes classes sont discutées, respectivement à la section 1.4.1, section 1.4.2 et section 1.4.3.

1.4.1 Véhicules non communicants

Dans le cas de figure où les véhicules automatisés ne communiquent pas les uns avec les autres, un système de perception relatif est nécessaire pour que le véhicule suiveur soit en mesure de détecter le véhicule précédent. Ainsi, aucune information provenant de l'extérieur du véhicule n'est requise pour alimenter la loi de commande longitudinale. De ce fait, le convoi n'est plus vu comme une entité unique, mais plutôt comme un ensemble de plusieurs véhicules indépendants les uns des autres, et s'asservissant à partir de mesures relatives avec les proches voisins.

Dans le cadre du programme Praxitèle [66], la conduite en convoi de véhicules urbains électriques est adressée dans [28] et [27]. Différentes commandes latérales ont été envisagées, et ont été présentées dans la section précédente : commande LQG à la page 49, commande basée sur le modèle cinématique non-linéaire des véhicules à la page 64 et commande reposant sur une linéarisation exacte à la page 67.

La loi de commande longitudinale, pour sa part, est une loi linéaire Proportionnelle Dérivée, construite pour réguler une distance inter-véhicule d'autant plus grande que la vitesse des véhicules est élevée. Plus précisément, elle s'exprime comme suit :

$$a_f = \frac{1}{h}(\Delta v + K_p(\Delta x - (d_0 + h v_f))) \quad (1.16)$$

avec les notations suivantes :

- la variable de commande a_f est l'accélération du véhicule suiveur (convertie ensuite en tension à appliquer sur le moteur électrique de la voiture),
- Δv et Δx sont respectivement la vitesse relative et l'écart relatif entre le véhicule précédent et le véhicule suiveur,
- $d_0 + h v_f$ est la distance inter-véhicules désirée. C'est une consigne de régulation hybride constituée d'un écart en distance et d'un écart temporel : il est souhaité que les véhicules soient espacés de la distance d_0 , à laquelle est ajoutée la distance parcourue par le véhicule suiveur pendant la durée h .
- K_p est le gain proportionnel de la loi PD.

L'application considérée est un fonctionnement en Stop and Go. Le dispositif expérimental a déjà été décrit à la page 64 : ce sont des voitures Ligier électriques équipées d'un système caméra linéaire/flash infrarouge permettant de détecter le véhicule précédent sur lequel est placé une balise infrarouge. Ce système de perception est bien adapté à l'application visée pour laquelle les distances inter-véhicules sont courtes et les vitesses faibles. Les erreurs inter-véhicules, en distance et en vitesse, sont délivrées à une cadence de 1 KHz .

Les expérimentations ont été menées avec une inter-distance de consigne spécifiée par $d_0 = 1.0\text{ m}$ et $h = 0.35\text{ s}$, ce qui correspond à une inter-distance de 4.5 m lorsque la vitesse des véhicules est 10 m/s . A cette vitesse, l'erreur longitudinale est inférieure à 30 cm malgré des accélérations du véhicule précédent de l'ordre de $\pm 2m/s^2$, et converge vers 0 lorsque la vitesse du véhicule précédent est constante, ce qui montre qu'il n'y a pas d'erreur statique. En cas d'arrêt d'urgence, une décélération maximale de 5 m/s^2 est susceptible d'être appliquée au véhicule suiveur. Dans ce cas, l'erreur longitudinale reste inférieure à 50 cm , garantissant ainsi la sécurité, puisque $d_0 = 1.0\text{ m}$. Pour ce type d'application, le choix des paramètres de l'inter-distance de consigne est essentiel pour imposer tout à la fois une circulation fluide (inter-distance courte entre les éléments du convoi) et sûre (absence de collision). Ce choix doit être réalisé en fonction des propriétés physiques des capteurs, et tout particulièrement en fonction de leurs caractéristiques temporelles (fréquence d'acquisition, délais,...), ainsi que du temps de réponse des actionneurs.

Dans [41], une application de conduite en convoi sur autoroute est considérée. Seule la loi de commande longitudinale est abordée. L'objectif est d'empêcher qu'un véhicule roulant sur autoroute entre en collision avec le véhicule précédent et de permettre à tout véhicule arrivant sur l'autoroute de s'insérer sur la voie principale. Il est supposé que chaque véhicule est équipé de capteurs lui permettant de connaître sa position et sa vitesse, ainsi que celles du véhicule précédent, de sorte qu'aucune communication inter-véhicule ne soit nécessaire.

L'objectif de la loi de commande est de réguler l'écart temporel entre deux véhicules consécutifs sur une valeur de consigne notée h . Cet écart temporel entre 2 véhicules peut être exprimé à l'instant courant t comme :

$$\text{écart temporel} = \frac{z(t) - x(t)}{\dot{x}(t)} \quad (1.17)$$

où $z(t)$ et $x(t)$ désignent respectivement la position courante du véhicule précédent et du véhicule suiveur. L'objectif de la loi de commande longitudinale peut alors être ré-exprimé comme amener la variable $r(t)$ à 1, avec $r(t)$ défini par :

$$r(t) = \frac{z(t) - x(t)}{h \dot{x}(t)} \quad (1.18)$$

Il est supposé que la variable de commande u sur le véhicule suiveur est directement son accélération : $u(t) = \ddot{x}(t)$. En dérivant (1.18), la relation liant u à la variable régulée

r apparaît :

$$\dot{r}(t) = \frac{\dot{z}(t) - \dot{x}(t) - h u(t)r(t)}{h\dot{x}(t)} \quad (1.19)$$

On déduit alors de (1.19) que si l'inter-distance entre les 2 véhicules est parfaitement régulée (c'est-à-dire $r(t) = 1$ et $\dot{r}(t) = 0$), alors la commande u devrait prendre la valeur $\hat{u}(t)$ donnée par :

$$\hat{u}(t) = \frac{\dot{z}(t) - \dot{x}(t)}{h} \quad (1.20)$$

Par conséquent, la loi de commande suivante, assimilable à un correcteur Proportionnel, est finalement proposée pour réguler la variable $r(t)$:

$$u(t) = \hat{u}(t) + \lambda(r(t) - 1) = \frac{\dot{z}(t) - \dot{x}(t)}{h} + \lambda(r(t) - 1) \quad (1.21)$$

où λ est le gain proportionnel.

Des analyses théoriques (étude analytique de la fonction $r(t)$) prouvent la stabilité asymptotique de cette loi de commande longitudinale sous les hypothèses suivantes :

- $\ddot{z}(t)$ est continue.
- L'accélération du véhicule précédent est bornée : $-0.2g < \ddot{z}(t) < 0.5g$.
- Le véhicule précédent n'est jamais à l'arrêt et sa vitesse est bornée : $0 < \dot{z}(t) < v_{max}$.
- Le véhicule suiveur est toujours en mouvement : $0 < \dot{x}(t)$.
- Le véhicule suiveur est toujours derrière le véhicule précédent : $z(t) > x(t)$.

Les simulations effectuées, y compris avec le simulateur SHIFT, développé dans le cadre du projet PATH pour réaliser des micro-simulations d'autoroute, valident ces résultats théoriques.

1.4.2 Véhicules communicants : communication restreinte de proche en proche

Plutôt que d'évaluer l'état longitudinal du véhicule précédent (position, vitesse, accélération longitudinales) au moyen d'un système de perception relatif monté sur le véhicule suiveur, une alternative est d'obtenir ces informations par le biais d'une communication entre les véhicules. Cette seconde possibilité, nécessite la mise au point d'un protocole de communication, mais en contre-partie permet d'obtenir une meilleure estimation de l'état du véhicule précédent : une estimation locale de l'état d'un véhicule, au moyen de ses propres capteurs proprioceptifs, peut être beaucoup plus précise qu'une estimation déportée.

Cette section considère le cas où les véhicules communiquent de proche-en-proche (transmission des mesures au véhicule situé immédiatement après). Plusieurs approches sont exposées des plus basiques aux plus évoluées. Le cas où tous les véhicules du convoi peuvent s'échanger des données est abordé à la section 1.4.3.

1.4.2.1 Approche heuristique

L'Université de Technologie d'Helsinki, avec le VTT Automation, s'est intéressée au convoi de 2 véhicules au moyen d'ultrasons [72]. Ce système de perception est peu précis, mais permet un fonctionnement quelle que soit la visibilité (nuit, pluie, tempête de neige), contrairement à d'autres capteurs tels que les caméras. Les mesures ultrasonores, réalisées au moyen de 2 émetteurs/récepteurs, permettent aux véhicules de connaître leurs distance, vitesse et inclinaison relatives. Les véhicules sont également équipés d'encodeurs et d'un gyromètre pour mesurer leur vitesse et leur direction. Enfin, une liaison radio permet de communiquer la courbure de la trajectoire et la vitesse du véhicule de tête au suiveur. Cet équipement est représenté sur la figure 1.20.

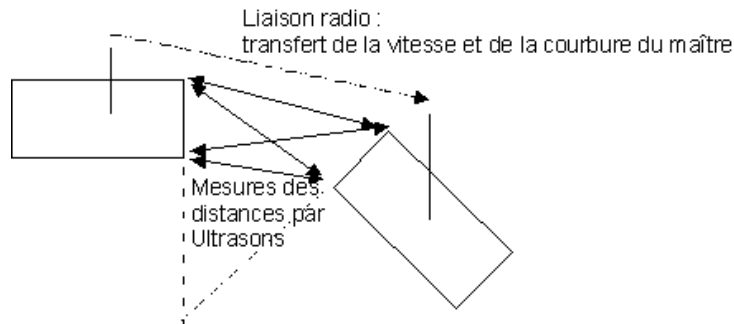


FIG. 1.20 – Implantation et mesures par ultra-sons

Le contrôle latéral du véhicule suiveur est réalisé au moyen de la loi de commande décrite dans [96], et présentée à la page 51 : une trajectoire de référence pour le véhicule suiveur est construite, au moyen de B-splines, à partir des mesures proprioceptives (vitesse et direction) du véhicule de tête transmises par liaison radio et de l'interprétation des mesures ultra-sonores pour l'obtention des données relatives (la distance, la vitesse et l'inclinaison du véhicule suiveur par rapport au véhicule de tête). L'asservissement latéral du véhicule suiveur sur cette trajectoire est alors réalisé au moyen de la loi de commande présentée à la page 51.

Pour la commande longitudinale, deux approches sont proposées, qui diffèrent par le choix de la consigne imposée à la vitesse du véhicule suiveur. La première consiste à prendre directement la vitesse du véhicule de tête comme consigne pour la vitesse du véhicule suiveur. Cette approche exclut tous les problèmes de retard de transmission, mais le véhicule de tête doit s'assurer que tous les membres du convoi aient quitté un passage sinueux avant de reprendre une vitesse normale. La seconde approche propose de donner comme consigne au véhicule suiveur la vitesse qu'avait le véhicule de tête lorsqu'il se trouvait à la position présente du véhicule suiveur. Cette solution élimine les limitations de la première approche, mais est plus sensible aux retards éventuels de transmission. L'asservissement proprement dit de la vitesse du véhicule suiveur est réalisé par une loi heuristique :

- Si la distance inter-véhicule d appartient à une plage nominale $[d_{min}, d_{max}]$, alors la vitesse du véhicule suiveur v est directement l'une des deux vitesses consigne

mentionnées ci-dessus, et est notée v_c .

- Si $d < d_{min}$, alors la vitesse du véhicule suiveur est obtenue en diminuant la vitesse de consigne comme suit :

$$v = v_c \left(2 \frac{d}{d_{min}} - 1 \right)$$

- Si au contraire $d > d_{max}$, alors la vitesse du véhicule suiveur est obtenue en augmentant la vitesse de consigne comme suit :

$$v = v_c \left(2 \frac{d}{d_{max}} - 1 \right)$$

Les expérimentations ont été réalisées avec une vitesse du véhicule de tête égale à 10 m/s. Comme les capteurs ultra-sonores ne peuvent pas fournir des données très précises, la plage d'acceptabilité de l'écart inter-véhicules a été choisie très large : $d_{min} = 5$ m et $d_{max} = 15$ m. Par rapport à ces exigences relativement lâches, les résultats expérimentaux ont été globalement satisfaisants. Le remplacement des capteurs ultra-sonores par des récepteurs GPS était à l'étude pour pouvoir réduire la plage d'acceptabilité de l'écart inter-véhicules. Il faut cependant rappeler que l'objectif des travaux n'est pas d'obtenir une régulation longitudinale précise, mais d'assurer la sécurité et le fonctionnement en convoi quelles que soient les conditions extérieures.

1.4.2.2 Régulation de l'erreur longitudinale courante

Les travaux présentés dans [108] et [89] s'intéressent à la conduite en convoi de poids lourds communiquant de proche proche. Les commandes latérales proposées dans ces 2 articles ont été décrites à la section 1.3, respectivement aux pages 53 et 48. Les commandes longitudinales, qui dans les 2 cas consistent en une régulation de l'écart courant entre les véhicules par des techniques linéaires, sont présentées ci-dessous.

Dans [108], les poids-lourds sont d'abord représentés par un modèle dynamique très complet, voir page 53, puis ce modèle est linéarisé tangent et présenté sous une forme de représentation d'état. La commande longitudinale proposée a pour objectif de maintenir un écart constant entre les véhicules, et consiste en une loi de retour d'état linéaire $u = -Kx$. La commande u est l'accélération du véhicule suiveur, et l'état x est formé par les erreurs relatives en distance, en vitesse et en accélération avec le véhicule précédent, reconstruites au moyen d'un observateur. Ces travaux ont été validés sur un plan théorique, mais aucune expérimentation n'a été menée.

Dans [89], l'objectif de la commande longitudinale est de maintenir un écart temporel de 1.5 s entre les véhicules. Comme cela avait déjà été le cas pour la commande latérale, voir page 48, une loi linéaire Proportionnelle Dérivée est proposée pour contrôler cette fois l'accélération du véhicule suiveur. Les performances de cette loi de commande ont été évaluées au travers de simulations, réalisées sur la base d'un modèle dynamique de véhicule pour décrire de façon réaliste le comportement d'un poids-lourd. Celles-ci sont très satisfaisantes lorsque les véhicules sont déchargés (écart inter-véhicules parfaitement maintenu à 1.5 s). Par contre, lorsque les véhicules sont chargés,

des écarts longitudinaux transitoires sont observés lors des phases d'accélération ou de décélération, dus aux effets inertiels non pris en compte dans la loi de commande, mais qui dans ce cas sont alors très importants. Ces erreurs reviennent cependant à zéro dès lors que la vitesse du véhicule précédent est maintenue constante.

Les travaux présentés dans [36], [35] et [39] n'adressent pas spécifiquement la commande d'un convoi de véhicules, mais de façon plus générale la coopération entre plusieurs robots mobiles. Un grand nombre de scénarii sont envisagés, le plus proche du convoi en ligne étant le maintien de chaque robot à une configuration relative donnée (en position et en orientation) par rapport au robot qui lui est le plus proche dans le groupe de robots.

Des techniques de commande non-linéaire, et plus précisément des lois de commande basées sur la propriété de platitude sont proposées pour contrôler les différents robots : il est prouvé que le modèle dynamique de ces robots est un système plat, dont les sorties plates sont directement les coordonnées cartésiennes du centre de l'essieu arrière des robots. La propriété de platitude, comme mentionné à la page 62, est alors particulièrement intéressante : une trajectoire de référence est tout d'abord générée pour ces sorties plates, au moyen de B-splines, à partir de la configuration du robot le plus proche. Puis, en tirant parti du fait que le système dynamique formé par les sorties plates consiste simplement en des chaînes d'intégrateurs, la synthèse d'une loi de commande non-linéaire assurant le suivi de cette trajectoire est immédiat. Le schéma de commande correspondant est représenté sur la figure 1.21.

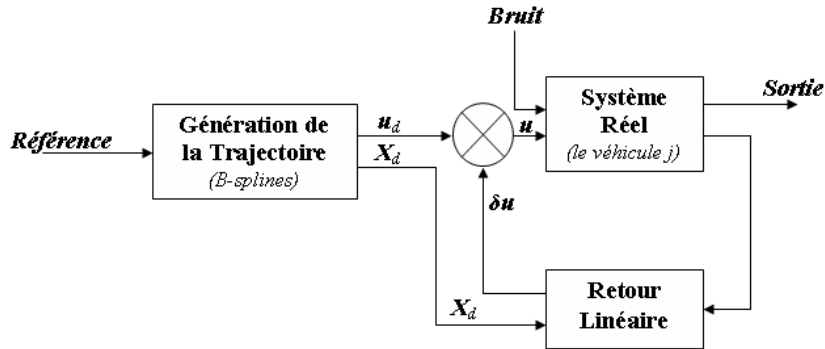


FIG. 1.21 – Schéma de commande par platitude

A terme, ces lois de commande doivent être implantées sur des véhicules électriques miniatures de type 4×4 , équipés de récepteurs GPS pour la localisation et d'antennes WiFi pour les communications inter-véhicules. De surcroît, il est prévu que les antennes WiFi soient motorisées afin qu'elles puissent toujours être orientées de façon à assurer la meilleure réception possible des signaux WiFi, et aussi qu'elles puissent pallier aux pertes de signaux GPS, la puissance des signaux WiFi étant alors utilisée temporairement pour localiser les véhicules les uns par rapport aux autres.

Dans l'attente, les différents scénarii de coopération entre les robots ont été validés, sur un plan théorique, au moyen de simulations. De plus, un module d'évitement d'obs-

tacles a également été proposé (dans l'application finale, les robots seront équipés, à cet effet, de 4 capteurs ultra-sons). Son principe consiste à déformer les trajectoires de référence des différents robots, construites au moyen de B-splines comme expliqué ci-dessus, pour tenir compte des obstacles, en utilisant pour cela la technique des DVZ (Deformable Virtual Zones). Le suivi de ces nouvelles trajectoires est toujours immédiat, grâce à la propriété de platitude. Ces lois de commande ne sont cependant pas directement transposables pour l'application de conduite en convoi de véhicules urbains envisagée dans ce mémoire, car par cette approche, les commandes latérale et longitudinale ne sont pas découplées, contrairement à ce qui est recherché dans l'application visée.

1.4.2.3 Approches cherchant à anticiper les comportements en amont

La mise en place d'une communication inter-véhicules permet au véhicule suiveur de connaître avec une meilleure précision l'état courant du véhicule qui le précède. Ces données peuvent de surcroît être exploitées pour prédire le comportement du véhicule précédent, et ainsi apporter de l'anticipation dans la loi de commande du véhicule suiveur.

Une telle approche est proposée dans [107] pour la commande longitudinale de véhicules de tourisme dans une application de conduite en convoi. Le comportement des véhicules est décrit par un modèle dynamique heuristique : la vitesse v est reliée à la consigne d'accélération a^* appliquée au véhicule (par l'intermédiaire du moteur ou des freins) par un intégrateur bien sûr, complété par un système 1^{er} ordre et un retard pur afin de prendre en compte la dynamique des différents constituants du moteur et du système de freinage. La relation entre v et a^* est donc un modèle linéaire, représenté par la fonction de transfert :

$$v(p) = \frac{1}{p} \left(\frac{1}{\tau p + 1} \right) e^{-T_d p} a^*(p)$$

Les paramètres τ et T_d de ce modèle sont déterminés par identification, sur la base de données expérimentales.

L'objectif de la loi de commande longitudinale est de maintenir un écart temporel constant T_H entre deux véhicules consécutifs. Par conséquent, la grandeur à réguler sur le $n^{ième}$ véhicule du convoi, notée e_n , peut être exprimée comme suit :

$$e_n = v_n T_H - d_{n-1,n}$$

où v_n est la vitesse du $n^{ième}$ véhicule et $d_{n-1,n}$ est la distance entre les véhicules $(n-1)$ et n , fournie par les capteurs relatifs montés sur le véhicule n .

La première approche proposée consiste à réguler l'erreur courante e_n , comme dans les applications décrites à la section 1.4.2.2. Dans ce cas, l'accélération de consigne a_n^* à appliquer sur le $n^{ième}$ véhicule est calculée classiquement par un correcteur Proportionnel Dérivée. Les performances obtenues lors des expérimentations en vraie grandeur ne sont cependant pas complètement satisfaisantes. Celles-ci ont été réalisées sur autoroute avec des véhicules de tourisme du constructeur Nissan, équipés d'un radar

laser permettant de mesurer, avec une précision de 10 cm, la distance avec le véhicule précédent. Au cours des expérimentations, la vitesse du véhicule de tête peut atteindre 90 km/h. La consigne de régulation T_H a été choisie égale à 0.5 s, ce qui correspond à une distance inter-véhicules de 12.5 m pour la vitesse maximale. Le niveau de bruit sur les mesures délivrées par le radar conduit à des erreurs longitudinales significatives, pouvant atteindre 1.5 m lorsque le véhicule de tête change sa vitesse de croisière.

Pour améliorer ces performances, une seconde approche propose d'introduire une communication de proche en proche entre les véhicules, dans le but d'anticiper le comportement du véhicule précédent. Concrètement, l'accélération de consigne du $(n - 1)^{ième}$ véhicule est transmise au $n^{ième}$ véhicule, puis filtrée et ajoutée au terme Proportionnel Dérivé dans l'expression de l'accélération de consigne a_n^* qui est utilisée pour commander le véhicule suiveur. Cette seconde loi de commande longitudinale correspond à un schéma de commande dit *Feedforward* et permet clairement au véhicule suiveur d'anticiper les accélérations/décélérations du véhicule qui le précède.

Pour filtrer l'accélération a_{n-1} du véhicule précédent, un filtre 1^{er} ordre de constante de temps T_H a été choisi, sur la base du raisonnement suivant : la distance inter-véhicule $d_{n-1,n}$ est liée aux vitesses v_{n-1} et v_n par une simple relation intégrale :

$$p d_{n-1,n}(p) = v_{n-1}(p) - v_n(p) \quad (1.22)$$

Lorsque le convoi est parfaitement régulé, alors $d_{n-1,n} = v_n T_H$. En reportant cette relation dans (1.22), la relation obtenue entre v_{n-1} et v_n peut être approximée par la fonction de transfert :

$$v_n(p) = \frac{1}{T_H p + 1} v_{n-1}(p) \quad (1.23)$$

Tous les véhicules étant supposés identiques, la même fonction de transfert, qui correspond à un filtre 1^{er} ordre de constante de temps T_H , peut être proposée pour approximer la relation entre les accélérations de 2 véhicules consécutifs :

$$a_n(p) = \frac{1}{T_H p + 1} a_{n-1}(p) \quad (1.24)$$

Ce filtre apparaît donc naturel pour lisser l'accélération du véhicule $(n - 1)$ avant de l'introduire dans la consigne d'accélération a_n^* du véhicule n .

Les expérimentations montrent que l'ajout du terme anticipatif dans la loi de commande améliore significativement les performances de régulation longitudinale : pour la même application de conduite en convoi sur autoroute à 90 km/h, avec la même consigne de régulation $T_H = 0.5$ s, l'erreur longitudinale, cette fois, ne dépasse plus 1 m y compris lorsque le véhicule de tête change d'allure. Cela correspond à une erreur temporelle de 0.04 s pour la vitesse maximale, soit moins de 10 % de la consigne T_H . Le terme anticipatif, très pertinent lorsque le convoi est dans sa configuration nominale (écarts temporels entre les véhicules proches de la consigne T_H) peut toutefois devenir incohérent si ces écarts sont, pour une raison quelconque, éloignés de cette consigne.

Une autre commande longitudinale, faisant elle aussi appel à des éléments anticipatifs, est proposée dans [85] et [86] pour la même application de conduite en convoi

de véhicules de tourisme. Encore une fois, le comportement longitudinal des véhicules est décrit par un modèle dynamique heuristique :

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= a_i \\ \dot{a}_i &= \frac{1}{\tau_i}(a_i^c - a_i)\end{aligned}\tag{1.25}$$

où x_i , v_i et a_i sont respectivement la position longitudinale, la vitesse et l'accélération du $i^{ème}$ véhicule du convoi, et a_i^c est la consigne d'accélération appliquée sur ce véhicule. Enfin, le paramètre τ_i est homogène à une constante de temps, et représente toutes les dynamiques non-modélisées (moteur, éléments mécaniques, ...). Ce paramètre doit être préalablement identifié sur la base de données expérimentales.

L'objectif de la loi de commande longitudinale est de maintenir une distance constante entre les véhicules. Cependant, la grandeur régulée n'est pas l'écart longitudinal courant entre 2 véhicules consécutifs, mais l'écart longitudinal entre ces 2 véhicules prédit à un horizon temporel t_{go} , en supposant pour cela que l'accélération des véhicules reste constante. Un calcul direct fournit l'expression de la variable régulée, appelée *expected spacing error*, et notée d_i :

$$d_i = \left[(x_{i-1} - x_i) + (v_{i-1} - v_i) t_{go} + (a_{i-1} - a_i) \frac{t_{go}^2}{2} \right] - d^* \tag{1.26}$$

où d^* est la consigne d'inter-distance. La commande longitudinale a_i^c de chaque véhicule est alors construite en s'appuyant pour cela sur la fonction de Lyapunov la plus simple qui soit :

$$V_i = \frac{1}{2} d_i^2 \tag{1.27}$$

et en suivant la méthode de synthèse présentée à la page 59.

Cette loi de commande régulant une erreur longitudinale future a été comparée en simulation avec une loi de commande PID classique, régulant l'erreur longitudinale courante. Ces simulations montrent l'intérêt de l'approche proposée lorsque le convoi est soumis à des variations rapides : pour un convoi de 4 véhicules circulant initialement à 2 m/s, lorsque le véhicule de tête est soumis brusquement à une accélération de 1 m/s², alors l'erreur longitudinale avec le 1^{er} suiveur reste inférieure à 4 cm et les erreurs longitudinales entre les autres véhicules du convoi restent nulles. A contrario, avec la loi PID, les erreurs longitudinales sont supérieures à 30 cm. Ces meilleures performances en régulation longitudinale lors de variations rapides, qui correspondent souvent à des situations critiques, permettent d'obtenir un comportement d'ensemble du convoi plus cohérent et aussi une meilleure sécurité lors de telles situations, et ce d'autant plus que le convoi est long.

1.4.2.4 Approches robustes ou adaptatives

La modélisation du comportement longitudinal d'un véhicule, tout comme celle du comportement latéral, ne peut être parfaitement précise : certains éléments, telle que

la motorisation, sont particulièrement délicats à modéliser. D'autres, comme le contact roues/sol, sont variables dans le temps. Pour assurer aux lois de commande longitudinales une certaine robustesse vis-à-vis de ces inévitables imperfections de modèle, des techniques de commande adaptative ou de commande robuste ont également été envisagées, comme cela avait été précédemment proposé pour les commandes latérales.

Dans [52], des techniques de commande robuste sont utilisées pour une application de conduite en convoi de véhicules de tourisme. Il s'agit d'une commande longitudinale par modes glissants, qui permet de prendre en compte explicitement les incertitudes du modèle dynamique de véhicule qui est utilisé. De surcroît, cette loi de commande est asymétrique, dans le sens où les performances imposées sur la régulation longitudinale sont plus sévères lorsque la distance entre 2 véhicules est inférieure à la consigne (car cette situation peut déboucher sur des risques de collision) et plus lâche dans le cas inverse (car il n'y a cette fois aucun problème de sécurité).

Cette approche a été comparée en simulation avec d'autres techniques de commande, et notamment avec des lois de commande non-linéaires reposant sur une approche linéarisation exacte. Le cas de figure simulé est celui d'un convoi de 8 voitures de tourisme circulant à 100 km/h et devant respecter un écart inter-véhicules de 0.5 m . Ces simulations comparatives mettent en valeur les deux points forts de l'approche proposée : d'une part sa robustesse vis-à-vis des erreurs de modèle, et d'autre part l'intérêt d'une régulation asymétrique, vis-à-vis des attentes en matière de sécurité. Ainsi, lorsque le véhicule de tête décélère, les simulations montrent que la loi de commande proposée assure que l'erreur longitudinale reste toujours inférieure à 10 cm (soit une marge de sécurité de 40 cm).

Parmi les différentes stratégies de commande adaptative, une première approche consiste à modifier simplement la consigne de régulation en fonction de l'environnement du système. Cette solution a été proposée dans [54] et [53] pour que, dans une application de conduite en convoi de véhicules de tourisme, la loi de commande longitudinale puisse s'adapter en temps-réel aux conditions climatiques et aux conditions de circulation rencontrées par les véhicules.

L'objectif de la loi de commande longitudinale est de maintenir un écart temporel constant entre les véhicules. Elle consiste en un retour d'état LQR construit à partir d'un modèle dynamique de véhicule, préalablement linéarisé tangent. La variable de commande est l'accélération du véhicule, les variables d'état utilisées par la loi de commande sont les distance et vitesse relatives entre 2 véhicules consécutifs. Le réglage des gains du retour d'état par l'approche LQR permet de proposer un compromis entre la satisfaction de l'objectif de régulation et des accélérations restant acceptables pour les véhicules considérés.

La consigne d'écart temporel est spécifiée en fonction des caractéristiques du véhicule (capacité de freinage,...), des conditions climatiques et des conditions de circulation (trafic,...), pour qu'aucune collision ne se produise en cas d'arrêt d'urgence du véhicule précédent. Cette consigne d'écart temporel est modifiée en temps-réel en fonction des conditions rencontrées, de sorte que la longueur du convoi est toujours la longueur minimale (c'est-à-dire qui garantit la sécurité des véhicules) permise par les conditions

courantes.

Cette approche a été validée au travers de simulations, où les véhicules sont représentés par un modèle dynamique très précis (incluant le groupe moto-propulseur, un modèle de traction sur la route, le système de freinage ABS, ...) de façon à décrire de façon réaliste leur comportement, quelles que soient les conditions d'évolution. Le cas d'études est un convoi de 10 véhicules, où la vitesse du véhicule de tête passe de 20 m/s à 25 m/s . Les simulations montrent que, suite à cette modification de vitesse, le 10^{ième} véhicule respecte de nouveau sa consigne longitudinale au bout de 20 s , et ce quelles que soient les conditions d'évolution simulées. Ensuite, si les conditions de circulation évoluent, la variation induite sur la consigne d'écart temporel est correctement répercutée sur les véhicules : si par exemple les conditions d'adhérence sont dégradées, alors la consigne d'écart temporel augmente, donc les véhicules suiveurs ralentissent pour respecter cette nouvelle consigne, puis reprennent la vitesse du véhicule de tête. Des simulations d'arrêt brutal d'un membre du convoi montrent enfin que cette stratégie adaptative permet de garantir la sécurité des véhicules, quelles que soient les conditions d'évolution. C'est le point fort de cette approche. La faiblesse inhérente étant que, puisque la consigne d'écart temporel est modifiée en ligne en fonction des conditions de circulation, les distances régulées entre les véhicules sont variables, et donc le comportement du convoi en fonctionnement standard n'est pas complètement prévisible.

D'autres stratégies de commande adaptative ont été envisagées et mises en œuvre dans le cadre du programme PATH, toujours pour des applications de conduite en convoi de véhicules de tourisme sur autoroute. Les lois de commande longitudinale, détaillées dans [132], [133] et [134], sont construites en 2 temps :

- en premier lieu, une loi de commande longitudinale est développée pour réguler la vitesse v des véhicules sur une vitesse de consigne v_d ,
- ensuite, l'expression de la vitesse de consigne v_d est spécifiée pour que la régulation de v sur v_d au moyen de la loi de commande longitudinale précédente assure que l'écart entre les véhicules réponde aux attentes.

Dans toutes ces études, le comportement longitudinal des véhicules est décrit par un modèle dynamique. Un modèle non-linéaire très complet est tout d'abord développé, voir [132]. Il est systématiquement utilisé pour réaliser les simulations, afin que celles-ci soient les plus réalistes possible. En revanche, pour la synthèse des lois de commande longitudinales, ce modèle est linéarisé tangent et assimilé à un 1^{er} ordre :

$$v(p) = \frac{b}{p + a} u(p) \quad (1.28)$$

où v est la vitesse du véhicule et la variable de commande u est le débit d'entrée du carburant. Enfin, a et b sont 2 paramètres issus de la linéarisation tangente du modèle non-linéaire. Leur valeur dépend bien sûr du point de fonctionnement autour duquel cette dernière a été effectuée.

Comme annoncé ci-dessus, une loi de commande permettant la régulation de la vitesse v du véhicule sur une vitesse de consigne v_d est tout d'abord développée.

En premier lieu, une commande linéaire classique PID est envisagée. Malheureusement, il est rarement possible de régler les gains d'un tel correcteur de façon satisfaisante : si les gains sont réglés pour imposer des performances de régulation élevées, alors des réponses avec dépassements sont observées à cause des non-linéarités ignorées dans le modèle (1.28). Si, pour éviter ces dépassements, les performances de régulation sont relâchées, alors les temps de réponse sont en général rédhibitoires pour l'application de conduite en convoi considérée ici.

Par conséquent, un contrôleur PIQ (Proportionnel Intégral Quadratique) avec un élément anti wind-up est finalement mis en œuvre :

- l'introduction d'un terme quadratique permet d'imposer un comportement différent selon que les erreurs d'asservissement sont faibles ou larges : si les erreurs d'asservissement sont faibles, alors le terme quadratique est très faible, et le correcteur PIQ est alors similaire à un simple correcteur PI. À l'inverse, si les erreurs d'asservissement sont larges, alors le terme quadratique est prépondérant, ce qui permet d'imposer à l'asservissement une réaction forte pour remédier rapidement à cette erreur anormale.
- l'élément anti wind-up permet de saturer le terme intégral dans la loi de commande, tout en continuant de garantir la stabilité de l'asservissement.
- enfin, le terme Dérivé est éliminé car il requiert une mesure de l'accélération relative des véhicules qui ne sera pas disponible dans l'application finale.

Le modèle linéaire (1.28), avec a et b fixes, ne décrit correctement le comportement du véhicule que sur une plage de fonctionnement donnée : si la vitesse du véhicule sort de cette plage, les valeurs des paramètres a et b doivent être modifiées. Par conséquent, un réglage du correcteur PIQ effectué pour un couple (a, b) donné, sera très satisfaisant tant que la vitesse v reste dans la plage de fonctionnement correspondant à ce couple (a, b) , mais peut conduire à des performances insatisfaisantes, voire à l'instabilité, si v sort de cette plage. Afin de conserver le même niveau de performances, quelle que soit la plage de fonctionnement considérée, les 3 gains du correcteur PIQ doivent être adaptés en temps-réel. Leur loi d'adaptation est synthétisée au moyen de la fonction de Lyapunov :

$$V = \frac{(v - v_d)^2}{2} + c \left(\frac{(k_1 - \hat{k}_1)^2}{2\gamma_1} + \frac{(k_2 - \hat{k}_2)^2}{2\gamma_2} + \frac{(k_3 - \hat{k}_3)^2}{2\gamma_3} \right) \quad (1.29)$$

Dans l'expression (1.29), les 3 variables k_i désignent les valeurs des gains du correcteur PIQ qui confèrent à l'asservissement le niveau de performance attendu. Ces 3 valeurs dépendent de la plage de fonctionnement sur laquelle se trouve le système, donc de a et de b . La valeur de ces 2 paramètres n'étant ni parfaitement connue, ni constante, les 3 variables k_i sont inconnues et variables dans le temps. Ce sont les gains idéaux qu'il faudrait utiliser dans le correcteur PIQ. Les gains effectivement utilisés dans le correcteur PIQ sont notés $\hat{k}_i$ dans l'expression (1.29). Leur loi d'évolution est construite en suivant la méthodologie présentée à la page 59 : la fonction de Lyapunov (1.29) est tout d'abord dérivée. Dans l'expression de $\dot{V}$, la variable de commande u est remplacée par la loi PIQ avec les gains $\hat{k}_i$. La loi $\dot{\hat{k}}_i$ d'évolution des gains est alors construite

pour assurer que $\dot{V}$ est négative et que le théorème de LaSalle assure que la vitesse v du véhicule converge vers sa consigne v_d . Enfin, les paramètres c et γ_i apparaissant dans (1.29) et peuvent être utilisés comme des degrés de liberté permettant de régler les lois $\hat{k}_i$ d'adaptation des gains. La stabilité de l'asservissement de vitesse est alors assurée : puisque le contrôleur PIQ à gain adaptatif impose, par construction, que la fonction de Lyapunov (1.29) est décroissante, alors v ne peut pas diverger indéfiniment de v_d . Le schéma-bloc correspondant à cet asservissement de vitesse est représenté sur la figure 1.22.

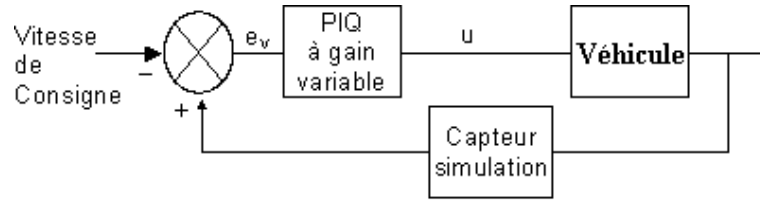


FIG. 1.22 – Commande en vitesse

Les performances de la loi de commande proposée ont été validées sur des simulations où la vitesse de consigne v_d est augmentée par palier, depuis 8 m/s jusqu'à 20 m/s , avec des incréments de 3 m/s . Tout d'abord, sur le 1^{er} palier, ces performances sont comparées à celles obtenues avec un correcteur PID à gains fixes. Il apparaît que le terme quadratique du correcteur PIQ permet d'obtenir des réponses sans dépassement plus rapides qu'avec le correcteur PID, et que l'élément anti wind-up prend correctement en charge les saturations. Ensuite, lors des changements de palier successifs, les performances du contrôleur PIQ restent similaires, ce qui montre que l'adaptation des gains du correcteur permet de suivre efficacement la vitesse de consigne, quelles que soient les conditions expérimentales.

Ensuite, comme annoncé initialement, la seconde étape dans la synthèse de la loi de commande longitudinale consiste à spécifier la vitesse de consigne v_d pour que l'écart entre les véhicules du convoi réponde aux attentes. Plusieurs consignes v_d , de complexité croissante, ont été successivement considérées :

- dans un premier temps, l'expression de v_d a été construite comme suit :

$$v_d = v_p + k \delta \quad (1.30)$$

- * v_p désigne la vitesse du véhicule précédent. C'est la consigne en vitesse qui est attendue lorsque les véhicules du convoi sont dans la configuration désirée.
- * cette consigne de vitesse "naturelle" est altérée par la variable δ pour forcer les éléments du convoi à converger vers cette configuration désirée. Le gain k permet de donner plus ou moins de poids à cette altération. L'expression de δ est donnée par :

$$\delta = \Delta x - (x_0 + h v) \quad (1.31)$$

- Δx désigne la distance inter-véhicule à l'instant courant

- $(x_0 + h v)$ correspond à la distance inter-véhicule souhaitée, qui est une consigne hybride mêlant un écart en distance et un écart temporel : la distance minimale à respecter en toutes situations entre 2 véhicules consécutifs est x_0 . Cette distance minimale est augmentée, pour des raisons de sécurité, de la distance parcourue par le véhicule (qui se déplace à la vitesse v) pendant une durée h .
- la vitesse de consigne (1.30) ne prend en compte que les distance et vitesse relatives avec le véhicule précédent. Par conséquent, comme pour toutes les lois de commande longitudinale présentées jusqu'à présent, le convoi est régulé de proche-en-proche : la vitesse de chaque véhicule du convoi n'est déterminée que par l'état du véhicule qui le précède. Avec cette approche, si le véhicule de tête change d'allure, alors les autres véhicules ne réagissent pas simultanément mais en cascade : le véhicule 2 perçoit en premier le changement d'allure du véhicule de tête, et modifie en conséquence sa vitesse, puis le véhicule 3 perçoit le changement d'allure du véhicule 2 et modifie sa propre vitesse, etc. Un effet d'accordéon peut donc transitoirement être observé sur le convoi. Pour supprimer cet effet, qui peut poser des problèmes dans le cas de longs convois, il faut que chaque élément du convoi ait connaissance de la vitesse du véhicule de tête. Si le système de communication inter-véhicules permet la transmission de cette information, alors celle-ci peut être prise en compte pour la régulation longitudinale de chaque véhicule en modifiant la vitesse de consigne (1.30) comme suit :

$$v_d = (v_p + k_t (v_t - v)) + k \delta \quad (1.32)$$

où v_t désigne la vitesse du véhicule de tête. Lorsque le convoi est parfaitement régulé, c'est-à-dire que la distance inter-véhicules est celle souhaitée (i.e. $\delta = 0$) et que tous les véhicules du convoi se déplacent à la même vitesse (i.e. $v = v_p = v_t$), alors la vitesse de consigne v_d est égale à la vitesse v_p du véhicule en amont, comme précédemment. Par contre, si à partir de ces conditions, le véhicule de tête change d'allure, alors la vitesse de consigne v_d est immédiatement altérée par la quantité $(v_t - v)$ pour accélérer ou freiner le véhicule, avant même que le véhicule précédent ait modifié sa propre vitesse v_p . De la sorte, tous les véhicules du convoi peuvent réagir simultanément à un changement d'allure du véhicule de tête, ce qui permet de réduire les effets d'accordéon. Le gain k_t permet de pondérer la prise en compte de la vitesse du véhicule de tête par rapport à la vitesse du véhicule précédent.

- L'objectif de régulation longitudinale, spécifié par (1.31), est une consigne hybride constituée d'une distance x_0 à laquelle est ajoutée une distance supplémentaire correspondant à un écart temporel de durée h . Pour améliorer les performances de régulation, il est proposé dans [134] de modifier en temps-réel la durée h , en fonction de la configuration dans laquelle se trouve le convoi. La loi d'adaptation proposée est la suivante :

$$h = h_0 - c_h (v_p - v) \quad (1.33)$$

* h_0 est l'écart temporel souhaité lorsque le convoi est idéalement régulé.

- * lorsque la vitesse v du véhicule suiveur est supérieure à la vitesse v_p du véhicule précédent, alors il peut exister à court terme un risque de collision. Dans cette situation, la loi d'adaptation (1.33) augmente la consigne d'écart temporel h (puisque le gain c_h est positif) pour contraindre le véhicule suiveur à ralentir, et ainsi éliminer les risques potentiels de collision. Ensuite, au fur et à mesure que le véhicule ralentit, la consigne d'écart temporel revient vers sa valeur nominale h_0 .
- * à l'inverse, lorsque la vitesse du véhicule v suiveur est inférieure à la vitesse v_p du véhicule précédent, la loi d'adaptation (1.33) diminue la consigne d'écart temporel h pour contraindre fortement le véhicule suiveur à accélérer, et ainsi respecter au plus vite les objectifs de régulation longitudinale. Au fur et à mesure que le véhicule accélère, la consigne d'écart temporel revient une nouvelle fois vers sa valeur nominale h_0 .
- De même, toujours dans le souci d'améliorer les performances de régulation, il est proposé dans [134] de modifier également la valeur du facteur de pondération k intervenant dans l'expression de la vitesse de consigne (1.30) et (1.32), en fonction de la configuration courante du convoi. La loi d'adaptation proposée est la suivante :

$$k = c_k + (k_0 - c_k) e^{-\tau \delta^2} \quad (1.34)$$

- * lorsque l'écart longitudinal entre les véhicules est proche de la valeur souhaitée, ce qui correspond à δ proche de zéro, alors la loi d'adaptation (1.34) donne au facteur de pondération k la valeur nominale k_0 . Celle-ci est en général choisie faible : de la sorte, la vitesse de consigne v_d est majoritairement la vitesse du véhicule précédent (éventuellement altérée par la vitesse du véhicule de tête), ce qui permet d'éviter les à-coups dans la commande du véhicule suiveur.
- * à l'inverse, lorsque l'écart longitudinal entre les véhicules est différent de la valeur souhaitée, ce qui correspond à $|\delta| \gg 0$, alors la loi d'adaptation (1.34) donne au facteur de pondération k la valeur d'urgence c_k . Celle-ci est choisie élevée pour que le calcul de la vitesse de consigne v_d prenne principalement en compte cet écart longitudinal anormal, et permette de le ramener le plus rapidement possible vers la valeur attendue.

Dans tous les cas, les vitesses de consigne v_d calculées ci-dessus sont imposées à chaque véhicule du convoi au moyen de la loi PIQ anti wind-up adaptative, décrite précédemment et représentée sur la figure 1.22. De nombreux scénarii de conduite en convoi ont été envisagés en simulation. Celles-ci montrent clairement l'intérêt de la prise en compte de la vitesse du véhicule de tête lorsque la communication inter-véhicules le permet, ainsi que l'intérêt de choisir un écart temporel h et un facteur de pondération k adaptatifs, tant au niveau de la sécurité (réaction rapide en cas de risque de collision), que des performances de régulation (convergence rapide vers la consigne désirée) et du confort pour les passagers (limitations des jerks (dérivées de l'accélération)).

En conclusion, les résultats présentés en simulation montrent que les attentes d'une application de conduite en convoi sont satisfaites, excepté lorsque les retards purs inclus dans la dynamique du véhicule sont importants : pour des retards purs n'excédant

pas 50 ms , le contrôleur PIQ anti wind-up adaptatif parvient à réguler de manière satisfaisante la vitesse des véhicules du convoi. Il n'en est malheureusement plus de même si ces retards dépassent les 200 ms .

Pour adresser ces cas particuliers, une seconde approche de commande est proposée dans [133]. La loi de commande longitudinale est alors développée, non plus sur la base du modèle linéarisé (1.28), mais sur un modèle dynamique non-linéaire, prenant en compte la motorisation et les éléments induisant des retards. Un prédicteur dédié à cette application est tout d'abord construit (car les prédicteurs classiques, tels que le prédicteur de Smith ne peuvent pas être adaptés) et alimente la loi de commande synthétisée selon une approche *Backstepping*, voir [133]. Les différentes vitesses de consigne v_d envisagées précédemment, avec ou sans prise en compte du véhicule de tête, avec écart temporel h et facteur de pondération k adaptatifs ou non, peuvent alors être imposées par ce nouveau correcteur, et ainsi permettre la conduite en convoi des véhicules en dépit des larges retards purs présents dans leur dynamique. Là encore, ces résultats théoriques ont été éprouvés sur un ensemble de simulations.

Enfin, des comptes-rendus d'expérimentations en vraie grandeur peuvent être trouvés dans les rapports techniques [131] et [117] du programme PATH. Les résultats expérimentaux sont conformes aux résultats de simulations mentionnés ci-dessus. Par exemple, pour des véhicules dont la dynamique ne présente pas de large retards purs, les erreurs longitudinales obtenues avec un contrôleur PIQ lors de tests de sécurité (décélération de 3 m/s^2 du véhicule de tête) restent inférieures à 50 cm , ce qui garantit l'absence de collision.

1.4.3 Communication ouverte à l'ensemble du convoi

1.4.3.1 Communication utilisée pour des commandes adaptatives

Les travaux présentés dans [9] et [10] concernent la commande longitudinale de poids lourds pour une application de conduite en convoi. Le comportement de ces véhicules est représenté par un modèle dynamique. Malheureusement, les paramètres de tels modèles sont d'une part mal connus, et de surcroît peuvent varier significativement pendant l'évolution des véhicules. Par exemple, dans le cas d'un convoi de poids lourds, leurs coefficients aérodynamiques varient en fonction de la distance séparant les véhicules.

Pour estimer correctement les paramètres fixes du modèle de véhicule et suivre l'évolution des paramètres variables, une commande adaptative à modèle de référence est tout d'abord proposée. Le schéma-bloc correspondant à cette approche MRAC (Model Reference Adaptive Control) est représenté sur la figure 1.23.

Le principe général consiste à exploiter les mesures effectuées sur le système réel pour estimer au mieux les paramètres du modèle et actualiser celui-ci. Puis, les erreurs entre les sorties mesurées sur le système réel et celles calculées sur le modèle de référence actualisé sont prises en compte pour adapter les gains du contrôleur en fonction de l'évolution du modèle du système. Les principaux paramètres du modèle dynamique actualisés par le schéma MRAC sont la masse du véhicule, la pente de la route, les

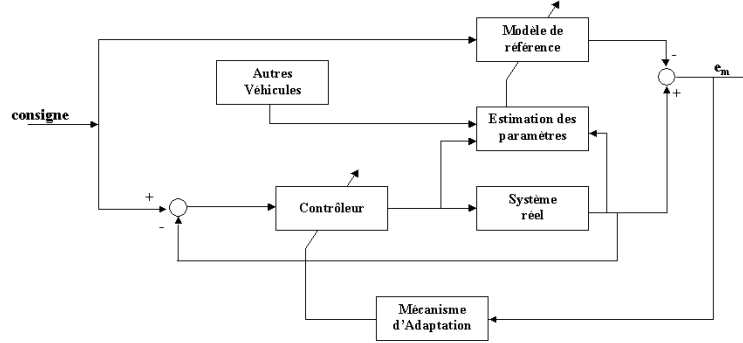


FIG. 1.23 – Conventionnel MRAC avec ajustement du modèle de référence

résistances liées au contact avec le sol et à l'aérodynamisme.

Dans une approche MRAC conventionnelle, comme celle décrite sur la figure 1.23, la consigne de régulation est fixe. Cependant, pour l'application considérée, l'évolution du modèle des véhicules peut faire que cette consigne devienne inatteignable (par exemple, suite à une augmentation de la pente de la route, le véhicule le plus lourd peut avoir des difficultés à maintenir l'écart longitudinal attendu), ce qui se traduit par une saturation de la commande. Aussi, il est proposé dans [9] de modifier légèrement le schéma MRAC pour adapter également la consigne en fonction des paramètres estimés du modèle des véhicules. Le nouveau schéma-bloc est représenté sur la figure 1.24.

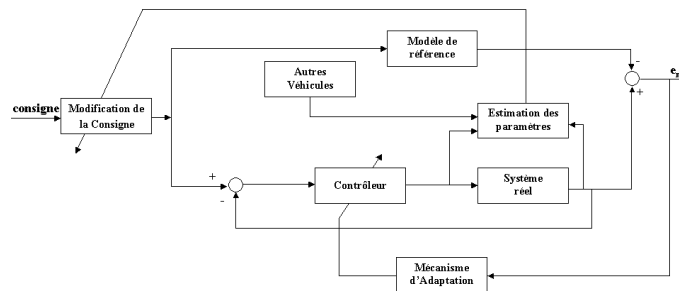


FIG. 1.24 – MRAC modifié

Concrètement, tous les éléments du convoi transmettent au véhicule de tête les paramètres estimés de leur modèle. Au niveau du véhicule de tête, les performances limites de tous les poids lourds du convoi peuvent alors être évaluées, et une consigne de régulation atteignable par tous les véhicules peut être calculée. Cette consigne actualisée est alors transmise à tous les éléments du convoi, ce qui permet de garder les commandes dans des plages raisonnables, loin des saturations.

Cette approche a été évaluée au travers de simulations. Le cas de figure considéré est un convoi de 2 poids lourds circulant à 90 km/h. Le contrôleur utilisé au sein

du schéma MRAC modifié (figure 1.24) est un correcteur PIQ (Proportionnel Intégral Quadratique), dont l'objectif est de réguler à zéro une combinaison linéaire de la vitesse relative entre les 2 véhicules et de l'erreur entre les écarts longitudinaux courant et souhaité.

Les simulations présentées permettent d'évaluer les avantages apportés par le schéma MRAC modifié. D'une part, les valeurs des paramètres du modèle dynamique des véhicules, si elles étaient initialement légèrement erronées, sont affinées au fur et à mesure du déplacement du convoi. Le réglage des gains du correcteur PIQ, et par conséquent les performances de régulation, peuvent alors être améliorés. L'intérêt de cette adaptation des gains du correcteur est bien sûr encore plus évident lors de variations des paramètres du véhicule ou de l'inclinaison de la route. D'autre part, la modification en ligne de la consigne de régulation permet effectivement d'éviter toute saturation des commandes du véhicule suiveur, comme attendu. Dans les simulations présentées, l'erreur longitudinale reste inférieure à 20 *cm*.

1.4.3.2 Communication utilisée pour enrichir l'objectif de régulation

Dans les différentes applications de conduite en convoi présentées jusqu'à présent, le positionnement du véhicule suiveur par rapport au véhicule précédent était évalué, soit par mesures relatives, soit par communication du véhicule précédent vers le véhicule suiveur. Cependant, avec ces seules informations, la commande du convoi ne peut être qu'une commande de proche-en-proche : chaque véhicule a pour objectif de s'asservir sur le véhicule directement devant lui.

Dans le cas où le convoi est formé de très nombreux véhicules, cette approche peut malheureusement mener à un comportement global du convoi totalement insatisfaisant : même si entre 2 véhicules consécutifs les performances de régulation sont toujours respectées, l'accumulation des petites erreurs d'asservissement successives peut faire que le comportement des véhicules de queue de convoi ne corresponde pas aux attentes. C'est notamment le cas lorsque le système de localisation relative des véhicules est peu précis et impose par conséquent de choisir des performances de régulation lâches : les erreurs d'asservissement longitudinal n'étant pas négligeables, leur accumulation le long du convoi peut induire des oscillations tout à fait perceptibles des véhicules de queue. Et même dans le cas où le système de localisation relative est précis, une commande de proche-en-proche induit nécessairement un phénomène d'accordéon lorsque le véhicule de tête change son allure : en effet, ce changement d'allure est d'abord perçu et pris en compte par le véhicule 2. Cela permet au véhicule 3 de percevoir à son tour le changement d'allure du véhicule de tête et de le prendre en compte, et ainsi de suite. Cette réaction en cascade fait que lorsque le dernier véhicule perçoit le changement d'allure, alors le convoi s'est, soit allongé (si le véhicule de tête a accéléré), soit raccourci (s'il a ralenti).

Pour éviter de tels phénomènes, il faut envisager des objectifs de régulation longitudinale qui ne se limitent pas à une régulation de l'erreur relative entre 2 véhicules consécutifs, mais qui intègrent également des grandeurs permettant de caractériser l'état global du convoi. Cependant, pour mettre en œuvre de tels objectifs, il faut que

chaque véhicule, outre sa localisation relative par rapport au véhicule précédent, qui est bien sûr indispensable, ait également connaissance de la localisation de tout ou partie des autres éléments du convoi. La seule possibilité pour que chaque véhicule accède à de telles informations est qu'une communication ouverte à l'ensemble du convoi ait été mise en place.

Dans les lois de commande longitudinales étudiées jusqu'à présent, la seule à envisager un objectif de régulation autre que de proche-en-proche est celle décrite à la page 83 : cette approche, développée dans le cadre du programme PATH, suggère d'intégrer la vitesse du véhicule de tête dans l'objectif de régulation de chaque élément du convoi, ce qui nécessite la mise en place d'une communication depuis le véhicule de tête vers tous les membres du convoi. L'intérêt principal de cette approche, discuté plus en détail à la page 83, est qu'elle permet à chaque élément du convoi de réagir simultanément à un changement d'allure du véhicule de tête, et par conséquent réduit significativement l'effet d'accordéon mentionné ci-dessus.

Un autre objectif de régulation étendu, prenant en compte l'état de plusieurs véhicules du convoi, est proposé dans [137], toujours pour une application de conduite en convoi de véhicules de tourisme. L'objectif de régulation inclut des éléments relatifs bien sûr au véhicule précédent, mais aussi des éléments relatifs au véhicule immédiatement derrière. La loi de commande longitudinale est alors développée pour, au niveau de chaque membre du convoi, réguler à la fois l'écart avec le véhicule en amont et l'écart avec le véhicule en aval. L'intérêt de cette régulation simultanée est qu'elle permet de réduire les distances entre les véhicules tout en continuant de garantir la sécurité du convoi.

Le comportement des véhicules est décrit, dans un premier temps, par un modèle dynamique très détaillé, prenant en compte les caractéristiques du moteur, de la transmission, du train directeur et des freins. Ce modèle est utilisé pour réaliser les simulations, afin qu'elles reflètent le plus possible le comportement réel des véhicules. Par contre, pour la synthèse de la loi de commande, des simplifications sont apportées, de sorte que le modèle peut alors être présenté sous la forme non-linéaire donnée ci-dessous :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= g(v_i, y_i) \\ y_i &= \eta(v_i, u_i) \end{aligned} \tag{1.35}$$

x_i et v_i désignent la position et la vitesse du $i^{\text{ième}}$ véhicule du convoi, y_i est un vecteur décrivant l'état interne du moteur de ce véhicule, et u_i est la grandeur de commande pour ce véhicule, homogène à une accélération. Enfin, g et η sont deux fonctions non-linéaires dans lesquelles interviennent les paramètres dynamiques des véhicules.

La consigne de régulation longitudinale entre 2 véhicules consécutifs est une consigne hybride formée d'un écart en distance et d'un écart temporel. Ainsi, entre les véhicules i et $i - 1$, la consigne de régulation est donnée par :

$$S_{di} = h_2 v_i + h_3 \tag{1.36}$$

où h_3 est l'inter-distance minimale à respecter en toutes situations, à laquelle est ajoutée la distance parcourue par le véhicule i pendant la durée h_2 . Comme annoncé plus haut, la loi de commande longitudinale développée dans [137] a pour objectif de réguler simultanément les erreurs entre d'une part le véhicule i et le véhicule $i - 1$, et d'autre part entre le véhicule i et le véhicule $i + 1$. Ces 2 erreurs, notées respectivement ε_i et ε_{i+1} sont définies par :

$$\varepsilon_i = x_{i-1} - x_i - l_i - S_{di} \quad (1.37)$$

où l_i désigne la longueur du $i^{ième}$ véhicule. Les consignes S_{di} et $S_{d(i+1)}$ et les erreurs ε_i et ε_{i+1} sont représentées sur la figure 1.25.

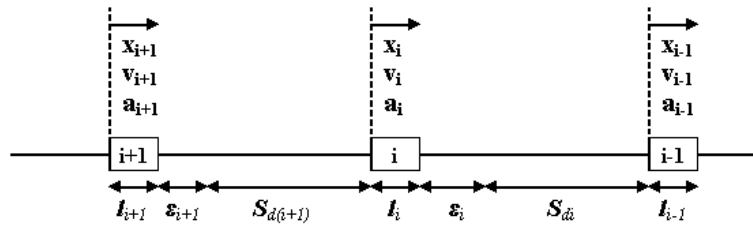


FIG. 1.25 – Notations utilisées dans l'article [137]

La synthèse de la loi de commande longitudinale repose sur une approche linéarisation exacte : une commande auxiliaire z_i est tout d'abord définie par :

$$z_i = g(v_i, y_i) = g(v_i, \eta(v_i, u_i)) \quad (1.38)$$

Il est ensuite prouvé que le difféomorphisme défini par (1.38) est inversible : pour une valeur donnée de z_i , il existe une unique solution u_i notée $u_i = \varphi(v_i, z_i)$. Par conséquent, le changement de commande (1.38) permet de linéariser de manière exacte le modèle (1.35). Il est alors aisé, en utilisant les outils de l'Automatique linéaire, de synthétiser une commande auxiliaire z_i permettant de réguler simultanément ε_i et ε_{i+1} , puis en utilisant la fonction φ , d'en déduire l'expression non-linéaire de la commande u_i à appliquer concrètement sur les véhicules.

Cette approche a été validée au travers de simulations, où le comportement des véhicules n'était bien sûr pas représenté par le modèle simplifié (1.36) utilisé pour la synthèse de la loi de commande, mais par le modèle dynamique le plus détaillé. Sur un cas d'études où la vitesse du véhicule de tête passe de 0 m/s à 25 m/s en 20 s , l'erreur longitudinale maximale entre les véhicules du convoi reste inférieure à 8 cm . Ce très faible niveau d'erreur permet de réduire la consigne d'inter-distance entre les véhicules sans pour autant altérer la sécurité du convoi, ce qui était l'objectif recherché. Ensuite, dans l'optique de la mise en œuvre pratique de cette approche, il est à remarquer que les communications inter-véhicules ne sont pas absolument indispensables : en effet, au niveau de chaque véhicule la loi de commande longitudinale n'utilise que les positions et vitesses relatives de celui-ci par rapport aux véhicules immédiatement devant et immédiatement derrière. Il est donc tout à fait possible d'envisager de n'utiliser que des systèmes de localisation relative embarqués sur chaque véhicule, si tant est qu'ils

puissent fournir ces mesures avec la précision attendue. Enfin, un dernier intérêt à réguler simultanément les erreurs avec les véhicules en amont et en aval est qu'il est possible de fournir une preuve théorique de la stabilité du convoi, en utilisant pour cela une approche reposant sur des fonctions de Lyapunov.

1.4.3.3 Communication utilisée pour la supervision du convoi

Dans tous les travaux décrits jusqu'à présent, le convoi est toujours supposé formé, avec des erreurs longitudinales entre les véhicules proches de la consigne. Les différentes lois de commande considérées jusqu'ici sont donc focalisées exclusivement sur les aspects régulation (régulation latérale à la section 1.3 et régulation longitudinale à la section 1.4) pour lesquels de hautes performances sont recherchées, dans le cadre de telle ou telle application. Les aspects initialisation (i.e. formation du convoi) et maintenance (i.e. insertion/désinsertion d'un véhicule dans le convoi, fusion/séparation de 2 convois, ...) ne sont pas considérés, car ils proposent des problèmes très différents de celui de la régulation en situation nominale, et requièrent donc des lois de commande spécifiques.

Par conséquent, pour adresser dans sa globalité une application de conduite en convoi, un module de supervision doit être envisagé afin de gérer les commutations entre la loi de régulation nominale et les lois de commande gérant les situations exceptionnelles. Une communication ouverte à l'ensemble du convoi est alors la configuration qui offre le plus de potentialités au module de supervision, lui permettant d'être complètement informé sur l'état du convoi et de transmettre immédiatement ses directives aux véhicules.

Plusieurs modules de supervision ont été envisagés dans le cadre du programme PATH, pour des applications de conduite en convoi de véhicules de tourisme sur autoroute. Dans [37] et [128], les situations exceptionnelles prises en charge par le superviseur sont "rejoindre le convoi", "quitter le convoi" et "changer de voies", la commutation entre les lois de commande dédiées à ces tâches étant réalisée en fonction de l'état du convoi. Dans [70] et [46], la commutation est assurée par un contrôleur hybride, basé sur une machine d'état.

Enfin, dans [42], les opérations de fusion de 2 convois, de scission d'un convoi et de changement de voies sont chacune réalisées au moyen de plusieurs techniques de commande, choisies en fonction de l'état du (*ou des*) convoi(s) et de l'avancement de l'opération en cours. Par exemple, pour la fusion de 2 convois, la loi de commande nominale permettant de réaliser cette opération est une loi PID-DD (Proportionnelle Intégrale Dérivée Dérivée Seconde) régulant l'écart entre les 2 véhicules de tête des convois. Cependant, en fonction de l'erreur longitudinale et de la vitesse relative entre les deux groupements de véhicules, la commande du second convoi peut commuter vers un maintien de sa vitesse, ou une régulation sur la vitesse du premier convoi, ou la régulation sur une vitesse optimisant l'approche du second convoi vers le premier. La commutation entre chacun de ces modes de fonctionnement est progressive et se base sur des fonctions sigmoïdes.

1.4.4 Bilan

Dans la conclusion partielle présentée à la section 1.3.4, à l'issue de la partie consacrée à la commande latérale, il avait été proposé de représenter le comportement des véhicules par un modèle cinématique non-linéaire, et de prendre explicitement en compte les non-linéarités de ce modèle dans les lois de commande par des approches de type linéarisation exacte. Plus précisément, il avait été envisagé de s'appuyer sur le fait que de tels modèles peuvent être convertis sous une forme chaînée, dont l'un des intérêts, entre autres, est de permettre d'adresser de manière complètement indépendante les régulations latérale et longitudinale. A l'issue de cette partie consacrée à la commande longitudinale, il apparaît que ces choix, avancés initialement pour la commande latérale, sont également tout à fait cohérents et judicieux vis-à-vis de la commande longitudinale.

En effet, toutes les lois de commande longitudinale étudiées dans cette section 1.4 ont pour objectif de réguler une distance euclidienne entre 2 véhicules consécutifs. Les différences sur ce point tiennent juste à ce que la consigne de régulation est parfois explicitement un écart en distance, ou une distance correspondant à un écart temporel ou encore une consigne hybride mêlant ces 2 types d'écarts. La régulation d'une distance euclidienne est tout à fait naturelle lorsque les trajectoires suivies présentent une courbure faible, ce qui est le cas pour la très grande majorité des applications considérées dans la section 1.4, puisqu'il s'agit généralement d'une conduite en convoi de véhicules de tourisme ou de poids-lourds sur des autoroutes.

Par contre, si les trajectoires présentent des courbures importantes, ce qui est le cas dans l'application considérée ici, puisque dans un contexte urbain les véhicules peuvent avoir à négocier un virage à 90° sur une intersection, alors la régulation de la distance euclidienne peut conduire à des comportements qui ne sont plus du tout naturels : par exemple, si 2 véhicules se suivent en circulant exactement à la même vitesse, alors leur inter-distance euclidienne décroît dès que le premier aborde une partie courbe (car l'inter-distance euclidienne est alors évaluée en "coupant" la courbe décrite par les véhicules). Aussi, si la régulation longitudinale était basée sur cette grandeur, alors le second véhicule ralentirait : un phénomène d'accordéon serait observé, qui ne correspond bien sûr pas aux attentes.

Par conséquent, pour l'application visée dans ce mémoire, un objectif de régulation prenant explicitement en compte la courbure des trajectoires suivies doit tout d'abord être défini. La seule possibilité pour cela est de travailler sur un modèle de véhicule intégrant cette non-linéarité. Aussi, parmi les techniques de commande présentées dans cette section 1.4, celles basées sur une linéarisation tangente du modèle des véhicules doivent être écartées.

Enfin, dans un contexte urbain comme celui considéré ici, les véhicules sont de dimensions modestes, circulent à des vitesses limitées, sur des sols asphaltés bien adhérents, si bien que les phénomènes dynamiques ne sont pas prépondérants dans leur comportement, comme ils peuvent l'être à l'inverse dans le cas de poids-lourds circulant sur autoroute. Par conséquent, pour les applications envisagées ici, la descrip-

tion du comportement longitudinal des véhicules par un modèle cinématique, plutôt que dynamique, paraît raisonnable, comme cela avait été le cas précédemment pour le comportement latéral.

Aussi, certaines solutions proposées dans la section 1.4 pour gérer spécifiquement des aspects dynamiques, comme par exemple les commandes anticipatives et les commandes adaptatives décrites respectivement aux sections 1.4.2.3 et 1.4.3.1, n'ont pas à être mises en œuvre dans le cas traité. A l'inverse, puisque la représentation retenue pour décrire le comportement des véhicules est un modèle cinématique non-linéaire, une approche offrant de nombreuses potentialités, tant pour la synthèse de la commande latérale que longitudinale, est la technique de linéarisation exacte qui exploite le fait que de tels modèles peuvent être convertis sous une forme chaînée. Le principe et les avantages d'une telle approche (découplage des performances latérale et longitudinale, utilisation des outils de l'Automatique linéaire tout en prenant en compte les non-linéarités du système, ...) sont détaillés à la section 1.3.2 (page 60). Cette approche est par conséquent utilisée au Chapitre II, pour la synthèse des commandes latérale et longitudinale.

En dehors de l'approche retenue pour synthétiser la loi de commande longitudinale, le nombre de véhicules pris en compte dans l'objectif de régulation peut également être discuté. Les limites d'une commande longitudinale de proche-en-proche, où chaque véhicule est asservi exclusivement sur le véhicule qui le précède, ont été présentées à la section 1.4.3.2 (page 87) : des effets d'accordéon lors des changements d'allure du véhicule de tête, ainsi que des oscillations sur les véhicules de queue de convoi induites par l'accumulation des erreurs d'asservissement, sont dans ce cas inévitablement observés, et ce d'autant plus que le convoi est long. De tels phénomènes peuvent être réduits, voire éliminés, si l'objectif de régulation longitudinale prend en compte l'état d'autres véhicules dans le convoi, mais cela oblige à mettre en place une communication globale, pour que chaque véhicule puisse accéder aux informations concernant ces autres éléments du convoi.

Pour l'application de conduite en convoi en milieu urbain considérée ici, le nombre de véhicules susceptibles d'intégrer le convoi peut être élevé. Par conséquent, le parti a été pris de mettre en place une communication globale. Les travaux présentés dans [132] et [134], et détaillés à la page 83, montrent l'intérêt de tout particulièrement prendre en compte l'état du véhicule de tête dans l'objectif de régulation : le choix de la vitesse de consigne (1.32) permet de limiter significativement les effets d'accordéon lors des changements d'allure du véhicule de tête. Dans l'objectif de régulation longitudinale proposée au Chapitre II, le véhicule de tête est également pris en compte, et son état est incorporé d'une manière permettant de surcroît de limiter les oscillations en queue de convoi. Dans les travaux présentés dans [137] et détaillés à la page 88, il est également proposé de prendre en compte l'état du véhicule immédiatement derrière. Cette piste n'est pas utilisée ici, mais pourrait à l'avenir être considérée, en particulier pour apporter des preuves de stabilité globale du convoi.

Enfin, la mise en place d'une communication globale entre les véhicules offre le

plus de potentialités pour superviser le convoi. Comme mentionné à la section 1.4.3.3, les lois de conduite en convoi nominales doivent être complétées par des modules permettant de réagir aux situations exceptionnelles et de réaliser les opérations de maintenance (insertion/désinsertion d'un véhicule dans le convoi, fusion/scission de convois, ...). L'échange d'informations entre les véhicules et un module de supervision (éventuellement localisé sur l'un des véhicules) apporte clairement le plus de possibilités et de sécurité pour commuter entre les différentes tâches. Le développement de ce module est abordé au Chapitre III.

1.5 Stratégie adoptée pour la réalisation d'un convoi autonome

Le tour d'horizon réalisé dans ce Chapitre I permet de situer les travaux développés dans ce manuscrit et de motiver les choix effectués. En guise de conclusion, cette section rappelle tout d'abord les objectifs du convoi autonome développé. Puis, une modélisation de celui-ci est proposée. Ensuite, une stratégie de commande, en accord avec la modélisation, est avancée. Enfin, la mise en œuvre pratique pour réaliser le convoi est donnée.

1.5.1 Objectifs fixés

Le présent manuscrit traite de la commande en convoi de véhicules urbains. Un tel convoi est destiné à circuler en centre-ville pour le transport d'individus. Comme dans la plupart des convois, un écart entre les différents véhicules doit être respecté. De plus, le convoi étant destiné à transporter des passagers, l'allure de fonctionnement doit être confortable et ne présenter aucun risque. Enfin, le convoi doit être totalement autonome : aucune intervention humaine ne doit être nécessaire pour assurer le bon comportement du peloton, l'élément de tête étant guidé automatiquement sur un chemin prédéfini, pouvant contenir de fortes courbures, avec une évolution de sa vitesse également déterminée.

1.5.2 Modélisation du véhicule

Il est possible de distinguer plusieurs classes de véhicule, selon leur nature, leurs dimensions, ou leur utilisation.

Ainsi, selon que le véhicule soit électrique ou à combustion, les accès aux différents actionneurs sont différents : par exemple, dans le cas des véhicules à combustion, il peut être nécessaire, pour certaines applications, de prendre en compte la dynamique du dispositif d'arrivée de carburant. Ensuite, la taille et surtout le poids du véhicule sont d'importants facteurs. Un poids-lourd chargé demande plus de temps pour s'arrêter qu'une voiture de golf. Il est donc nécessaire de prendre en compte la dynamique des véhicules les plus imposants. Enfin, l'utilisation du véhicule, dans telle ou telle situation, impose elle-aussi des contraintes. Le transport de passagers doit fixer des accélérations

et décélérations progressives, contrairement aux transports de matériaux robustes qui peuvent subir éventuellement de fortes variations d'accélération.

La représentation mathématique du comportement d'un véhicule, appelée modélisation, constitue une étape essentielle pour la synthèse de la commande, et doit donc être adaptée à la classe de véhicule considérée. Idéalement, le modèle doit refléter le mieux possible le comportement du véhicule. Malheureusement, celui-ci dépend de très nombreux paramètres (vitesse, poids, contact avec le sol, caractéristiques du moteur, nature des freins, aérodynamisme, inclinaison de la route, ...), de sorte que la modélisation peut vite devenir très lourde et engendrer ensuite des développements théoriques d'une grande complexité pour élaborer la commande. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser un compromis, c'est-à-dire de proposer un modèle qui reste simple, tout en représentant de façon satisfaisante le comportement du type de véhicule considéré.

Le premier choix à réaliser consiste à opter entre un modèle cinématique ou un modèle dynamique : un modèle cinématique se base sur la géométrie du véhicule, alors qu'un modèle dynamique s'appuie sur les forces agissant sur ce dernier.

Les modèles cinématiques ne reposant que sur des considérations géométriques, très peu de caractéristiques du robot mobile ont alors à être prises en compte. Ainsi, dans le cas d'une modélisation tricycle, seul l'empattement entre les essieux a besoin d'être connu. A l'inverse, les modèles dynamiques permettent de prendre en compte l'effet de paramètres tels que l'inertie du véhicule ou la nature du contact roue/sol dans le comportement de celui-ci (en effet, un poids-lourd chargé et ce même engin à vide n'ont pas le même comportement). Mais ces paramètres sont souvent difficiles à évaluer avec précision (comme l'inertie), et varient parfois significativement pendant l'évolution du véhicule (comme le contact roue/sol).

La modélisation dynamique est clairement plus complète et plus représentative du système réel. Aussi, il semblerait logique d'adopter cette modélisation. Cependant, les véhicules mis à disposition sont des voitures électriques de faibles dimensions, nommés Cycabs, et appelés à fonctionner en ville (donc à vitesse réduite). Dans ce contexte, l'influence des divers éléments dynamiques n'est pas prépondérante sur le comportement global des véhicules. Par conséquent, une modélisation cinématique, d'une part moins complexe, et d'autre part ne comportant pas de paramètres difficiles à évaluer, est finalement préférée ici pour représenter les véhicules expérimentaux.

Le point suivant consiste à préciser les hypothèses sur lesquelles bâtir le modèle cinématique. L'environnement de travail du véhicule est ici le centre-ville, voire l'agglomération. Ce type d'infrastructure amène de nombreuses particularités, se reflétant sur le comportement du véhicule. Ainsi, le véhicule circule sur des chaussées non-accidentées en asphalte (ou en une matière quasi-similaire) présentant de bonnes conditions d'adhérence. De surcroît, la circulation en centre-ville ne nécessite pas un fonctionnement à vitesse élevée. Dans ces conditions, il apparaît très peu probable que les véhicules glissent ou dérapent. Par conséquent, il est ici tout à fait raisonnable de faire reposer le modèle cinématique des véhicules sur l'hypothèse forte de roulement sans glissement, ce qui permet de conférer une structure assez simple au modèle et intéressante dans l'optique de la synthèse des lois de commande.

Le dernier point concerne le niveau des simplifications apportées sur le modèle des véhicules. Sous l'hypothèse de roulement sans glissement, les modèles de véhicules sont des modèles non-linéaires. Une possibilité, souvent évoquée dans cet état de l'art, consiste à les linéariser autour d'un point de fonctionnement. La synthèse de lois de commande est alors aisée, car tous les outils de l'Automatique linéaire peuvent alors être utilisés. Cependant, comme la linéarisation est une représentation d'un système autour d'un point de fonctionnement, elle ne permet de représenter ce dernier que localement, le comportement du système sur toute sa plage de fonctionnement n'est pas assuré d'être similaire à celui du modèle linéarisé. C'est pourquoi, si la linéarisation du modèle est envisagée, il faut bien s'assurer de son domaine de validité. Pour éviter de telles difficultés, il a été choisi ici de ne pas linéariser et de rester sur un modèle cinématique non-linéaire.

1.5.3 Stratégie de commande employée

Plusieurs approches peuvent être envisagées pour adresser la commande d'un système non-linéaire. Parmi celles-ci, les techniques de linéarisation exacte sont ici privilégiées.

Plus précisément, la propriété que les modèles cinématiques de véhicules peuvent être convertis en systèmes chaînés, est utilisée. Il s'agit d'une conversion exacte : aucune approximation n'est introduite (contrairement à la linéarisation tangente), de sorte que les non-linéarités du modèle cinématiques sont toujours prises en compte. Le grand avantage de cette transformation est qu'elle permet d'adresser de façon complètement indépendante les commandes latérale et longitudinale, et qui plus est, à chaque fois par une approche linéarisation exacte : les comportements latéral et longitudinal du véhicule, après conversion sous forme chaînée, peuvent tous deux être linéarisés de manière exacte. Il est alors possible de concevoir efficacement les lois de commandes correspondantes en s'appuyant pour cela sur les outils de l'Automatique linéaire, avant d'inverser les transformations chaînantes pour en déduire finalement les commandes non-linéaires à appliquer concrètement sur les actionneurs du véhicule.

L'objectif de la commande latérale est d'asservir chaque élément du convoi sur son chemin de référence. Deux stratégies peuvent être envisagées : soit une commande latérale de proche-en-proche, où la consigne latérale pour chaque élément du convoi est le chemin effectué par le véhicule qui le précède, soit une commande latérale globale, où la trajectoire de référence est la même pour tous les éléments du convoi. L'avantage de la première approche est qu'elle ne requiert, sur les véhicules, que des capteurs de localisation relative. Les capteurs de localisation absolue et les communications inter-véhicules ne sont pas nécessaires. Malheureusement, sa grande faiblesse est que les erreurs latérales entre 2 véhicules consécutifs, même si elles sont faibles, se cumulent depuis la tête vers la queue du convoi, si bien que le dernier véhicule du convoi peut finalement décrire une trajectoire très éloignée de celle du véhicule de tête, et même quitter éventuellement la chaussée. Ce phénomène est illustré sur la figure 1.26. Pour ces raisons, la seconde approche a été ici choisie, ce qui impose cette fois aux véhicules d'être équipés d'un système de localisation absolue. La trajectoire de référence est alors

soit connue à l'avance, soit définie en temps-réel par le chemin du véhicule de tête (conduit manuellement), mais dans ce cas une communication du véhicule de tête vers tous les éléments du convoi est alors nécessaire.

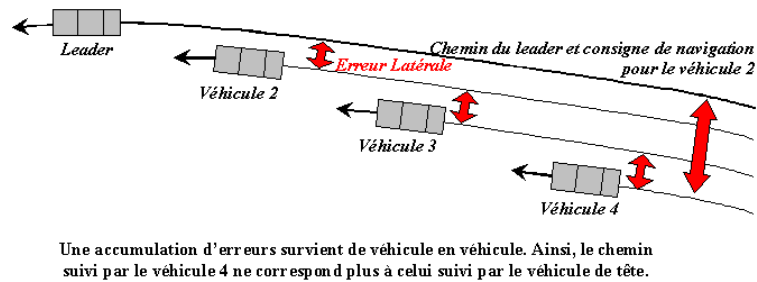


FIG. 1.26 – Accumulation des erreurs latérales avec une commande de proche-en-proche

L'objectif de la commande longitudinale est de réguler l'espacement entre les véhicules du convoi. La consigne longitudinale peut être exprimée soit comme une inter-distance, soit comme un temps relatif entre véhicules de sorte que leur espacement augmente avec la vitesse, soit comme une consigne hybride mêlant une inter-distance et un temps relatif. Etant donné la faible plage de vitesse des véhicules urbains, une inter-distance est ici régulée. Ensuite, pour évaluer cette distance, plusieurs possibilités peuvent être envisagées. La plus classique consiste à réguler la distance euclidienne entre 2 véhicules consécutifs. Cependant, lorsque les trajectoires suivies par les véhicules présentent des courbures élevées, comme cela est fréquent dans les parcours urbains, cette distance n'a plus véritablement de sens physique : par exemple, lors d'un virage à 90°, la distance euclidienne entre les véhicules est évaluée en coupant le virage, et n'est donc plus vraiment représentative de la distance existant entre les véhicules pour les besoins de l'application de conduite en convoi. Par conséquent, la régulation des distances inter-véhicules est ici choisie au sens d'une distance curviligne, calculée le long du chemin de référence. Une telle distance reflète en effet parfaitement l'écart entre les véhicules au sens de l'application de conduite en convoi, y compris lors des portions courbes de la trajectoire de référence.

Ensuite, au-delà de la grandeur physique régulée, plusieurs stratégies de commande longitudinale peuvent également être proposées. Comme précédemment pour la commande latérale, il peut être envisagé, soit une commande longitudinale de proche-en-proche, où chaque véhicule ne se préoccupe que du véhicule qui le précède et est commandé pour maintenir une inter-distance curviligne avec ce dernier, soit une commande longitudinale plus globale, où les inter-distances curvilignes par rapport à plusieurs éléments du convoi sont prises en compte dans l'objectif de régulation de chaque véhicule, de façon à contrôler le convoi comme un ensemble et non comme une succession de paires de véhicules. Les avantages et les faiblesses d'une stratégie de proche-en-proche sont les mêmes pour la commande longitudinale que précédemment pour la commande latérale, à savoir que celle-ci permet de limiter l'équipement des véhicules à

des systèmes de localisation relative, mais qu'en raison de l'accumulation d'erreurs d'asservissement depuis la tête vers la queue du convoi, des oscillations seront perceptibles sur les derniers éléments du convoi. De surcroît, avec cette stratégie, un changement d'allure du véhicule de tête se répercute nécessairement par des changements d'allure en cascade depuis la tête vers la queue du convoi, ce qui donne globalement un effet d'accordéon sur la longueur de celui-ci. Pour ces raisons, la seconde approche est ici préférée. L'objectif de régulation longitudinale de chaque véhicule prend en compte l'inter-distance curviligne avec le véhicule précédent, ce qui est indispensable pour éviter les collisions, mais aussi l'inter-distance curviligne avec le véhicule de tête, de façon à éviter, d'une part les accumulations d'erreur d'asservissement longitudinal, et d'autre part de pouvoir transmettre un changement d'allure du véhicule de tête simultanément à chaque véhicule du convoi, et ainsi éviter le phénomène d'accordéon. Cette stratégie de commande longitudinale impose bien évidemment l'existence d'une communication inter-véhicules, au moins entre le véhicule de tête et les autres éléments du convoi.

Enfin, les lois de commande latérale et longitudinale envisagées ci-dessus permettent le déplacement de véhicules en convoi, mais uniquement lorsque celui-ci se trouve dans une configuration nominale. Pour lui conférer une complète autonomie, les différentes étapes de sa "vie", c'est-à-dire son initialisation, ses évolutions (insertion/désinsertion d'un véhicule, fusion/scission de convois,...), et les arrêts dans un mode confortable ou dans une situation d'urgence, doivent également être considérées. Pour adresser l'ensemble de ces situations qualifiées d'exceptionnelles (par opposition à nominales), deux approches complémentaires sont proposées ici : une partie de ces situations est prise en charge par de simples modifications apportées temporairement aux réglages des lois latérale et longitudinale décrites précédemment, alors que l'autre partie s'appuie sur quelques développements spécifiques. Enfin, un module de supervision, s'appuyant sur les communications inter-véhicules mises en place précédemment pour la régulation, est introduit pour coordonner ces différentes actions.

1.5.4 Mise en œuvre envisagée

Pour pouvoir évaluer expérimentalement les approches proposées ci-dessus, un dispositif expérimental a été mis en place.

Les véhicules expérimentaux sont au nombre de trois. Ce sont des véhicules électriques de faibles dimensions conçus pour les environnements urbains. Ces véhicules sont appelés Cycabs et représentés sur la figure 1.27.

Les approches de commande envisagées, détaillées à la section précédente, requièrent d'une part l'utilisation de systèmes de localisation absolue, et d'autre part la mise en place d'une communication inter-véhicules.

Concernant les systèmes de localisation, l'utilisation de capteurs implantés directement dans la chaussée (comme des balises magnétiques) ou dans l'environnement (comme des balises infra-rouge) n'est pas souhaitée, afin que l'application de conduite en convoi soit aisément portable d'un site vers un autre, et ne défigure pas le paysage urbain. Afin de respecter ces contraintes, deux types de capteurs ont été considérés :



FIG. 1.27 – Véhicule expérimental : Cycab

un système de positionnement satellitaire et un capteur de vision.

Le premier est un capteur RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System) à précision centimétrique. En raison de sa simplicité d'utilisation, c'est le système de localisation principalement utilisé. Cependant, il présente deux défauts majeurs : d'une part son coût prohibitif dans l'optique d'un déploiement sur une large flotte de véhicules, et d'autre part les risques de masquage des signaux satellite par les bâtiments, qui sont bien sûr loin d'être négligeables dans un environnement urbain.

Par conséquent, un capteur de vision monoculaire a également été mis en œuvre. La localisation des véhicules n'est pas déterminée à partir d'amers, telles que les bandes blanches délimitant les voies de circulation, toujours dans un souci d'indépendance de l'application par rapport à l'environnement. Elle repose sur une mise en correspondance de l'image courante par rapport à un jeu d'images-clés tirées d'une séquence vidéo d'apprentissage, pour lesquelles la pose 3D de la caméra a pu être préalablement reconstruite. Ce capteur est complémentaire au capteur RTK-GPS puisqu'il est bas-coût et qu'une forte densité de bâtiments, qui est préjudiciable au capteur RTK-GPS, est cette fois un avantage pour le capteur de vision, puisqu'elle offre un choix plus vaste de points d'intérêt dans l'image, et par conséquent permet une localisation plus précise des véhicules. En contre-partie, ce système de localisation est plus lourd à mettre en œuvre que le capteur RTK-GPS, puisqu'il requiert un équipement informatique conséquent.

Enfin, pour pouvoir offrir de meilleures performances de localisation, voire palier temporairement la défaillance des systèmes de localisation absolue, une fusion de ces données avec celles fournies par des odomètres est à l'étude.

Concernant la communication inter-véhicules, un réseau de communication sans fil de type WiFi est déployé sur tous les éléments du convoi. Ainsi, l'ordinateur de commande équipant chaque véhicule peut recevoir par ce biais les informations en provenance du véhicule précédent et du véhicule de tête, et ainsi mettre en œuvre la loi de commande longitudinale proposée précédemment.

Chapitre 2

Synthèse des lois de commande du convoi en situation standard

Ce chapitre traite de la synthèse des lois de commande permettant de gérer un convoi autonome de véhicules.

Néanmoins, avant de développer ces lois de commande, il est nécessaire de bien se représenter le processus réel à contrôler, à savoir un convoi formé de plusieurs véhicules. Ainsi, la première section décrit sa modélisation, celle-ci reposant sur un modèle cinématique. Ensuite, à partir de celle-ci, les lois de commande sont développées dans les sections suivantes.

Pour la mise en œuvre d'un convoi autonome sur voies rapides, le développement des lois de commande est généralement effectué selon le schéma d'avancement classique, illustré par la figure 2.1, voir par exemple [116]. En premier lieu, seul un module d'avertissement est présent, aucune commande n'est appliquée aux véhicules. En second lieu, le maintien d'un écart entre les éléments formant la flotte est réalisé par le contrôle en accélération. En troisième lieu, la détection des voies de circulation offre les informations nécessaires pour un guidage autonome sur celle-ci. Enfin, des modules de communication avec l'infrastructure, en coopération avec une intelligence artificielle, mènent à une automatisation totale du système de conduite.

Si cette approche semble être bien cohérente pour l'intégration progressive de l'autonomie des voitures, dites grand public, une autre philosophie, plus intuitive, semble mieux adaptée au développement d'un convoi autonome de véhicules urbains, et cette démarche est donc adoptée par la suite.

Tout d'abord, l'autonomie d'un seul véhicule est étudiée. En effet, la navigation d'un élément formant le convoi peut être développée indépendamment des autres éléments. Une fois seulement le guidage latéral autonome d'un unique véhicule accompli, l'interaction avec d'autres véhicules autonomes est adressée au travers de la commande longitudinale. Dans un premier temps, seules les relations entre robots voisins sont considérées : c'est une approche dite locale (ou de proche-en-proche). Cependant, pour parler véritablement de convoi, tous les membres doivent former une unique entité

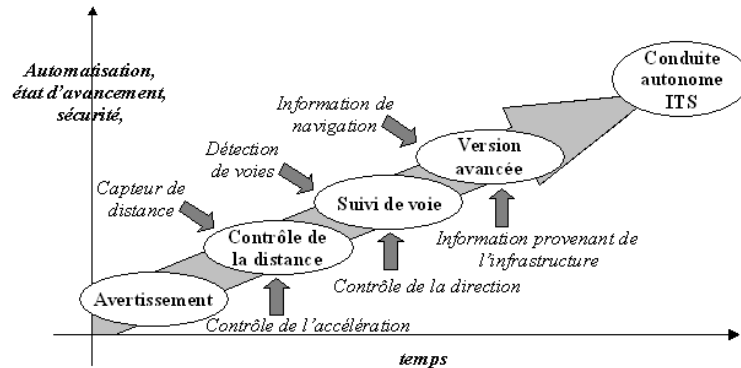


FIG. 2.1 – Démarche classique menant à la voiture autonome [116]

convoi, et non un groupement d'éléments associés deux à deux, ne tenant pas compte du comportement global du peloton. C'est pourquoi, dans un second temps, la commande longitudinale du convoi est étudiée globalement. Les dernières briques concernent les adaptations à réaliser pour que le convoi puisse faire face à toutes les situations susceptibles d'être rencontrées lors d'une application réelle. Ceci est assuré par l'introduction d'un module de supervision. Cette démarche est illustrée par la figure 2.2.

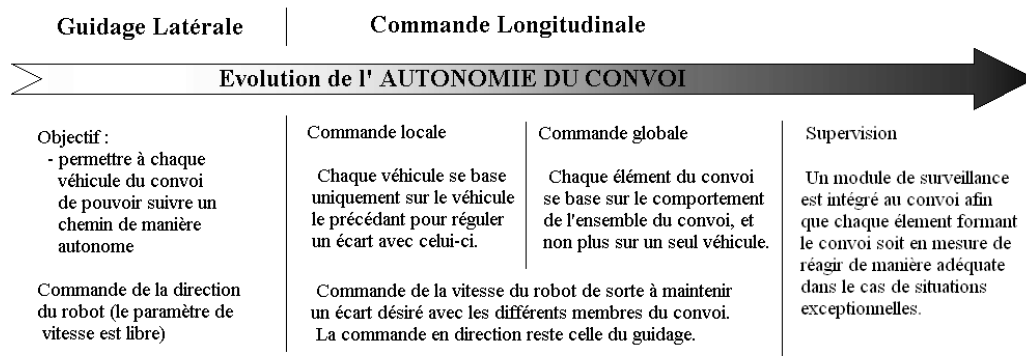


FIG. 2.2 – Démarche adoptée pour la mise en œuvre de la commande du convoi autonome

Par conséquent, dans l'optique présentée, la première section présente la modélisation des véhicules. Les deuxième et troisième sections du chapitre traitent respectivement de la synthèse des lois de commande latérale et longitudinale. Chacune de ces sections est complétée par des simulations venant illustrer les performances des lois de commande obtenues.

Enfin, si les performances décrites sont respectées dans des situations dites "stan-

dards” (ces situations standards correspondent aux états où le convoi est proche des objectifs demandés), des saturations en vitesse et accélération de la commande longitudinale peuvent néanmoins survenir, notamment si les véhicules formant le peloton sont trop éloignés de la consigne. Pour contrer cette difficulté, la dernière section est consacrée à la gestion des saturations en vitesse et en accélération. Ces fonctionnalités seront complétées par le module de Supervision, présenté au Chapitre III.

2.1 Modélisation cinématique tricycle des véhicules formant le convoi

Afin de synthétiser les commandes appliquées au convoi, il est nécessaire de disposer d’un modèle de ce dernier. La modélisation doit représenter le plus fidèlement possible le comportement réel du convoi, tout en restant suffisamment simple pour mettre au point aisément des lois de contrôle. Pour simplifier l’expression du modèle, des hypothèses de travail justifiées (car reflétant la réalité) sont formulées.

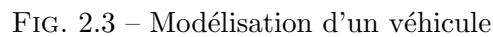
2.1.1 Hypothèses de travail

Le domaine d’application traité concerne la conduite en convoi de véhicules urbains (de faibles dimensions) circulant en centre-ville. De ce fait, plusieurs hypothèses simplificatrices peuvent être avancées :

- Les robots expérimentaux utilisés sont considérés parfaitement rigides (les distances inter-essieux et entre les roues restent constantes).
- Etant donné que les robots mobiles sont destinés à fonctionner en ville, il est supposé qu’ils ne se déplaceront que sur un sol plat non accidenté.
- De plus, les zones de circulation dédiées aux robots sont constituées d’asphalte (ou de matériaux similaires). Ainsi, les roues des voitures sont considérées rouler sur le sol sans glisser.
- Le fonctionnement en environnement urbain se faisant à vitesse réduite, les faibles dimensions des véhicules urbains permettent de ne pas tenir compte des paramètres dynamiques. Ainsi, la modélisation dynamique est négligée : un modèle cinématique est suffisant pour décrire le système. La commande de chaque robot sera réalisée grâce à la vitesse appliquée au véhicule et à l’angle de braquage des roues avant.
- Une roue avant virtuelle localisée à mi-distance entre les deux roues avant réelles de la voiture remplace ces dernières.

D’après les différentes hypothèses faites, la modélisation cinématique la mieux adaptée se trouve être le modèle tricycle (encore appelé modèle d’Ackermann). De plus, ce choix est conforté par sa grande popularité dans de nombreux laboratoires, [103], [28], [67], [29], [126], [118], [17], [111], [121], ...

Pour représenter au mieux le système, les notations utilisées par la suite sont détaillées et illustrées en Fig. 2.3 et Fig. 2.4. La figure 2.3 désigne la modélisation tricycle du véhicule i .



- C est le chemin de référence, défini dans un repère absolu $[A, X_A, Z_A]$.
- O_i est le centre de l'essieu arrière du i^{eme} véhicule.
- M_i est le point situé sur C le plus proche de O_i .
- s_i est l'abscisse curviligne sur C du point M_i . $c(s_i)$ représente la courbure du chemin C en ce point,
- $\theta_c(s_i)$ correspond à l'orientation de la tangente de C en M_i , exprimée dans le repère $[A, X_A, Z_A]$.
- θ_i est l'orientation du i^{eme} véhicule au point O_i , dans le repère $[A, X_A, Z_A]$.
- $\bar{\theta}_i = \theta_i - \theta_c(s_i)$ définit l'erreur angulaire du i^{eme} véhicule par rapport à C .
- y_i est l'erreur latérale du i^{eme} véhicule par rapport à C .
- δ_i correspond à l'angle de braquage de la roue virtuelle avant du i^{eme} véhicule.
- L est la distance entre les essieux d'un robot.

- v_i est la vitesse linéaire du i^{eme} véhicule au point O_i .
- $a_i = \dot{v}_i$ est l'accélération linéaire du i^{eme} véhicule au point O_i .
- n est le nombre de véhicules formant le convoi, d'où $i \leq n$.
- x_i et z_i sont l'abscisse et l'ordonnée de O_i dans le repère $[A, X_A, Z_A]$.

La figure 2.4 illustre la modélisation du convoi. Celle-ci représente l'interaction entre les véhicules i et $(i + 1)$. La notation $d_i = s_i - s_{i+1}$ est introduite et représente l'écart curviligne entre les véhicules i et $(i + 1)$.

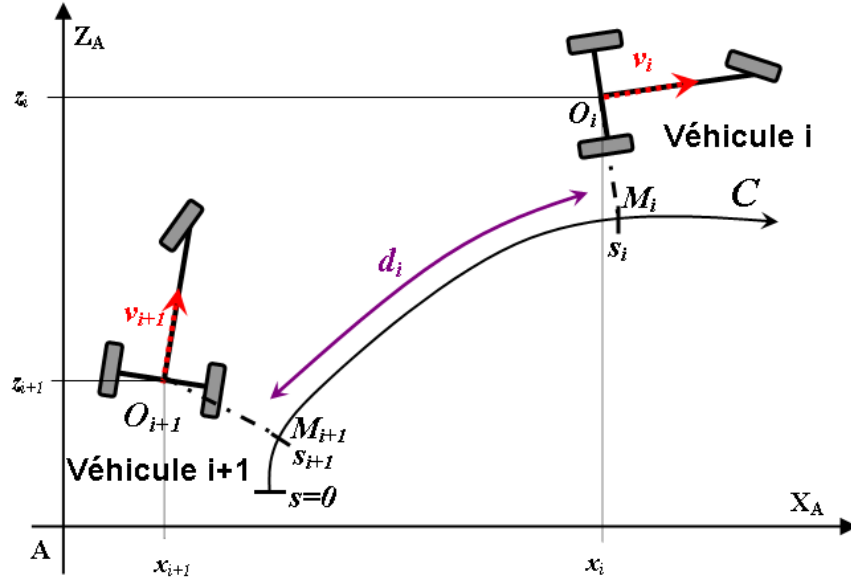


FIG. 2.4 – Modélisation du convoi

2.1.3 Mise en équations et modèle d'état

Les notations définies, le modèle peut être exprimé. L'équation d'un modèle cinématique tricycle exprimé dans le repère cartésien $[A, X_A, Z_A]$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i \\ \dot{z}_i &= v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i &= \frac{v_i}{L} \tan \delta_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

Les objectifs de la commande du convoi étant d'annuler les erreurs latérales et angulaires et de maintenir une distance fixée entre deux véhicules (grâce aux variables de commande δ_i et v_i), un vecteur d'état, formé des erreurs et de l'abscisse curviligne, est préféré. Ainsi, le vecteur $(s_i, y_i, \tilde{\theta}_i)$ est choisi pour décrire l'état du i^{eme} véhicule. Le

modèle d'état est donc (voir [122] ou [24] pour le détail des calculs) :

$$\begin{aligned}\dot{s}_i &= v_i \frac{\cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \tilde{\theta}_i \\ \dot{\tilde{\theta}}_i &= v_i \left(\frac{\tan \delta_i}{L} - \frac{c(s_i) \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} \right)\end{aligned}\tag{2.2}$$

Il est posé $X_i = (s_i, y_i, \tilde{\theta}_i)^T$ le vecteur d'état du i^{eme} véhicule et $U_i = (v_i, \delta_i)^T$ le vecteur de commande. Il est à noter que ce modèle d'état (2.2) est non linéaire. De plus, il est nécessaire que $y_i \neq \frac{1}{c(s_i)}$. La situation exceptionnelle où $y_i = \frac{1}{c(s_i)}$ représente le fait que le véhicule i se retrouve sur le centre de courbure du chemin de référence. Dans la pratique, ces difficultés ne se rencontrent jamais, car $c(s_i)$ est en général petit (du fait de l'angle de braquage du véhicule), et de surcroît y_i est lui-aussi faible (le véhicule est en général proche de la trajectoire de référence).

En observant le système, il est à noter que chaque véhicule du convoi possède 2 variables de commande (une translation et une rotation), alors que le déplacement d'un véhicule se fait dans un espace de 3 dimensions (deux variables de position et une d'orientation). D'un point de vue pratique, cette caractéristique signifie qu'un véhicule ne peut suivre tout type de chemin dans l'espace 3D. Par exemple, un véhicule ne peut pas se déplacer latéralement, une succession de manœuvres est nécessaire pour parvenir à ce type de déplacement. Cette contrainte est définie sous le terme de non-holonomie, voir par exemple [67].

2.2 La commande latérale

Maintenant que la modélisation du système est définie, il est possible de générer une commande. Cette section est ainsi dédiée à la synthèse d'une loi de commande assurant le guidage latéral du convoi le long d'un chemin de référence.

Tout d'abord, les objectifs sont rappelés. Le modèle du véhicule étant non-linéaire, la synthèse de la commande s'avère délicate. Pour pallier ces difficultés, un outil de l'automatique, le chaînage, est présenté et mis en œuvre pour concevoir une loi de commande non linéaire selon une approche linéarisation exacte. Grâce à cette approche, il est montré qu'il est possible de découpler les commandes longitudinale et latérale du convoi.

2.2.1 Les objectifs de commande

La loi de commande latérale doit permettre le guidage des différents robots sur un chemin de référence. De plus, ce chemin doit être commun à l'ensemble des membres du convoi afin d'éviter toute accumulation d'erreurs latérales, illustrée par le schéma Fig. 1.26. Pour asservir les véhicules sur ce chemin de référence, il faut amener et maintenir l'erreur latérale y_i et l'erreur angulaire $\tilde{\theta}_i$ de tous les véhicules à une valeur nulle. De plus, l'évolution de l'erreur latérale doit être monotone : il n'est pas souhaité que les véhicules oscillent autour de la référence. Enfin, la distance d'établissement d_m

nécessaire au véhicule pour atteindre le chemin de référence doit être cohérente vis à vis des performances du robot. En effet, un véhicule, ayant un faible angle de braquage, nécessite une plus grande distance d'établissement, qu'un robot disposant d'un angle de braquage d'une plus grande amplitude.

2.2.2 Difficultés liées à la commande d'un modèle tricycle non linéaire

Comme le système actuel (2.2) est non linéaire, la synthèse de commande demeure plus ardue. Plusieurs approches s'offrent alors (voir la section 3.2 du Chapitre I).

Une approche possible est, par exemple, de s'intéresser au comportement du système autour d'un point d'équilibre. Ainsi, une approximation locale est faite, le système est dit linéarisé tangent. Le système linéarisé tangent fournit des comportements très proches du procédé réel autour du point de linéarisation. Cependant, dès que le système se trouve hors de cette plage de validité, les comportements du système linéarisé ne reflètent plus le système réel.

Pour surmonter ces difficultés, une autre technique est de construire une loi de commande non linéaire directement à partir du système non linéaire, comme par exemple au moyen de la méthode de Lyapunov. Même si avec cette méthode, le système étudié reste fidèle à la réalité, cette approche est délicate à mettre en œuvre, car le réglage des différents paramètres de commande n'est pas explicite.

Une autre technique de commande non linéaire consiste à chercher à transformer le système non linéaire, sans effectuer d'approximation, jusqu'à le ré-écrire sous une forme linéaire sur laquelle la synthèse de la commande est plus aisée : les techniques classiques de commande d'un système linéaire pourront alors être développées sur le système linéarisé de manière exacte. Le réglage des paramètres de commande est donc cette fois explicite. De surcroît, cette approche permet de découpler de façon exacte la commande latérale et longitudinale. Par conséquent, ce type de technique est appliqué au système, grâce à la théorie des systèmes chaînés.

2.2.3 Chaînage du système

Des recherches (cf. [103]) ont établi que les modèles cinématiques de robots non-holonomes peuvent être convertis de façon exacte en modèles chaînés, d'où il est possible d'obtenir un sous-modèle linéaire par changement de l'échelle des temps. De ce fait, une grande part des techniques de l'automatique linéaire peut être appliquée au système étudié. Par conséquent, la loi de commande est alors générée plus facilement, et les performances attendues sont respectées, ce quelle que soit la configuration initiale du système (contrairement à la linéarisation tangente). De plus, le changement d'échelle des temps permet d'exprimer l'état du système en fonction de la distance parcourue par le véhicule (et non plus en fonction du temps). Ceci engendre un avantage non négligeable : les trajectoires des véhicules sont ainsi indépendantes de leurs vitesses de fonctionnement.

A partir de la forme générale d'un système chaîné (introduit par la formule (1.10)), la structure d'un système chaîné de dimension 3 (qui représenterait 1 véhicule) peut

être déduite :

$$\begin{aligned}\dot{a}_{1i} &= m_{1i} \\ \dot{a}_{2i} &= a_{3i}m_{1i} \\ \dot{a}_{3i} &= m_{2i}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Le changement d'échelle des temps $\frac{d}{da_{1i}}$ mène alors au système :

$$\begin{aligned}a'_{1i} &= 1 \\ a'_{2i} &= a_{3i} \quad \text{avec } m_{3i} = \frac{m_{2i}}{m_{1i}} \\ a'_{3i} &= m_{3i}\end{aligned}\tag{2.4}$$

qui est la particularisation en dimension 3 de (1.12). Il est à constater que les deux dernières équations du système (2.4) consistent bien en un sous-système linéaire.

L'objet des calculs présentés ci-dessous est de vérifier que le système non-linéaire (2.2) peut effectivement être ré-écrit sous la forme (2.4).

Pour que la commande latérale puisse être indépendante de la vitesse, il faudrait que la variable a_{1i} , qui définit le changement d'échelle des temps, soit homogène à la distance parcourue par le véhicule. Aussi, pour définir la transformation chaînante, il serait intéressant de pouvoir choisir :

$$a_{1i} = s_i\tag{2.5}$$

ce qui impose immédiatement, au vu de (2.3), que :

$$m_{1i} = \dot{a}_{1i} = v_i \frac{\cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)}\tag{2.6}$$

La variable de commande virtuelle m_{1i} est associée à l'évolution de l'abscisse curviligne s_i du véhicule i , c'est donc une commande dédiée à la régulation longitudinale.

Pour continuer la transformation sous forme chaînée, par souci de simplicité, il est choisi :

$$a_{2i} = y_i\tag{2.7}$$

Il vient alors de la relation (2.3) :

$$\dot{a}_{2i} = v_i \sin \tilde{\theta}_i = a_{3i}m_{1i}\tag{2.8}$$

En reportant (2.8) dans (2.6), il est déduit que la variable a_{3i} est alors donnée par :

$$a_{3i} = (1 - y_i c(s_i)) \tan \tilde{\theta}_i\tag{2.9}$$

Enfin, à partir de (2.3), il est obtenu que la variable de commande m_{2i} est donnée par :

$$\begin{aligned}m_{2i} &= \dot{a}_{3i} = \frac{d}{dt}((1 - y_i c(s_i)) \tan \tilde{\theta}_i) \\ &= \frac{d}{dt}(1 - y_i c(s_i)) \tan \tilde{\theta}_i + (1 - y_i c(s_i)) \frac{d}{dt}(\tan \tilde{\theta}_i) \\ &= -c(s_i)\dot{y}_i \tan \tilde{\theta}_i - \frac{d}{dt}(c(s_i)) \tan \tilde{\theta}_i y_i + (1 - y_i c(s_i)) \frac{1}{\cos^2 \tilde{\theta}_i} \frac{d}{dt}(\tilde{\theta}_i)\end{aligned}\tag{2.10}$$

En reportant le modèle (2.2) dans (2.10), et en utilisant le fait que $\frac{d}{dt}(c(s_i)) = \frac{d}{ds_i}(c(s_i))\dot{s}_i$, il est finalement obtenu :

$$m_{2i} = -c(s_i)v_i \sin \tilde{\theta}_i \tan \tilde{\theta}_i - \frac{dc(s_i)}{ds_i} \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1-y_i c(s_i)} y_i \tan \tilde{\theta}_i + v_i \frac{1-y_i c(s_i)}{\cos^2 \tilde{\theta}_i} \left(\frac{\tan \delta_i}{L} - c(s_i) \frac{\cos \tilde{\theta}_i}{1-y_i c(s_i)} \right) \quad (2.11)$$

La variable de commande virtuelle m_{2i} est associée à l'évolution des erreurs latérale et angulaire du véhicule i . C'est donc une commande dédiée à la régulation latérale.

En conclusion, les transformations d'état et de commande proposées ci-dessus pour convertir le modèle non linéaire (2.2) d'un véhicule en un système chaîné (2.3), peuvent être rassemblées dans les 2 transformations ci-dessous :

$$\begin{aligned} A_i &= \Theta(X_i) = (s_i, y_i, (1 - y_i c(s_i)) \tan \tilde{\theta}_i) \\ M_i &= \Upsilon(X_i, U_i) \quad \text{où } \Upsilon \text{ est défini par (2.6) et (2.11)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Il est alors immédiat de vérifier que ces 2 transformations sont parfaitement définies et inversibles, puisque les seules singularités sont $y_i \neq \frac{1}{c(s_i)}$, $v_i \neq 0$ et $\tilde{\theta}_i \neq \pi/2[\pi]$, et que ces 3 conditions ne sont pas rencontrées dans le fonctionnement nominal d'un convoi. Le modèle (2.2) peut donc effectivement être converti sous forme chaînée (2.3) ou (2.4).

Cette propriété offre de nombreuses possibilités pour la synthèse des lois de commande latérale et longitudinale, comme présenté ci-après dans les sections 2.2.4 et 2.3.

2.2.4 Synthèse de la commande latérale

Le modèle d'un véhicule ayant été converti sous la forme chaînée (2.4), les techniques classiques de l'automatique linéaire peuvent être appliquées.

L'objectif de la commande latérale est d'amener et de maintenir les erreurs latérale et angulaire à des valeurs nulles. D'après les égalités (2.7) et (2.9), et comme $y_i \neq \frac{1}{c(s_i)}$, il suffit de réguler a_{2i} et a_{3i} à zéro (a_{2i} et a_{3i} étant directement liés à y_i et $\tilde{\theta}_i$). En considérant l'expression (2.4), il est à constater que l'évolution de ces 2 variables est liée et consiste simplement en un double intégrateur piloté par la seule commande virtuelle m_{3i} . En conséquence, une loi de commande naturelle est :

$$m_{3i} = -K_d a_{3i} - K_p a_{2i} \quad (2.13)$$

En effet, en reportant (2.13) dans (2.4), il est obtenu :

$$a_{2i}'' + K_d a_{2i}' + K_p a_{2i} = 0 \quad (2.14)$$

Si les constantes K_p et K_d sont choisies strictement positives, alors (2.14) impose que a_{2i} et a_{3i} convergent vers zéro et donc y_i et $\tilde{\theta}_i$ également (au vu de (2.12)). Comme $a_{1i} = s_i$, les gains K_p et K_d imposent une distance et non plus un temps d'établissement. Ainsi, pour une même configuration initiale, le chemin parcouru par le véhicule reste identique, quelle que soit sa vitesse linéaire.

L'étude de l'équation différentielle du second ordre (2.14) permet de fixer les gains K_p et K_d en fonction des performances souhaitées pour la commande latérale. Les

performances voulues sont une évolution monotone de l'erreur latérale et une distance d'établissement, notée d_m , adaptée au véhicule expérimental (voir section 2.2.1). d_m doit être choisie de manière à ce que les actionneurs de commande du robot ne soient pas saturés. Il est possible d'identifier $K_p = \omega_n^2$ et $K_d = 2\xi\omega_n$ pour obtenir un système du second ordre exprimé sous la forme suivante :

$$y_i'' + 2\xi\omega_n y_i' + \omega_n^2 y_i = 0 \quad (2.15)$$

Son équation caractéristique s'écrit :

$$r^2 + 2\xi\omega_n r + \omega_n^2 = 0 \quad (2.16)$$

Afin d'éviter toute oscillation de l'erreur latérale autour de zéro et garantir la convergence la plus rapide possible, le système (2.15) doit être amené à zéro en régime critique. Cette condition est réalisée si le discriminant de l'équation caractéristique (2.16) est nul, c'est-à-dire si $\xi = 1$. La résolution de l'expression (2.15) avec $\xi = 1$ donne alors :

$$y_i(s_i) = y_i(s_{0,i})(1 + \omega_n(s_i - s_{0,i}) + y_i'(s_{0,i})(s_i - s_{0,i}))e^{-\omega_n(s_i - s_{0,i})} \quad (2.17)$$

où $s_{0,i}$ correspond à l'abscisse curviligne initiale, et donc $y_i(s_{0,i})$ et $y_i'(s_{0,i})$ correspondent respectivement à l'écart latéral entre le chemin de référence et le véhicule i en position initiale, et sa dérivée en fonction de s_i .

En considérant que les objectifs de la régulation sont atteints dès que l'erreur latérale est inférieure à 5% de l'erreur initiale $y_i(s_{0,i})$, d_m peut être définie par la relation :

$$0.05 = (1 + \omega_n d_m + y_i'(s_{0,i})d_m)e^{-\omega_n d_m} \quad (2.18)$$

En supposant que $y_i'(s_{0,i})$ est nulle (lors du démarrage, l'évolution de l'erreur latérale est supposée nulle), il vient alors :

$$0.05 = (1 + \omega_n d_m)e^{-\omega_n d_m} \quad (2.19)$$

Ceci mène à la relation (évaluée à l'aide d'un solveur numérique) :

$$d_m \simeq \frac{4.75}{\omega_n} \quad (2.20)$$

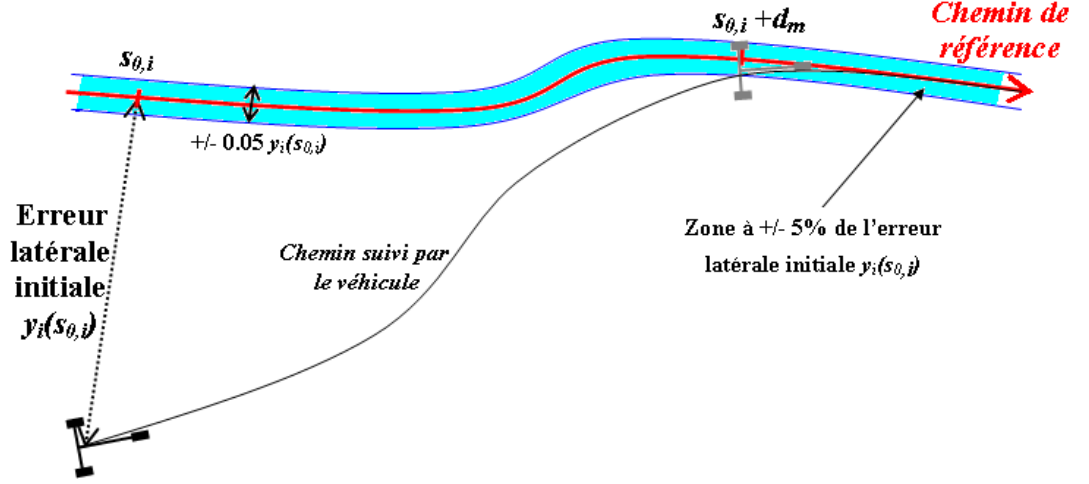
En remplaçant ω_n par $\sqrt{K_p}$, il est obtenu :

$$K_p \simeq \frac{22.5}{d_m^2} \quad (2.21)$$

et comme $\xi = 1$, le gain K_d est déduit :

$$K_d \simeq \frac{9.5}{d_m} \quad (2.22)$$

Les gains K_p et K_d seront pris identiques pour les n véhicules du convoi, afin de leur prodiguer la même dynamique.

FIG. 2.5 – Représentation de la distance d'établissement d_m

Ainsi, après que le véhicule ait parcouru une distance d_m le long du chemin de référence, celui-ci se retrouve à moins de 5% de l'écart qu'il présentait initialement, soit $y_i(s_{0,i} + d_m) = 0.05y_i(s_{0,i})$ (Fig. 2.5).

Enfin, l'ultime étape de la commande latérale consiste à ré-exprimer la commande virtuelle (2.13) dans les grandeurs réelles caractérisant le véhicule, c'est-à-dire exprimer la commande d'orientation des roues avant δ_i en fonction de l'état X_i du véhicule i . En utilisant la transformation chaînée (2.12), il est montré que la commande virtuelle (2.13) correspond à la commande réelle suivante :

$$\delta_i(y_i, \tilde{\theta}_i) = \arctan \left(L \left[\frac{\cos^3 \tilde{\theta}_i}{(1-c(s_i)y_i)^2} \left(\frac{dc(s_i)}{ds_i} y_i \tan \tilde{\theta}_i - K_d (1-c(s_i)y_i) \tan \tilde{\theta}_i - K_p y_i + c(s_i) (1-c(s_i)y_i) \tan^2 \tilde{\theta}_i \right) + \frac{c(s_i) \cos \tilde{\theta}_i}{1-c(s_i)y_i} \right] \right) \quad (2.23)$$

2.2.5 Découplage des commandes latérales et longitudinales

Dans le développement théorique précédent, il est à noter que les performances latérales sont exprimées en fonction de la distance parcourue par le véhicule. Les vitesses des membres du convoi v_i sont des paramètres libres sans influence sur ces performances. Par conséquent, le chemin suivi par le robot mobile est indépendant de sa vitesse (même si celle-ci varie au cours du temps), à condition que celle-ci ne soit pas nulle ($v_i \neq 0$). Les performances latérales sont, donc, indépendantes de la vitesse, et de ce fait, les paramètres v_i peuvent être dévolus uniquement à la commande longitudinale du convoi. En conclusion, l'asservissement du convoi sur un chemin de référence est réalisé exclusivement au moyen de l'angle de braquage des roues avant. La vitesse des véhicules permet d'adresser de façon indépendante la régulation de l'écart inter-véhicules.

2.2.6 Simulations

La loi de commande latérale (2.23) a été simulée dans le but d'évaluer ses performances. Le simulateur utilisé a été réalisé sous *Simulink*, l'extension graphique de *MATLAB* permettant de travailler avec des diagrammes en blocs. Les entrées du simulateur sont pour la commande latérale : la définition du chemin de référence et les gains K_p et K_d . De plus, l'état initial du véhicule et les bruits de mesure sont paramétrables.

Au cours de ces simulations, l'écart inter-essieu L est fixé à 1.2 m, ce qui est très proche du véhicule expérimental utilisé par la suite. Ensuite, le bruit introduit pour représenter les imperfections des capteurs est fixé égal à un bruit blanc d'écart-type de 10 cm sur les mesures en position et de 5 degrés en orientation. Il est à noter que les capteurs GPS utilisés durant les expérimentations présentent une précision supérieure : de l'ordre de 2 cm. Cependant, de tels types de système de localisation sont onéreux. Ainsi, quand de nombreux véhicules devront être équipés effectivement de capteurs de position, il sera alors plus réaliste d'équiper l'ensemble du convoi de GPS à précision décimétrique. De plus, en réduisant les performances des capteurs, l'influence des bruits de mesure est mise en valeur.

Afin d'évaluer la commande latérale, deux jeux de simulation sont effectués : le premier a pour objectif de vérifier les performances en poursuite du contrôleur, le second met en évidence l'indépendance de la vitesse. Ces simulations ne concernant que les performances latérales, seul le comportement d'un véhicule est simulé.

Lors des simulations présentées dans ce chapitre, l'objectif de la commande latérale est donc le suivi d'un chemin de référence illustré par la figure 2.6. De plus, afin de refléter le plus précisément la réalité, ce chemin a été acquis par un véhicule expérimental, au cours d'un essai en conditions naturelles de fonctionnement. Il s'agit, en fait, d'une trajectoire échantillonnée. De plus, pour dissocier les différentes courbures de cette dernière, la trajectoire est divisée en sections nommées de **A** à **G**.

2.2.6.1 Performances en poursuite

Simulation 0 :

Afin de valider théoriquement la loi de commande latérale, une première simulation est effectuée sans introduire de bruit de mesure. Par conséquent, les performances de la commande doivent être parfaites, c'est-à-dire aucune erreur latérale ou angulaire ne doit être observée.

L'observation de l'évolution des erreurs latérale et angulaire atteste d'un bon fonctionnement de la loi de commande : à l'initialisation, les erreurs tendent progressivement à des valeurs nulles, pour y être maintenues. Il est toutefois à remarquer que lors des sections à courbure (**B**, **D** et **F** sur les figures), et notamment dans la chicane, l'erreur latérale est de l'ordre de quelques centimètres. Ce phénomène s'explique par le fait que la trajectoire de référence qui a été construite ici, ne peut pas être parfaitement suivie par le véhicule : en effet, comme expliqué ci-dessus, la trajectoire de référence a été définie par une succession de positions du véhicule, mesurées expérimentalement. Pour

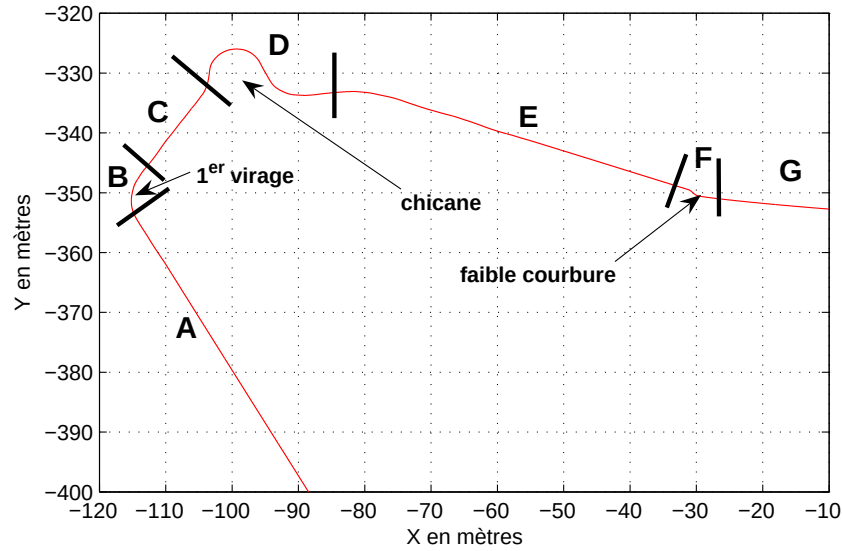


FIG. 2.6 – Chemin de référence utilisé pour l'ensemble des simulations

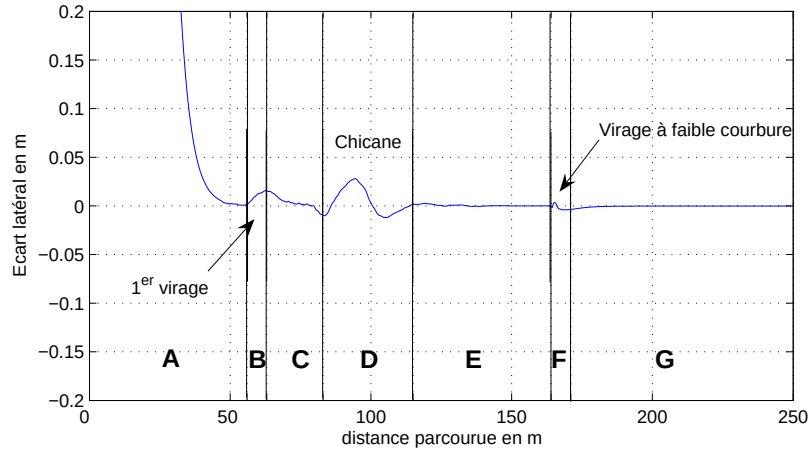


FIG. 2.7 – Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 0

pouvoir, lors de la simulation du guidage automatique, calculer avec précision les écarts du véhicule à la trajectoire de référence, les points expérimentaux qui constituent cette dernière ont dû préalablement être interpolés (par un polynôme du 2nd ordre). Les approximations amenées par cette interpolation, menée sur des données expérimentales qui étaient déjà entachées de bruit, font que la trajectoire de référence utilisée au final dans la loi de commande ne correspond pas parfaitement à une trajectoire que pourrait

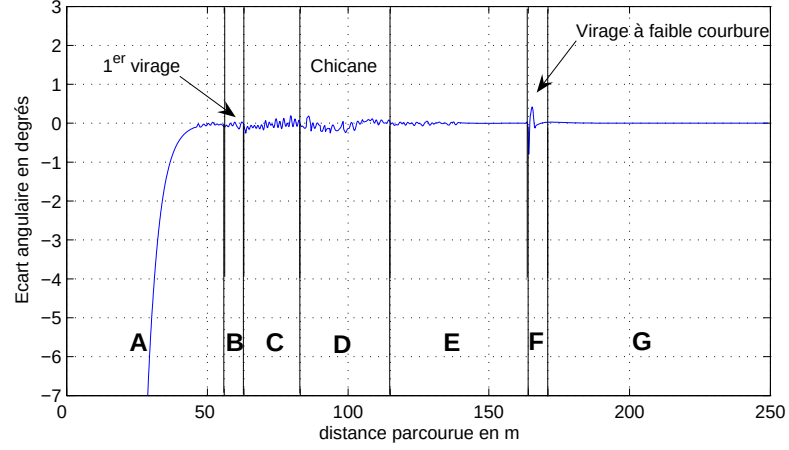


FIG. 2.8 – Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 0

suivre un véhicule soumis à des contraintes non-holonomes. La loi de commande (2.23) ne peut donc pas assurer dans ce cas un suivi de trajectoire parfait.

Ces approximations sur la trajectoire de référence sont d'autant plus importantes que la courbure est forte, ce qui explique que les écarts latéraux apparaissent dans les sections **B**, **F** et surtout **D**. Cependant, comme ces erreurs restent toujours inférieures à 3 cm et qu'elles sont nulles en ligne droite (**A**, **C**, **E** et **G**), elles sont vite négligeables comparées aux erreurs qui seront amenées par les bruits de mesure.

Simulation 1 :

En premier lieu, la distance d'établissement d_m est modifiée (et donc K_p et K_d), ceci dans le but de prouver l'intérêt de cette variable et comment la choisir le plus judicieusement possible. En second lieu, des simulations sont effectuées à différents états initiaux, visant à prouver la validité de la commande quelles que soient les configurations initiales, ceci pour mettre en valeur l'utilité d'une loi de commande non-linéaire, ici basée sur une linéarisation exacte.

Avant de mettre en œuvre la commande latérale, il est nécessaire de la valider au moyen de simulations. La première étape de cette validation est de fixer judicieusement le paramètre d_m définissant la distance d'établissement. Par conséquent, une série de tests comparatifs est effectuée en faisant varier d_m afin d'évaluer les performances liées à d_m . La vitesse atteinte par le véhicule est de $2m/s$, après une accélération constante de $0.2m/s^2$ durant 10 secondes. Le tableau suivant Tab. 2.1 résume les différentes simulations avec le paramètre d_m associé. Les performances des différentes simulations sont illustrées sur les figures 2.9 à 2.12.

d_m	K_p	K_d
4.75 m	1	2
6.7 m	0.5	1.41
9.5 m	0.25	1
15.8 m	0.09	0.6
21.2 m	0.05	0.45
23.7 m	0.04	0.4
31.6 m	0.02	0.3
47.5 m	0.01	0.2

TAB. 2.1 – Choix des gains de la commande latérale en fonction de la distance d'établissement

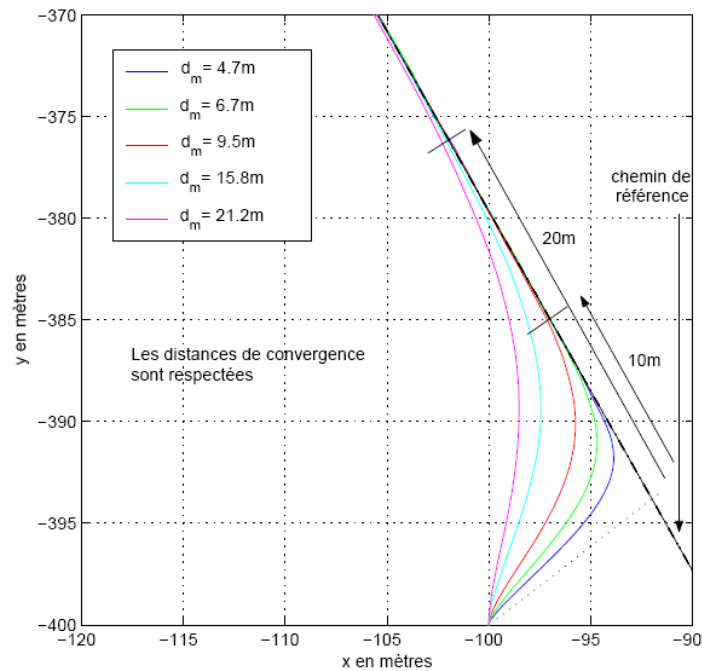


FIG. 2.9 – Trajectoires suivies par le véhicule - Simulation 1

La figure 2.9 représente le chemin suivi par le véhicule. Le véhicule s'asservit comme désiré avec les contraintes d_m imposées. La figure 2.10 permet d'observer l'évolution de l'erreur latérale en fonction de la distance parcourue. Plus la distance est faible, plus le véhicule a besoin de changer son orientation pour atteindre sur une plus courte distance la référence, voir également la figure 2.11. Il est à noter que dans les simulations présentées, d_m varie entre 4.7m et 21.2m. En effet, pour des valeurs supérieures, le gain de la commande est trop faible pour assurer des performances de régulation convenables.

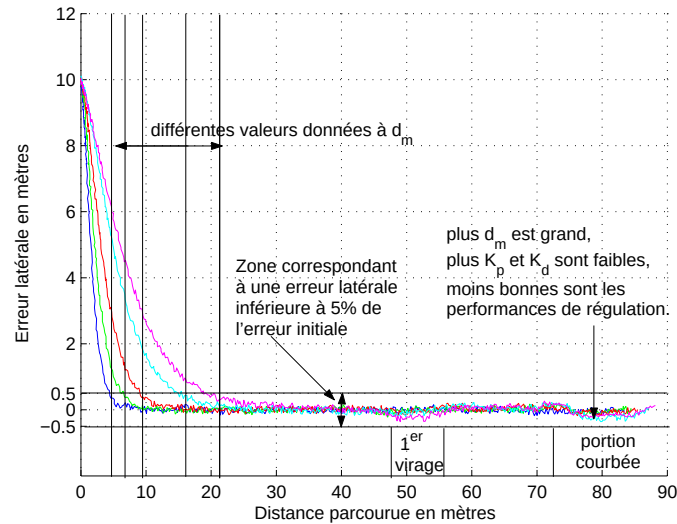


FIG. 2.10 – Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 1

Ceci est visible sur la figure 2.10, où lorsque $d_m = 21.2m$, des erreurs de régulation sont perceptibles en courbe. En effet, à chaque fois qu'une erreur latérale apparaît, parce que la trajectoire de référence ne peut pas être parfaitement suivie (du fait de l'interpolation qui a dû être réalisée entre des positions mesurées expérimentalement), le véhicule doit couvrir la longue distance $d_m = 21.2m$ avant de recoller sur cette trajectoire de référence. À l'inverse, si la distance d'établissement est choisie trop faible, des singularités dans la commande risquent d'apparaître : l'erreur angulaire est susceptible d'atteindre $\pi/2$ comme le montre la figure 2.11. De plus, lorsque les gains sont élevés, la commande angulaire réagit très brutalement face aux bruits de mesure et devient oscillante, voir Fig. 2.12. Ainsi, il faut tenir compte du bruit des capteurs pour déterminer au mieux d_m .

Au travers des simulations, choisir $d_m = 15.8m$ offre un bon compromis entre des performances en régulation et en poursuite suffisamment bonnes et une commande du véhicule plutôt souple. Cette valeur est choisie pour les simulations à suivre, ainsi que sur les expérimentations réalisées par la suite.

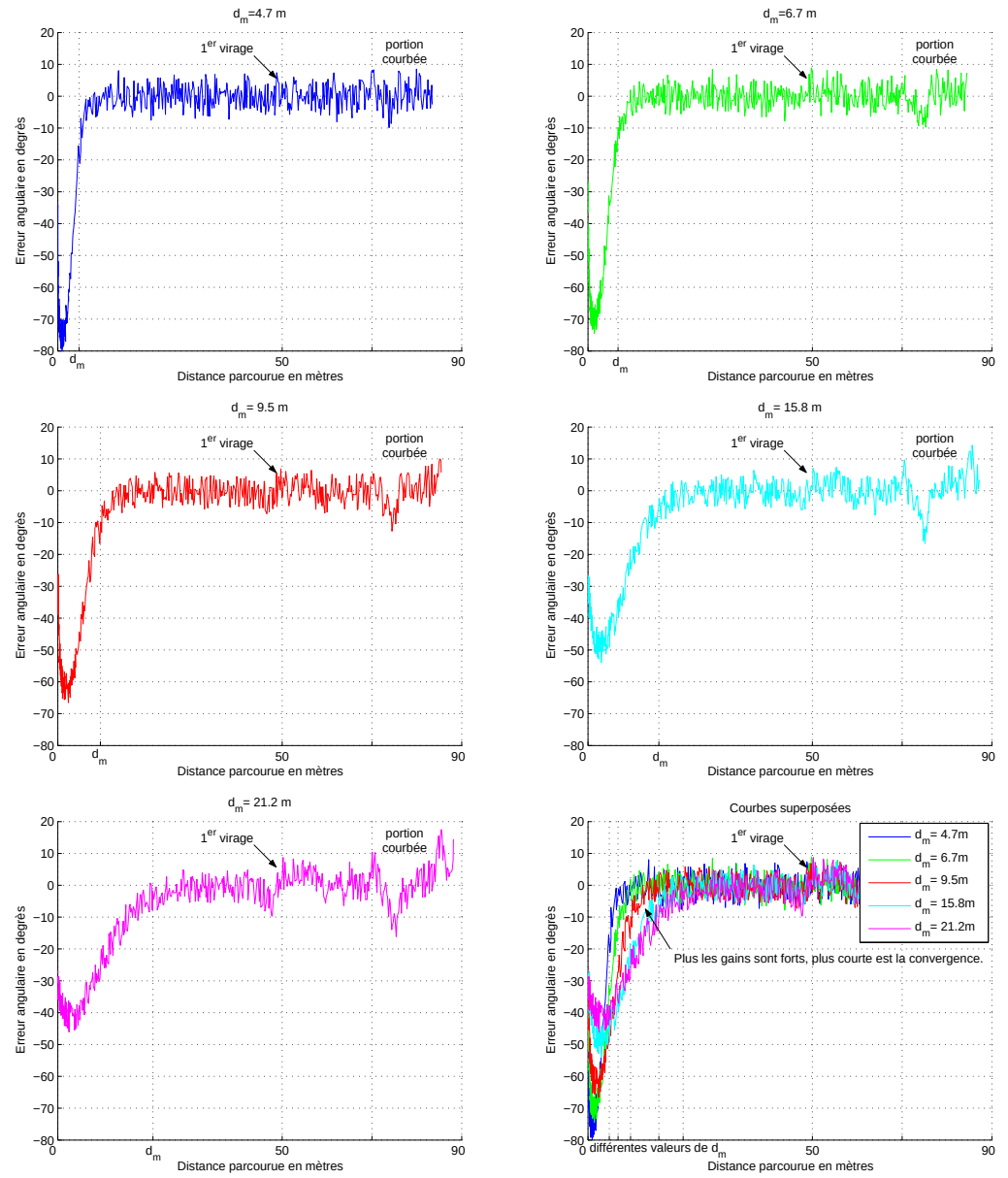


FIG. 2.11 – Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 1

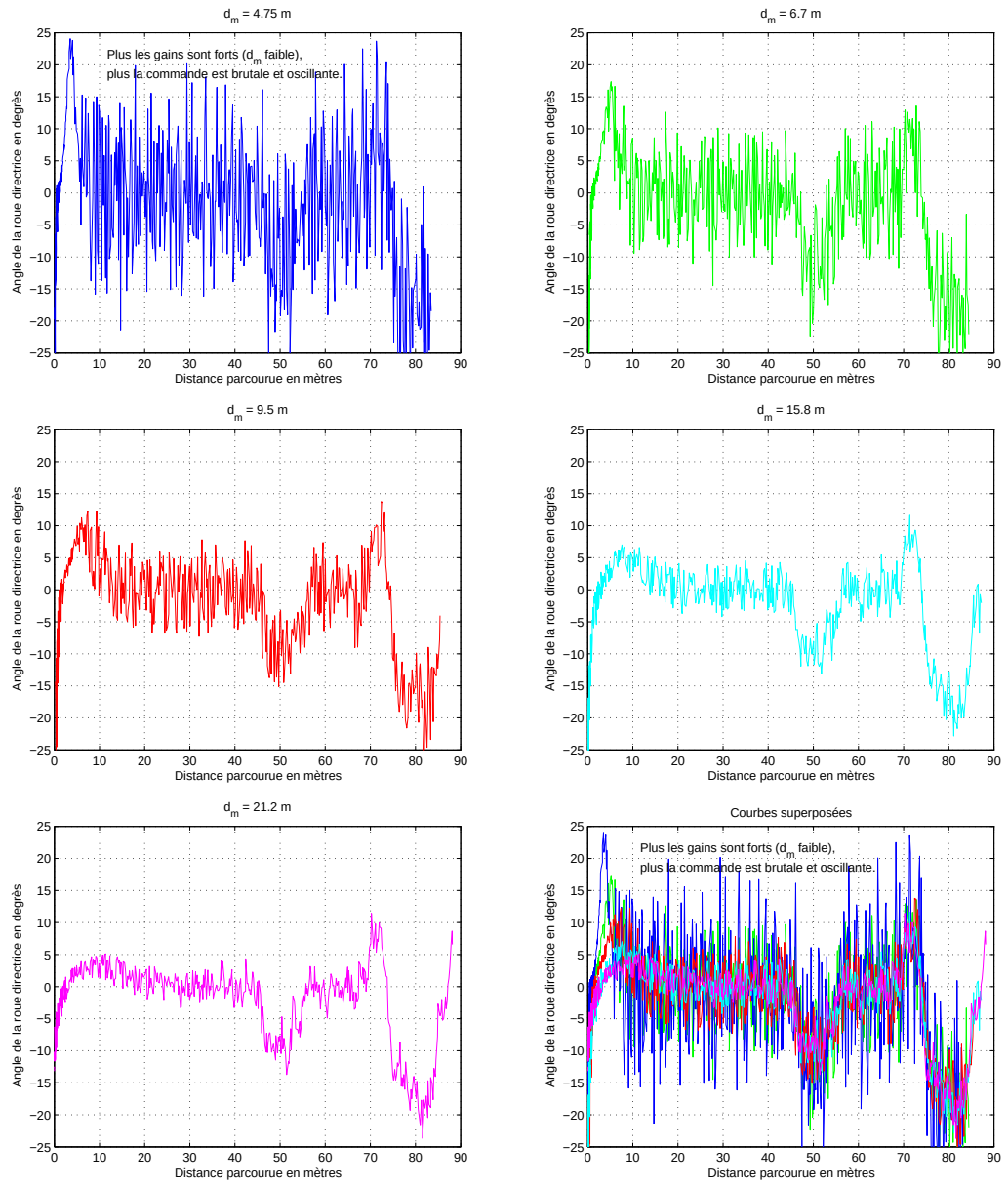


FIG. 2.12 – Commande latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 1

Simulation 2 :

Ici l'attention est portée sur l'état initial du robot mobile, par conséquent, le véhicule se place à différentes configurations initiales à chaque simulation. Dans ce jeu de simulations, la distance d'établissement d_m est donc prise égale à 15.8 m , ce qui correspond à des gains $K_p = 0.09$ et $K_d = 0.6$. L'évolution de l'erreur latérale est la même que précédemment. Les courbes suivantes illustrent les trajectoires suivies par le véhicule par rapport à la référence Fig. 2.13, les erreurs latérales Fig. 2.14 et angulaires Fig. 2.15.

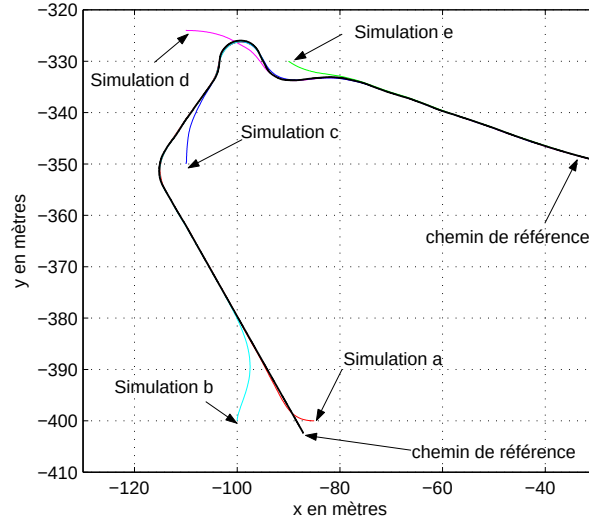


FIG. 2.13 – Trajectoires suivies par le véhicule - Simulation 2

Les configurations initiales envisagées sont très différentes : les erreurs initiales (erreurs latérale et angulaire) diffèrent et peuvent être très larges. De même, l'accrochage sur la référence se déroule sur une portion droite (simulations a et b), en entrée de virage (simulation c), en milieu de virage (simulation d) ou en sortie de virage (simulation e)). Malgré cette diversité, les performances latérales sont très similaires : une fois la distance d'établissement parcourue, le véhicule se trouve sur la trajectoire et la suit sans difficulté. Si de légères erreurs interviennent par la suite, elles sont dues aux bruits de mesure introduits par les capteurs.

Les performances de la commande latérale sont très satisfaisantes avec d_m fixée à 15.8 m , quelle que soit la configuration initiale.

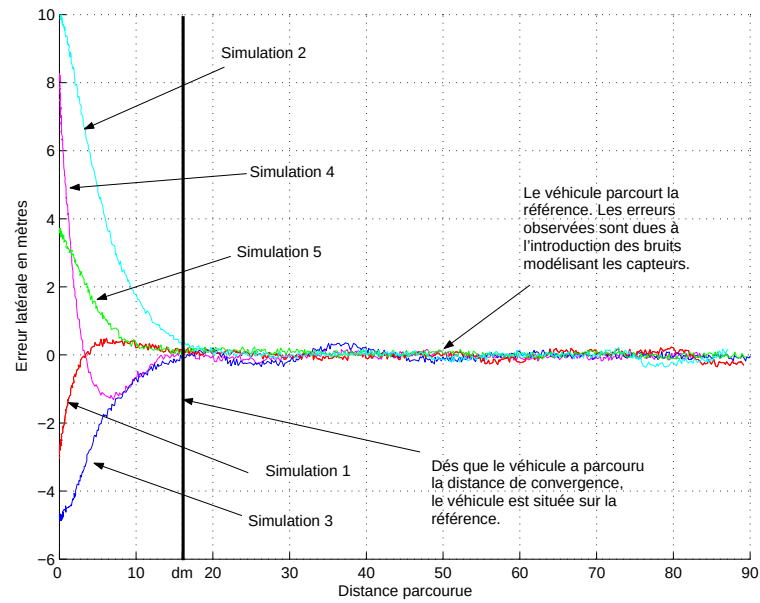


FIG. 2.14 – Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 2

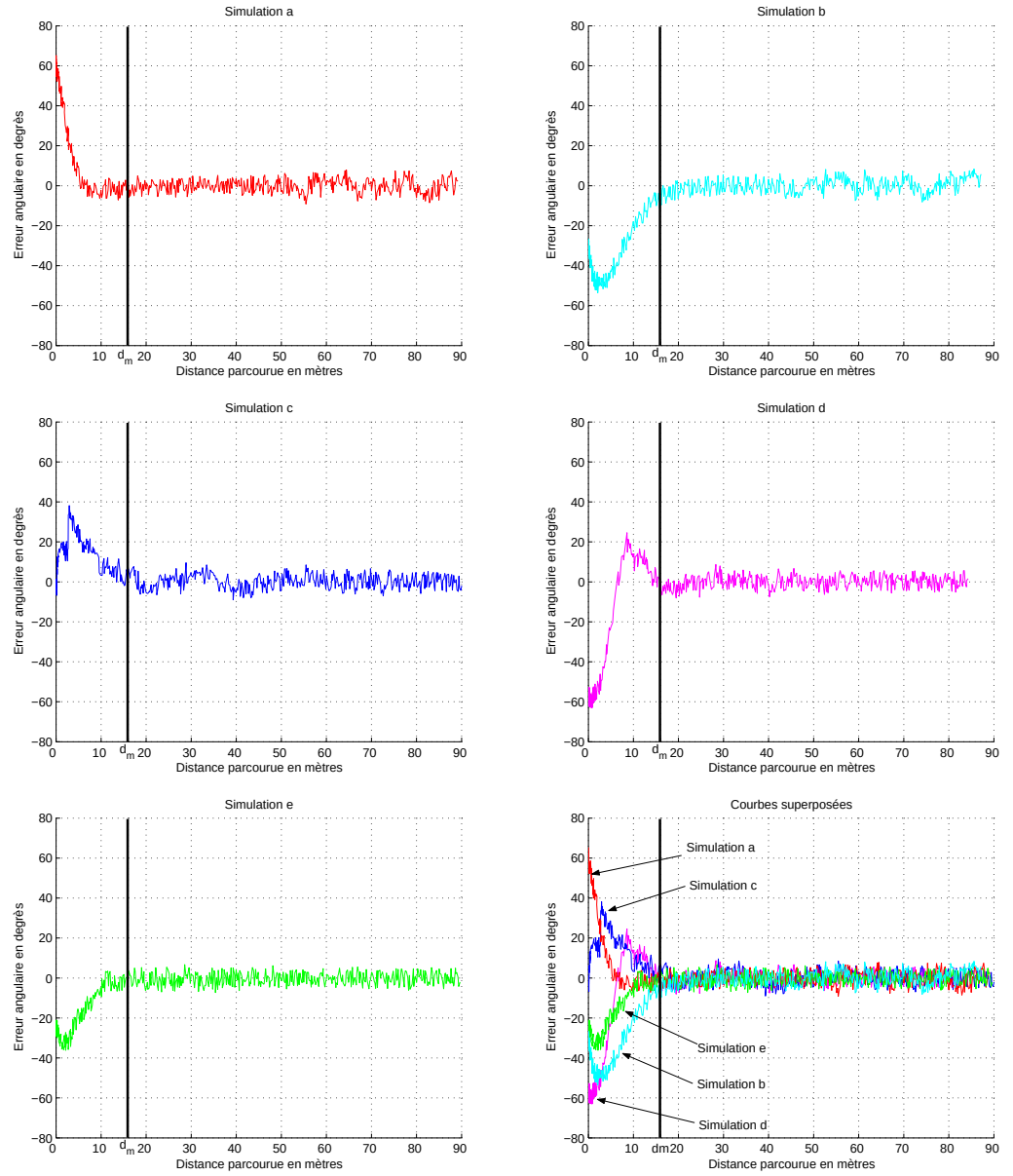


FIG. 2.15 – Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 2

2.2.6.2 Indépendance de la vitesse

Simulation 3 :

Les performances en poursuite étant validées, la commande à différentes vitesses est simulée afin de montrer que les performances latérales sont indépendantes de la vitesse. Pour cela, quatre simulations sont effectuées : la première à une faible vitesse de 1m/s , la deuxième à 2m/s , la troisième à 4m/s et la dernière à vitesse variable au cours du temps. Bien évidemment, les conditions initiales et les différents paramètres de simulation, à l'exception de la vitesse, restent identiques pour les quatre simulations. Ces quatre simulations donnent des résultats quasi-identiques : les courbes des figures Fig. 2.16 et Fig. 2.17 sont superposées, ce qui témoigne que les trajectoires des robots sont identiques, quelle que soit la vitesse.

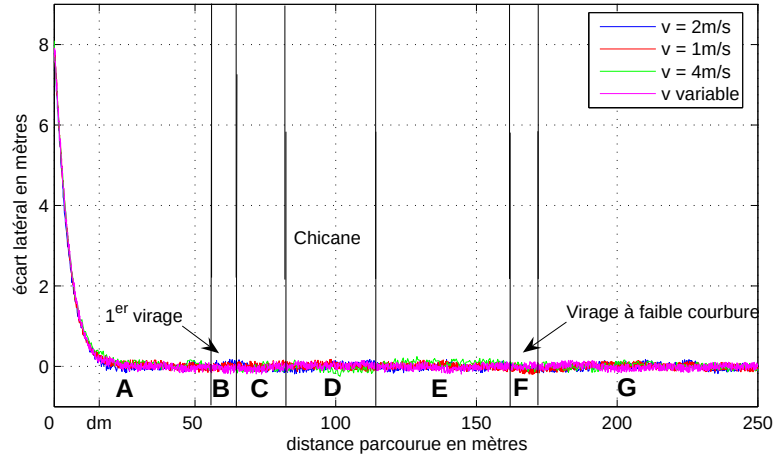


FIG. 2.16 – Erreur latérale en fonction de la distance parcourue - Simulation 3

L'ensemble des simulations montre qu'après avoir franchi la distance d'établissement, les écarts angulaires et latéraux présentent des moyennes nulles, et les écarts-types des erreurs sont de l'ordre de ceux du bruit introduit dans le retour d'état. Lorsque la courbure est très serrée, l'erreur latérale peut atteindre 15 cm et l'erreur angulaire reste inférieure à 6 degrés. Compte tenu des bruits introduits pour simuler les capteurs et de la courbure du chemin sur lequel le robot doit s'asservir, ces performances latérales sont très satisfaisantes. Au vu de ces résultats, il est dès lors envisageable d'implanter cette commande latérale sur un robot disposant de capteurs fournissant des données, au plus aussi bruitées que les bruits modélisés ici. Cette commande servira de contrôle latéral dans la suite des simulations et dans les expérimentations.

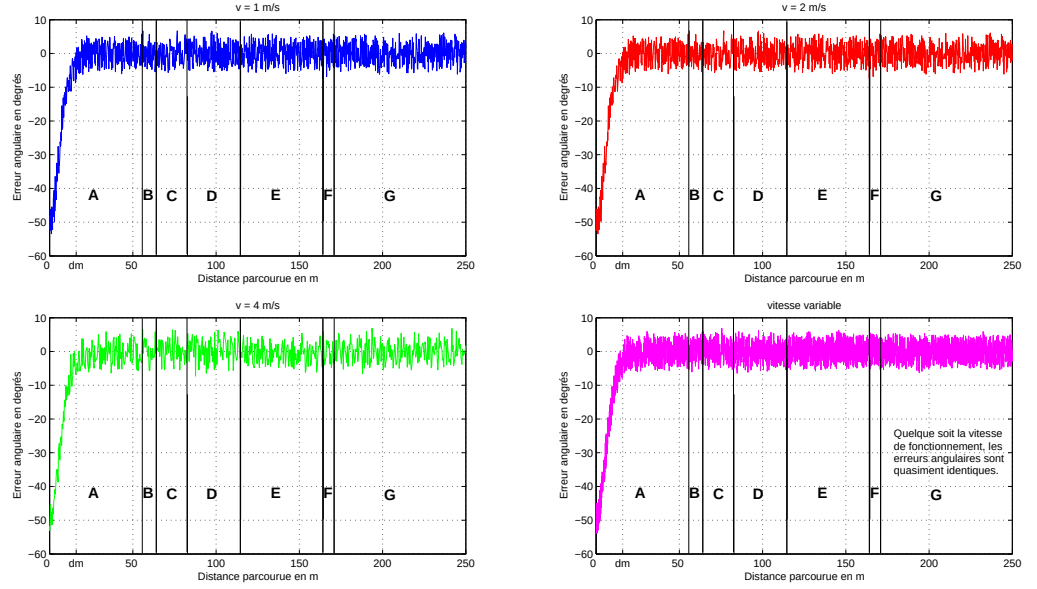


FIG. 2.17 – Erreur angulaire en fonction de la distance parcourue - Simulation 3

2.3 La commande longitudinale du convoi

Dans cette section, la commande longitudinale est présentée en conditions standards (les véhicules du convoi sont placés dans un état proche des objectifs fixés). En premier lieu, les objectifs sont définis. La deuxième partie aborde une commande locale de proche-en-proche, tandis que la troisième partie traite d'une commande référencée sur le leader du convoi. Ensuite, ces deux commandes sont discutées et comparées. Enfin, de la synthèse de ces discussions, une loi de commande combinant les avantages des deux précédentes approches est formulée.

2.3.1 Objectifs de la commande

Le but de la commande est d'assurer le contrôle en vitesse des membres du convoi de façon à respecter une consigne donnée pour l'écart entre les robots. Cette consigne peut s'exprimer sous la forme d'une distance, d'un temps, ou d'une fonction temporelle caractéristique de la dynamique physique des véhicules. De surcroît, tout risque de collision doit être absolument écarté.

Comme présenté au Chapitre I, beaucoup d'objectifs de régulation sont exprimés dans la littérature en terme d'écart temporel ou de fonctions dépendant explicitement du temps. Ainsi, dans [41], un écart temporel de 2 s est maintenu entre les véhicules. Dans [133], l'objectif de commande est d'annuler une fonction d'erreur e_r construite comme une pondération entre :

- une erreur en vitesse v_r (vitesse relative entre 2 véhicules consécutifs)

- et une erreur en distance, dépendant de la vitesse du véhicule : $d = x_r - (s_0 + h v_f)$ avec :

- * x_r : inter-distance entre 2 véhicules consécutifs,
- * s_0 : distance minimale à respecter entre les véhicules,
- * v_f : vitesse du véhicule suiveur,
- * h : paramètre réglable.

$(s_0 + h v_f)$ correspond donc à l'inter-distance souhaitée, qui est par construction d'autant plus grande que les véhicules se déplacent à haute vitesse.

La fonction d'erreur régulée dans [133] s'exprime donc comme :

$$e_r = v_r + k d$$

avec k un paramètre permettant de donner plus ou moins de poids à l'une ou l'autre des erreurs dans l'objectif de régulation. En exprimant la consigne de l'écart inter-véhicules en fonction d'une expression faisant intervenir le temps, il est ainsi possible de maintenir une distance entre les robots, modulable en fonction de leurs vitesses et accélérations. Ceci permet de garantir une meilleure sécurité, tout en adaptant les performances du convoi à son allure. En effet, lorsque les véhicules roulent à hautes vitesses, la distance à maintenir entre les éléments est plus grande que lorsqu'ils fonctionnent à faibles vitesses afin d'assurer la sécurité du convoi.

Ce type de régulation est très bien adapté, par exemple, au cas de convois de véhicules routiers sur autoroute. Le domaine d'application étant ici la conduite en environnement urbain, le convoi ne peut que fonctionner à faibles vitesses. Aussi, la régulation d'un écart temporel n'apporterait dans l'application visée que peu de modulation sur les performances. Par conséquent, la régulation d'une distance fixe est ici préférée.

Plutôt que de maintenir une distance directe, l'objectif de régulation est ici exprimé comme un écart curviligne entre les véhicules. De cette façon, lorsque le convoi circule sur des itinéraires à forte courbure, des comportements inadaptés au convoi peuvent être évités. Le schéma Fig. 2.18 permet de bien comprendre l'intérêt de la distance curviligne.

Dans la situation **A**, les robots suivent une ligne droite. Les distances curvilignes et directes sont alors égales. Lorsque le chemin présente une faible courbure - situation **B** -, les deux types de distance sont équivalents. Dans de telles situations, l'utilisation de la distance directe peut très bien se justifier. Les autoroutes et voies rapides sont formées par de tels chemins à faible courbure, ce qui justifie l'utilisation de la distance directe dans ces environnements.

Cependant, lorsque la courbure de la trajectoire de référence est forte, comme dans la situation **C**, les deux types de distances cessent d'être équivalents. Il est possible de voir aisément que la distance curviligne a un sens beaucoup plus physique que la distance directe : dans la courbe décrite par la situation **C**, si le véhicule de tête circule à vitesse constante et que la distance curviligne entre les 2 véhicules est régulée, alors le second véhicule va aussi se déplacer à vitesse constante, comme il est naturel. Si au contraire la distance directe était régulée, du fait que celle-ci est calculée en coupant la

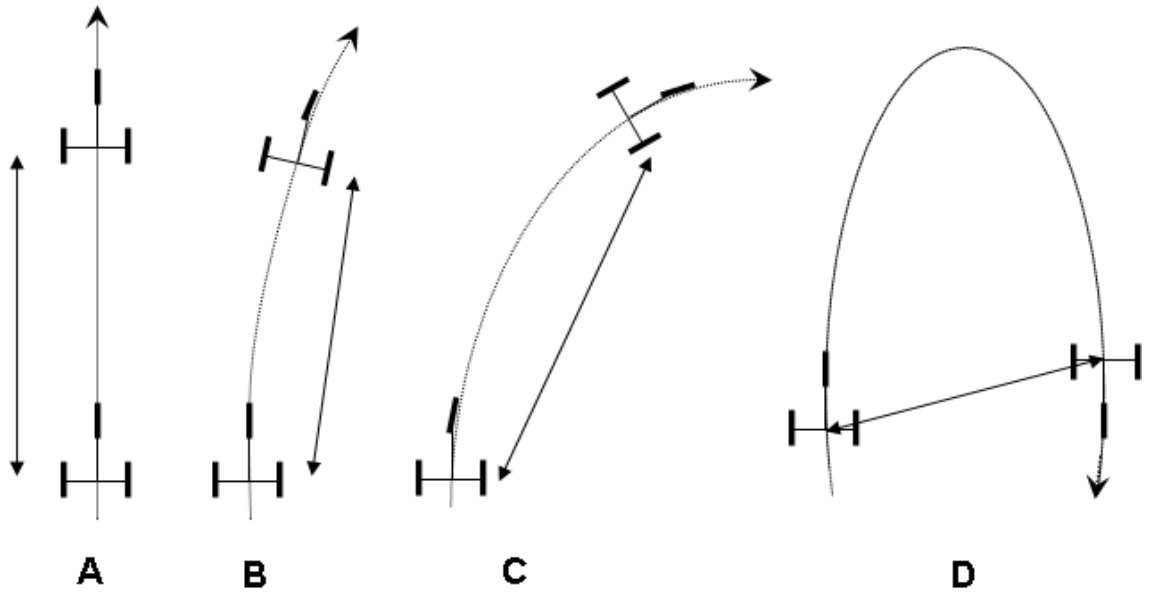


FIG. 2.18 – Comparaison des distances directes et curvilignes

courbe, le véhicule suiveur devrait tout d'abord ralentir pour maintenir une distance directe constante, puis accélérer en sortie de courbe pour rattraper le véhicule de tête, ce qui n'est bien sûr pas le comportement souhaité.

Dans des situations complexes, telles que la situation **D**, l'utilisation de la distance directe serait même problématique : en effet, si le véhicule de tête est arrêté, et que le véhicule suiveur avance à vitesse constante, alors la distance directe n'évolue pas de façon monotone : elle commence par décroître (ce qui est logique, le suiveur s'approche du leader), mais passé un certain point, elle va se remettre à croître. Cela rend impossible son utilisation à des fins de régulation.

En conclusion, l'écart curviligne illustre bien la distance parcourue par chaque véhicule sur la référence, et permet ainsi de positionner les robots par rapport à une référence commune : le chemin de référence. Le milieu urbain étant très riche en courbe de type **C**, voire **D**, il est essentiel de réguler la distance curviligne le long du chemin de référence, plutôt que la distance directe. L'objectif de la commande développée ci-après est donc de maintenir un écart curviligne constant entre les différents éléments du convoi.

2.3.2 La commande de proche en proche

La première approche abordée consiste à commander chaque véhicule selon le comportement du véhicule le précédant immédiatement. Le terme de commande locale est alors utilisé. L'objectif de cette commande est donc de réguler un écart constant, noté d , entre le i^{eme} véhicule et son suiveur direct : le $(i + 1)^{eme}$ véhicule. Ce premier type

de commande est illustré par le schéma de la Fig. 2.19.

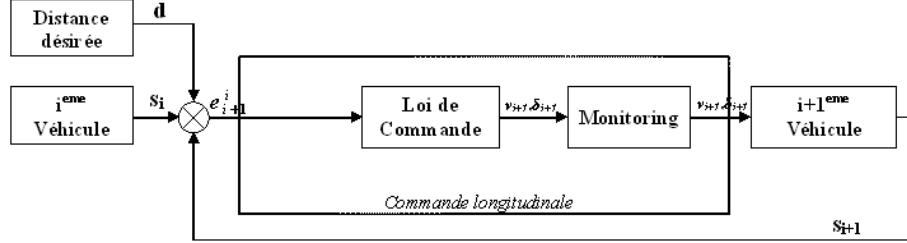


FIG. 2.19 – Commande de proche-en-proche

Pour construire la loi de commande longitudinale, l'erreur est tout d'abord introduite :

$$e_{i+1}^i = s_i - s_{i+1} - d \quad (2.24)$$

L'objectif est donc ici de réguler e_{i+1}^i à zéro. En dérivant l'expression (2.24), il est obtenu :

$$\dot{e}_{i+1}^i = \dot{s}_i - \dot{s}_{i+1} \quad (2.25)$$

En utilisant l'équation (2.2), (2.25) se ré-écrit sous la forme :

$$\dot{e}_{i+1}^i = \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} - \frac{v_{i+1} \cos \tilde{\theta}_{i+1}}{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})} \quad (2.26)$$

d'où il est possible d'obtenir :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} - \dot{e}_{i+1}^i \right) \quad (2.27)$$

Comme pour le contrôle latéral, des techniques de linéarisation exacte peuvent être utilisées. La variable de commande réelle est la vitesse du véhicule suiveur v_{i+1} . Une commande longitudinale auxiliaire $m_{4(i+1)}$ liée à v_{i+1} est cependant introduite par la relation :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} - m_{4(i+1)} \right) \quad (2.28)$$

En reportant (2.28) dans (2.27), l'évolution de l'erreur est immédiatement donnée par le système linéaire $\dot{e}_{i+1}^i = m_{4(i+1)}$. Ainsi, il est possible d'imposer aisément la convergence de e_{i+1}^i par le choix de la commande auxiliaire :

$$m_{4(i+1)} = -k e_{i+1}^i \quad \text{avec } k > 0 \quad (2.29)$$

En effet, cela impose que $\dot{e}_{i+1}^i = -k e_{i+1}^i$, et donc que l'erreur converge exponentiellement vite selon la loi : $e_{i+1}^i(t) = e_{i+1}^i(t=0)e^{-kt}$.

Le temps de réponse à 5%, noté $t_{5\%}$, est déterminé par k , par la relation :

$$0.05 = e^{-kt_{5\%}} \quad (2.30)$$

Le temps de réponse désiré peut donc être imposé en choisissant k comme suit :

$$k = \frac{\ln(20)}{t_{5\%}} \simeq \frac{3}{t_{5\%}} \quad (2.31)$$

En reportant (2.29) dans (2.28), la commande longitudinale de proche-en-proche s'exprime sous la forme :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} + k e_{i+1}^i \right) \quad (2.32)$$

Les performances de cette commande seront discutées par la suite et observées dans le cadre de simulations. Cependant, il est d'ores et déjà possible de noter que les membres du convoi sont étudiés par paire et non pas comme une unique entité convoi.

2.3.3 Commande référencée sur le leader

L'approche développée ici a pour but de surmonter les défauts de l'approche de proche-en-proche en adressant la commande du convoi dans sa totalité. La méthode proposée consiste à recalculer les robots du convoi par rapport à l'un des leurs. Etant donné que chaque membre du convoi est susceptible de jouer ce rôle, il a été assigné arbitrairement au leader du convoi. Ce choix est naturel, car le leader joue un rôle particulier dans le convoi : si le leader est conduit par un opérateur humain (une application très répandue, notamment dans le cadre du ramassage de véhicules dans le projet Praxitèle [28]), toute la dynamique du convoi est dictée par le leader, qui n'est pas soumis aux commandes développées (car conduit manuellement). En conclusion, l'objectif de ce second type de commande est le suivant : les véhicules doivent respecter un certain écart, lié à leur position dans le convoi, avec leur leader, voir Fig. 2.20.

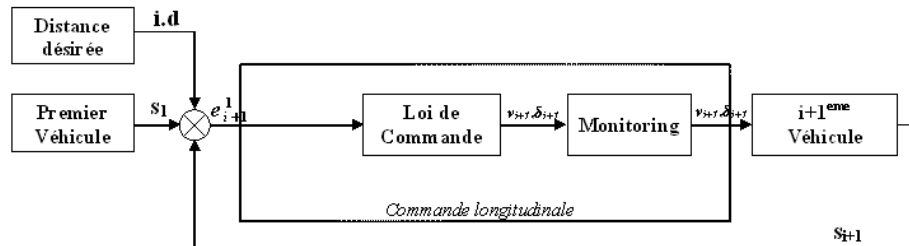


FIG. 2.20 – Commande référencée leader

La consigne à atteindre peut être formalisée ainsi : le $(i+1)^{eme}$ véhicule du convoi doit maintenir une distance $i d$ avec son leader. L'erreur de commande est donc ici :

$$e_{i+1}^1 = s_1 - s_{i+1} - i d \quad (2.33)$$

De même que précédemment, en dérivant l'expression (2.33), il est obtenu :

$$\dot{e}_{i+1}^1 = \dot{s}_1 - \dot{s}_{i+1} \quad (2.34)$$

En utilisant l'équation (2.2), (2.34) se ré-écrit :

$$\dot{e}_{i+1}^1 = \frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} - \frac{v_{i+1} \cos \tilde{\theta}_{i+1}}{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})} \quad (2.35)$$

d'où il est obtenu :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} - \dot{e}_{i+1}^1 \right) \quad (2.36)$$

Toujours en suivant une approche de linéarisation exacte, la commande longitudinale auxiliaire $m_{4(i+1)}$ est introduite, liée à v_{i+1} par :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} - m_{4(i+1)} \right) \quad (2.37)$$

En reportant (2.37) dans (2.36), le système linéaire $\dot{e}_{i+1}^1 = m_{4(i+1)}$ est obtenu, ce qui amène à proposer la commande auxiliaire :

$$m_{4(i+1)} = -k e_{i+1}^1 \quad \text{avec } k > 0 \quad (2.38)$$

Comme pour la commande de proche en proche, le gain k est choisi pour imposer le temps de réponse à 5% ($t_{5\%}$) selon la relation :

$$k = \frac{\ln(20)}{t_{5\%}} \simeq \frac{3}{t_{5\%}} \quad (2.39)$$

En reportant (2.38) dans (2.37), la commande longitudinale référencée sur le leader s'exprime sous la forme :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1}} \left(\frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} + k e_{i+1}^1 \right) \quad (2.40)$$

Les difficultés liées à la commande de proche-en-proche sont ainsi surmontées. Les performances et les faiblesses de cette commande sont vues plus en détail dans la sous-section suivante et comparées à celles de la commande de proche-en-proche.

2.3.4 Simulations des deux approches de commande longitudinale

Le simulateur présenté à la fin de la section sur la commande latérale est également utilisé pour évaluer le comportement des lois de commande longitudinales. Les paramètres de la commande latérale restent inchangés. Pour la commande longitudinale, les différents paramètres sont le mode de fonctionnement (proche-en-proche ou référencé leader), la distance inter-véhicules voulue d et le gain k de commande. Enfin, des bruits introduits sur le retour d'état (pour modéliser les bruits capteurs), le nombre de véhicules formant le convoi et leurs états initiaux sont également réglables par l'utilisateur. Les bruits des capteurs sont représentés par un bruit blanc d'écart-type de 10 cm. Le bruit est surestimé par rapport à ce qui sera relevé pendant les expérimentations, pour bien mettre en valeur les avantages de la commande longitudinale référencée leader sur celle locale.

Dans cette partie, un convoi composé de 10 éléments est considéré. Le gain k de la commande longitudinale est fixé à 0.6. Cette valeur correspond à un temps de réponse à 5% égal à 5 s ($t_{5\%} = 5$ s). Un tel délai est réaliste, car il offre de bonnes performances en fonctionnement standard sans pour autant engendrer des saturations de la commande en vitesse. Il sera fixé ainsi lors des expérimentations décrites par la suite.

A l'instant initial, chaque composant du convoi présente un écart latéral de 1m avec le parcours de référence et un écart angulaire proche de zéro. Enfin, l'écart entre véhicules est proche de la consigne d fixée à 8m. Après avoir atteint en 10 secondes une vitesse de 2m/s, le leader maintient cette vitesse durant toute la simulation. Pour comparaison, deux simulations avec les différentes approches de contrôle longitudinal sont réalisées et reportées.

2.3.4.1 Commande Proche-en-proche

Simulation 4 :

Afin de comparer les différents écarts inter-véhicules, la figure 2.21 illustre l'écart de chaque élément du convoi avec le leader.

Comme énoncé dans la présentation de cette approche, une accumulation d'erreurs apparaît de véhicules en véhicules : le tableau Tab. 2.2 met en évidence cette accumulation d'erreurs via l'écart-type mesuré pour chaque véhicule. Ce comportement oscillatoire se traduit en réalité par une succession d'accélération/décélérations provoquant l'inconfort des passagers, et pouvant même, avec des capteurs moins précis et une consigne d'inter-distance plus courte, engendrer des collisions. Cette accumulation d'erreurs est perceptible visuellement sur la Figure 2.21, par exemple à $t = 18$ s. L'observation de la figure 2.22 met encore plus clairement en évidence cette accumulation d'erreurs : sur le tracé, la détérioration des commandes entre les véhicules 5 et 10 est nettement visible.

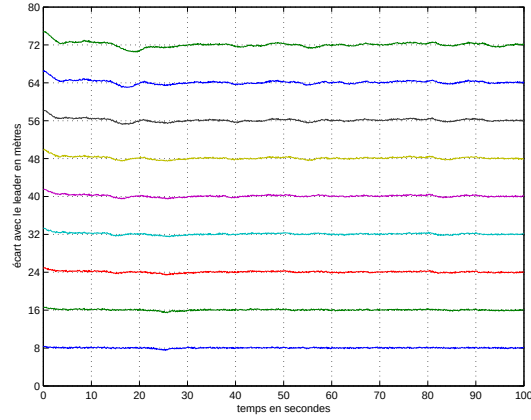


FIG. 2.21 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 4

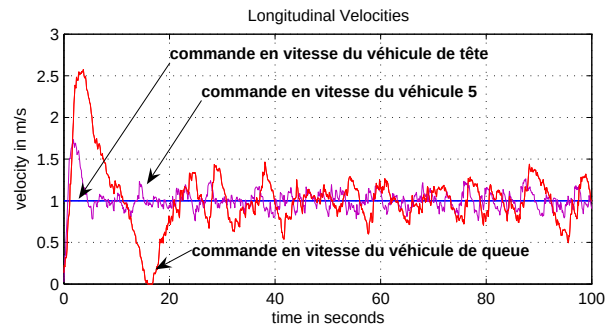


FIG. 2.22 – Commandes en vitesse - Simulation 4

Ecart	Erreur Moyenne	Ecart-Type
Véhicule 2	2.7 cm	11.1 cm
Véhicule 3	3.1 cm	13.6 cm
Véhicule 4	3.1 cm	16.2 cm
Véhicule 5	5.0 cm	16.5 cm
Véhicule 6	7.1 cm	18.0 cm
Véhicule 7	6.6 cm	20.2 cm
Véhicule 8	6.4 cm	22.0 cm
Véhicule 9	5.5 cm	23.3 cm
Véhicule 10	1.3 cm	31.3 cm

TAB. 2.2 – Performances longitudinales du proche-en-proche - Simulation 4

2.3.4.2 Commande référencée sur le leader du convoi

Simulation 5 :

Les performances de l'approche référencée leader sont illustrées par la figure 2.23.

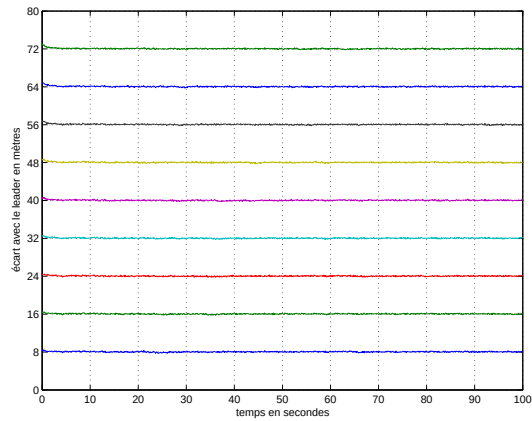


FIG. 2.23 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 5

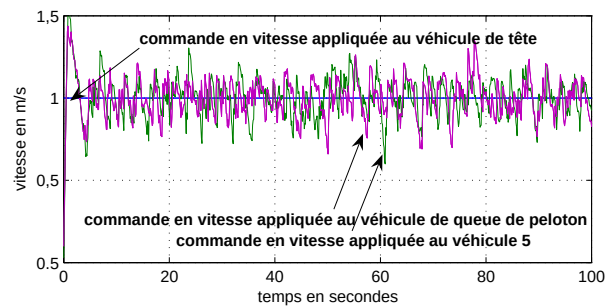


FIG. 2.24 – Commandes en vitesse appliquées - Simulation 5

Ecart	Erreur Moyenne	Ecart-Type
Véhicule 2	0.4 cm	9.5 cm
Véhicule 3	0.3 cm	8.8 cm
Véhicule 4	1.5 cm	9.2 cm
Véhicule 5	1.5 cm	9.1 cm
Véhicule 6	2.3 cm	9.6 cm
Véhicule 7	1.6 cm	9.2 cm
Véhicule 8	1.0 cm	8.8 cm
Véhicule 9	1.2 cm	9.1 cm
Véhicule 10	1.7 cm	8.9 cm

TAB. 2.3 – Performances longitudinales du référencé leader - Simulation 5

Les résultats obtenus sont bien meilleurs : visuellement, aucune accumulation d'erreurs n'est observable sur la figure 2.23. Le tableau Tab. 2.3 montre bien que l'écart entre les véhicules n'est effectivement pas soumis à l'accumulation d'erreurs : l'écart-type entre les différents véhicules reste dans le même ordre de grandeur que celui du bruit introduit. Enfin, la figure 2.24 donne des commandes de même allure pour l'ensemble des éléments du convoi, ce qui prouve la non accumulation d'erreurs.

2.3.4.3 Comparaison des simulations

Un bilan des avantages et inconvénients des deux commandes précédentes est maintenant réalisé.

En premier lieu, les performances de régulation longitudinale de la commande de proche en proche sont inférieures à celles de la commande basée sur le leader. Cette différence s'accroît en queue de peloton. Ces baisses de performance s'expliquent par la structure même du convoi qui est représenté par une succession de deux robots. Ainsi, les erreurs de régulation engendrées par les bruits des capteurs vont s'accumuler de robots en robots. Cette accumulation se traduit par de grandes oscillations et des pics sur la commande. Par conséquent, de vives accélérations et décélérations sont ressenties par les passagers, surtout en fin de convoi.

A l'opposé, l'approche référencée sur le leader ne souffre pas de ces oscillations de la commande. Les commandes appliquées aux différents membres du convoi sont de même allure et la majorité des brusques à-coups est supprimée (les seules perturbations sur l'accélération ne peuvent venir que d'un comportement agressif du leader ou d'une hypothétique panne matérielle). Ceci est tout à fait logique puisque les phénomènes de propagation d'erreur sont éliminés. Tous les véhicules s'asservissent sur un véhicule commun : le leader. Le niveau confort est ainsi meilleur pour les passagers qu'avec la commande locale, et surtout il est identique quelle que soit la place des passagers dans le convoi.

Si le confort est assuré et les performances satisfaisantes (erreur de régulation du

même ordre que les erreurs introduites), l'approche référencée leader présente des inconvénients non négligeables. Le véhicule s'asservissant uniquement sur le leader, aucune information émanant des autres éléments n'est connue. Si un véhicule du convoi venait à être légèrement perturbé (bruit sur les capteurs par exemple) et à adopter une allure particulière, le suiveur continuerait son asservissement sur le leader sans se soucier de cette perturbation. Plus grave encore, il est impossible pour tout membre du convoi (à l'exception du leader et de son premier suiveur) de réagir pour éviter la collision si un véhicule venait à s'arrêter. La commande impose en effet aux véhicules de maintenir un écart avec le leader, même si un élément du convoi est victime d'une avarie. La sécurité n'est donc pas assurée avec cette approche.

Ce principal défaut de la commande référencée leader n'existe pas avec la commande locale. Le respect de la distance avec le véhicule précédent est en effet l'unique objectif de la commande. Le maintien d'un écart consigne est donc bien respecté. Les risques de collision sont ainsi écartés : si un véhicule venait à s'arrêter brutalement (panne, détection d'obstacle,...), le véhicule suivant stopperait, le suivant également, etc...

Un bilan synthétique des analyses faites permet de dresser le tableau Tab.2.4.

Critères de comparaison	Proche-en-proche	Référencée leader
performances de régulation	-	-
confort des passagers	-	+
sécurité du convoi	+	-

+ : Avantage
- : Inconvénient

TAB. 2.4 – Comparaison des deux approches de base

Le tableau indique clairement que les deux approches sont complémentaires : dans certaines situations, une approche est préférable ; mais si la situation venait à changer, l'autre serait souhaitée. Aussi, la synthèse d'une commande mixant les deux approches est proposée, avec le souci de tirer le maximum de leurs avantages, tout en éliminant leurs inconvénients : en cas de danger, l'approche locale est privilégiée ; tandis qu'en situation standard, l'approche référencée leader est préférée.

Pour cela, l'idée retenue est de définir, à partir des consignes des deux lois précédentes, une entrée pour la loi de commande, qui s'adapte selon l'état du convoi. Le fonctionnement d'une telle structure peut s'illustrer par la figure Fig.2.25.

2.3.5 Une stratégie de commande globale

2.3.5.1 Définition de la consigne de commande

Au regard du bilan précédent, une consigne de commande adaptée à l'état du convoi est synthétisée à partir des deux approches précédentes. Cette consigne de commande se base ainsi sur les erreurs définies dans les paragraphes précédents (2.24) et (2.33).

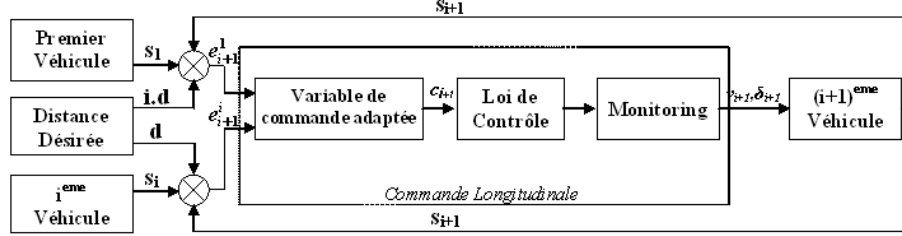


FIG. 2.25 – Contrôle longitudinal global

De ce fait, il est nécessaire d'adopter les deux configurations de communication des approches précédentes pour obtenir le schéma donné par la figure 2.26.

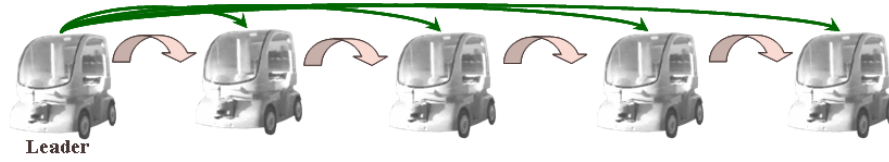


FIG. 2.26 – Communication pour une commande globale

Afin de donner plus ou moins d'importance à l'une ou à l'autre de ces erreurs, et donc plus ou moins d'influence à l'approche associée, la consigne adaptée, notée c_{i+1} , est construite comme suit :

$$c_{i+1} = \sigma_{i+1} e_{i+1}^1 + (1 - \sigma_{i+1}) e_{i+1}^i \quad (2.41)$$

Le paramètre σ_{i+1} , défini entre 0 et 1, permet de régler la prédominance de l'une ou l'autre des approches. L'étape suivante consiste à définir judicieusement σ_{i+1} de manière à quantifier cette influence.

Tout d'abord, le paramètre d_s est défini comme la distance curviligne minimale qui doit toujours être observée entre deux véhicules. Naturellement, cette limite est inférieure à la consigne de régulation d . Le choix entre l'une ou l'autre des 2 stratégies de commande s'articule alors autour de cette grandeur :

- si l'écart inter-véhicule est proche de la valeur critique d_s , les risques de collision, et donc l'insécurité du convoi, augmentent. De plus, l'inter-distance souhaitée d n'est pas respectée. Ainsi, le bilan précédent justifie l'idée d'employer l'approche de proche-en-proche dans cette configuration afin d'assurer une meilleure sécurité et de respecter l'inter-distance désirée. Par conséquent, une prédominance à l'approche locale doit être donnée, via le membre représentant l'erreur de proche-en-proche dans la consigne de commande. En ce sens, σ_{i+1} est choisi proche de 0, lorsque l'écart est proche de d_s .

- En fonctionnement standard (l'écart inter-véhicule est proche de d), il est essentiel d'assurer la stabilité du convoi, surtout si ce dernier est long. De plus, il serait agréable d'adopter une conduite confortable pour d'éventuels passagers. La commande de proche-en-proche n'est pas en mesure de fournir de telles performances, contrairement à la commande référencée sur le leader. Cette approche doit donc être prédominante quand les situations dangereuses sont écartées, c'est à dire lorsque la distance entre deux robots est proche ou supérieure à d . σ_{i+1} est donc choisi proche de 1 dans de pareils cas.

Le bilan de ces observations se résume de la sorte :

- si l'écart est proche de d_s , l'erreur e_{i+1}^i , définie en (2.24), est proche de $-d + d_s$. Dans ce cas, σ_{i+1} doit être proche de 0.
- si l'écart est voisin ou supérieur à d , l'erreur e_{i+1}^i est voisine de 0 ou positive. Dans ce cas, σ_{i+1} doit être proche de 1.

Une des manières de formaliser ces conditions est de se baser sur une fonction sigmoïde de la forme :

$$\sigma_{i+1}(z_{i+1}) = 0.5 \left(\frac{1 - e^{-az_{i+1}}}{1 + e^{-az_{i+1}}} + 1 \right) = \frac{1}{1 + e^{-az_{i+1}}} \quad \text{avec } a > 0 \quad (2.42)$$

Une fonction sigmoïde assure une commutation de 0 à 1 lorsque sa variable passe par 0. Dans ces travaux, le comportement voulu est une commutation de 0 à 1 entre $e_{i+1}^i = -d + d_s$ et $e_{i+1}^i = 0$. Par conséquent, la variable de la fonction sigmoïde doit être choisie comme suit :

$$z_{i+1} = e_{i+1}^i + \frac{d - d_s}{2} \quad (2.43)$$

L'allure de la fonction σ_{i+1} définie dans (2.42) peut être observée sur la figure 2.27.

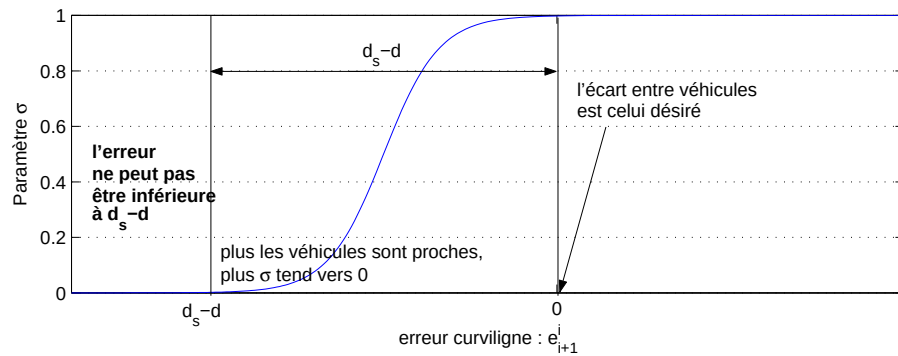


FIG. 2.27 – Fonction σ_{i+1}

2.3.5.2 Synthèse de la loi de commande

Une fois la consigne de commande déterminée, la loi de commande peut être construite. En différenciant la consigne adaptée (2.41), la relation suivante est obtenue :

$$\dot{c}_{i+1} = \sigma_{i+1} \dot{e}_{i+1}^1 + (1 - \sigma_{i+1}) \dot{e}_{i+1}^i + \dot{\sigma}_{i+1} e_{i+1}^1 - \dot{\sigma}_{i+1} e_{i+1}^i \quad (2.44)$$

Afin de simplifier les expressions, il est introduit :

$$A(z_{i+1}) = \frac{a e^{-az_{i+1}}}{(1 + e^{-az_{i+1}})^2} \quad (2.45)$$

Ainsi, $\dot{\sigma}_{i+1}$ s'exprime simplement :

$$\dot{\sigma}_{i+1} = A(z_{i+1}) \dot{e}_{i+1}^i \quad (2.46)$$

Des méthodes similaires à celles utilisées pour les commandes précédentes permettent de construire la commande : en explicitant $\dot{e}_{i+1}^1$, $\dot{e}_{i+1}^i$ et $\dot{\sigma}_{i+1}$ dans (2.44), il est possible de linéariser exactement le comportement longitudinal en introduisant la commande longitudinale auxiliaire $m_{4(i+1)}$ liée à v_{i+1} par :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} \frac{c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1} [1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)]}}{\cos \tilde{\theta}_{i+1} [1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)]} \left(\sigma_{i+1} \frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 \frac{c(s_1)}{\cos \tilde{\theta}_1}} + [1 - \sigma_{i+1} + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)] \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i \frac{c(s_i)}{\cos \tilde{\theta}_i}} - m_{4(i+1)} \right) \quad (2.47)$$

En effet, en reportant (2.47) dans (2.44), il est possible de vérifier qu'il est obtenu : $\dot{c}_{i+1} = m_{4(i+1)}$.

Pour pouvoir exploiter la commande auxiliaire $m_{4(i+1)}$, il faut au préalable s'assurer que la transformation (2.47) est inversible. Cette transformation fait apparaître au dénominateur la quantité $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)$. Cette quantité peut s'annuler dans d'exceptionnelles situations. Cependant, dans la pratique, elles sont extrêmement rares et ne se produisent pas dans les situations standards du convoi.

Pour clarifier ce point, il est à remarquer tout d'abord que $s_1 - s_i - id + d = e_i^1$. Par conséquent, la condition d'annulation du dénominateur de (2.47) peut se ré-écrire comme suit :

$$1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) = 1 + A(z_{i+1}) e_i^1 = 1 + \frac{a e^{-az_{i+1}}}{(1 + e^{-az_{i+1}})^2} e_i^1 = 0 \quad (2.48)$$

d'où la solution suivante est extraite :

$$e_i^1 = - \frac{(1 + e^{-az_{i+1}})^2}{a e^{-az_{i+1}}} \quad (2.49)$$

Ce qui équivaut à l'expression suivante :

$$e_{i+1}^i = \frac{1}{a} \left[\ln(2) - \ln \left(-2 - a e_i^1 \pm \sqrt{a e_i^1 (a e_i^1 + 4)} \right) \right] - \frac{d - d_s}{2} \quad \text{pour } e_i^1 \in] - \infty; -\frac{4}{a} [\quad (2.50)$$

Cette condition définit la valeur que doit prendre e_{i+1}^i en fonction de e_i^1 et de a pour que la loi de commande soit singulière. La figure 2.28 représente la valeur à donner à e_{i+1}^i pour voir apparaître une singularité sur la commande, en fonction de e_i^1 , avec a fixé. Il apparaît qu'une singularité n'intervient, pour a fixé, que :

- si l'erreur entre le véhicule i et le leader est inférieure ou égale à $-4/a$,
- et si l'erreur entre les véhicules i et $(i+1)$ est l'une des 2 valeurs spécifiées par l'équation (2.50).

Par conséquent, pour qu'une singularité se présente, le véhicule i doit être à une certaine distance du leader et, en fonction de cet espacement, le véhicule $i+1$ doit également se situer à une distance spécifique du véhicule le précédant. Cette situation ne peut pas se produire si les véhicules sont proches de la situation standard attendue pour le convoi. De plus, même si ces conditions se produisaient, le "Monitoring" présenté au Chapitre III permettra de surmonter ces singularités.

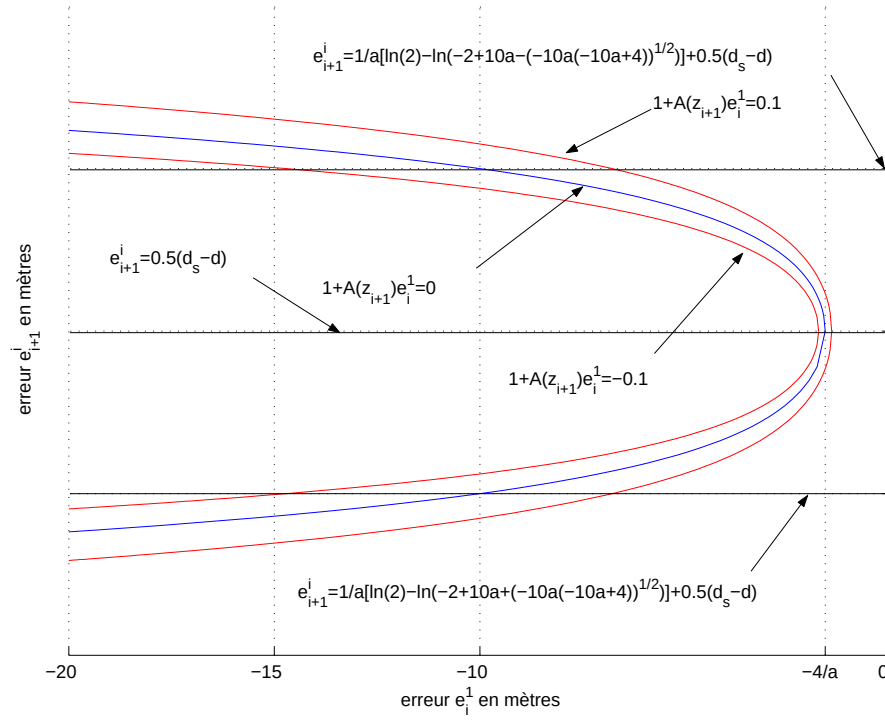


FIG. 2.28 – Valeurs singulières prises par e_{i+1}^i en fonction de e_i^1 pour a fixé positif

Le problème de l'inversibilité de la transformation (2.47) ayant été discuté, la synthèse de la loi de commande peut se terminer. La transformation (2.47) assure que l'évolution de l'erreur est donnée par le système linéaire $\dot{c}_{i+1} = m_{4(i+1)}$, ce qui amène à proposer la commande auxiliaire :

$$m_{4(i+1)} = -k c_{i+1} \quad \text{avec} \quad k > 0 \quad (2.51)$$

Le choix du gain longitudinal k permet alors d'imposer le temps de réponse à 5% ($t_{5\%}$) via la relation (2.30) :

$$k = \frac{\ln(20)}{t_{5\%}} \simeq \frac{3}{t_{5\%}} \quad (2.52)$$

En reportant (2.51) dans (2.47), la loi de commande globale s'exprime comme :

$$v_{i+1} = \frac{1-y_{i+1} \ c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1} [1+A(z_{i+1})(s_1-s_i-id+d)]} \left(\sigma_{i+1} \frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1-y_1 \ c(s_1)} + [1 - \sigma_{i+1} + A(z_{i+1})(s_1 - s_i + d - id)] \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1-y_i \ c(s_i)} + k c_{i+1} \right) \quad (2.53)$$

La loi de commande (2.53) répond aux attentes, puisque par construction, quand deux véhicules sont trop proches, le contrôleur privilégie une commande basée sur le véhicule précédent. Alors que si les robots sont assez éloignés, chaque robot maintient une distance constante avec le leader. Cette commande permet de rendre le convoi plus stable et confortable, tout en assurant la sécurité en respectant l'inter-distance désirée. Les performances de cette commande sont présentées dans la partie suivante.

2.3.5.3 Simulations

Le même simulateur que précédemment est utilisé. Les paramètres d_s et a de la commande globale (permettant de définir les fonctions σ) sont choisis comme suit : $d_s = 3 \text{ m}$ et $a = 2.5$.

Simulation 6 :

Cette simulation reprend les mêmes conditions que celles des simulations visant à évaluer les performances des lois de commande longitudinale de proche en proche et référencée leader.

Comme attendu, les performances longitudinales sont très proches de l'approche référencée sur le leader, voir Fig. 2.29 et Tab. 2.5. En effet, comme la distance entre véhicules est proche de la consigne, l'approche basée sur le leader est très prédominante. La figure 2.31 indique la valeur de σ_{i+1} et donc l'importance de chaque approche dans la commande globale : σ_{i+1} est bien très proche de 1, ce qui signifie que la commande globale se base essentiellement sur l'approche référencée leader. De même, les commandes appliquées (Fig. 2.29) sont semblables à celles appliquées dans l'approche référencée leader.

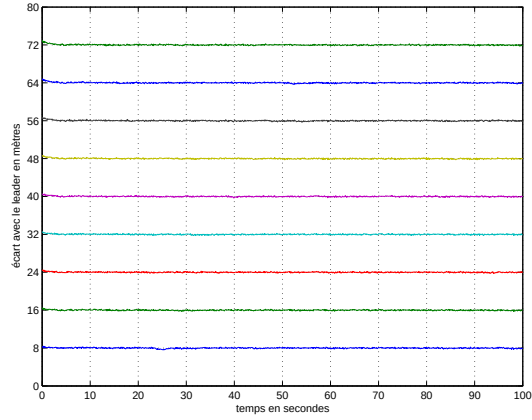


FIG. 2.29 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 6

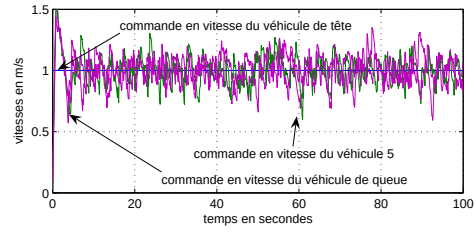
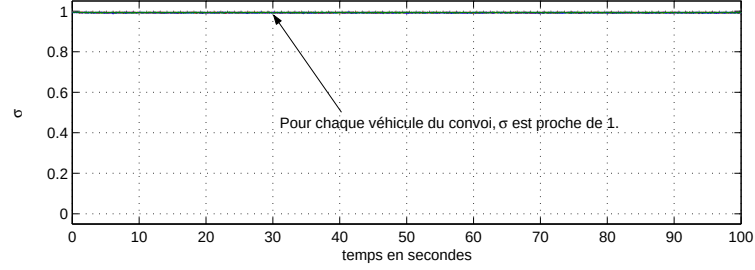


FIG. 2.30 – Commandes en vitesse appliquées - Simulation 6

Ecart	Erreur Moyenne	Ecart-Type
Véhicule 2	1.0 cm	9.8 cm
Véhicule 3	1.0 cm	9.0 cm
Véhicule 4	0.5 cm	8.8 cm
Véhicule 5	1.1 cm	9.0 cm
Véhicule 6	0.8 cm	9.0 cm
Véhicule 7	1.6 cm	9.2 cm
Véhicule 8	1.9 cm	9.2 cm
Véhicule 9	1.0 cm	9.0 cm
Véhicule 10	0.7 cm	8.7 cm

TAB. 2.5 – Performances longitudinales de la commande globale - Simulation 6

FIG. 2.31 – Paramètre σ_{i+1} - Simulation 6**Simulation 7 :**

Malheureusement, des risques de saturation peuvent apparaître, même si les consignes sont respectées. Pour la simulation 7, dont les résultats sont reportés sur les figures 2.32 et 2.33, les robots mobiles sont initialement très espacés ($16m$ d'inter-distance alors que la consigne est $8m$). Sur la figure 2.33 des vitesses très élevées sont observables, ce qui sous-entend également des accélérations très importantes.

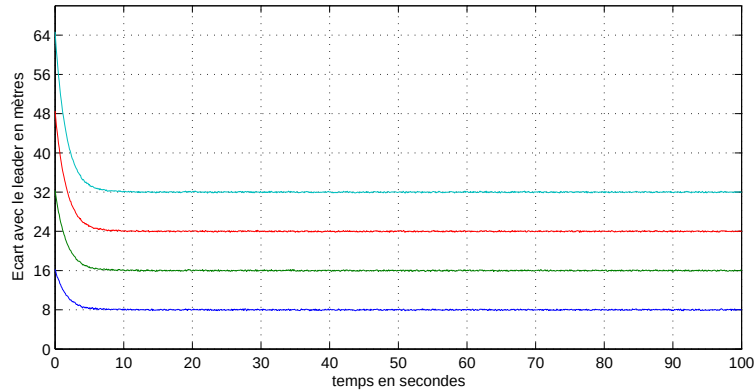


FIG. 2.32 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 7

Etant donné que la commande longitudinale a été construite pour imposer une convergence exponentielle des erreurs, il est logique que la commande soit élevée si les erreurs initiales sont larges. Une des manières d'éliminer le problème serait de diminuer le gain k . Malheureusement, dans les conditions nominales de fonctionnement du convoi, les performances longitudinales se trouveraient alors altérées. Une autre manière est d'adapter ce gain en fonction des saturations du système. C'est ce qui est traité dans la section suivante.

Les simulations avec des écarts inter-véhicules plus faibles, où la commande globale commute vers une commande de proche-en-proche sont présentées également à la section suivante, après que le gain adaptatif ait été introduit.

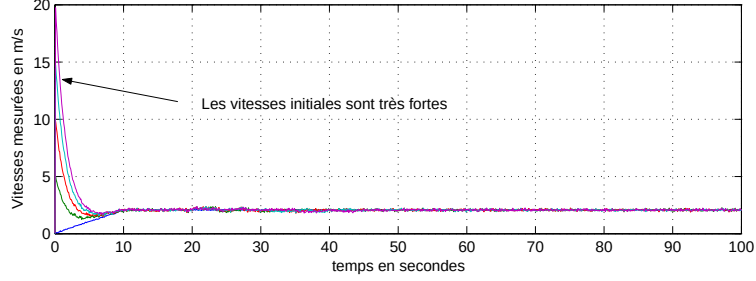


FIG. 2.33 – Vitesses mesurées - Simulation 7

2.4 Gestion des saturations en vitesse et en accélération

Cette section traite la saturation de la commande calculée, de manière à ce que les commandes appliquées aux membres du convoi soient dans des plages acceptables. En effet, les vitesses appliquées au convoi ne doivent pas dépasser la vitesse maximale des véhicules, notée v_{max} , et également ne pas induire une accélération/décélération trop importante.

En premier lieu, les objectifs désirés sont expliqués. En second lieu, la saturation en vitesse est adressée par l'introduction de gains adaptatifs. Ensuite, la saturation en accélération est traitée. Enfin, les performances obtenues avec la gestion des saturations sont validées par simulation dans une quatrième partie.

2.4.1 Objectifs

La dynamique des lois de commande (2.32), (2.40) et (2.53) est directement liée au gain k . En effet, plus ce gain est élevé, plus le véhicule converge rapidement vers la consigne, mais des risques de saturation, de même que des risques d'instabilité engendrés par les bruits de mesure, apparaissent. Au contraire, si le gain est faible, ces risques disparaissent, mais les performances de la commande diminuent. Aussi, faut-il choisir judicieusement k afin de ne pas saturer le système tout en conservant des performances satisfaisantes.

Dans les simulations précédentes, le gain k est fixé de manière à prodiguer de bonnes performances en conditions standards. Cependant, si le convoi ne respecte pas ces conditions standards (par exemple : véhicules trop éloignés), il est possible que la commande soit trop élevée, voir la simulation 7. Ainsi, pour un même gain, la commande calculée peut être satisfaisante ou non, en fonction de l'état du convoi.

L'objectif est donc de calculer une commande adaptée, c'est-à-dire une commande restant dans une plage de fonctionnement valide. Cette plage est définie de la manière suivante : la commande en vitesse ne doit pas dépasser une valeur maximale v_{max} et rester positive. De plus, pour éviter de brusques variations, la dérivée de la commande se doit d'être bornée : l'accélération/décélération des véhicules ne doit pas dépasser une accélération a_{conf} (sauf en cas d'urgence, cas envisagé au Chapitre III). Celle-ci est

choisie de manière à être suffisamment confortable pour les passagers. Ces objectifs se ré-expriment comme suit :

$$\begin{aligned} 0 &\leq v_{i+1} \leq v_{max} \\ -a_{conf} &\leq a_{i+1} \leq a_{conf} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Afin de réaliser ces objectifs, une méthode consiste à adapter le gain k de la commande en fonction de l'état du convoi. Le gain calculé se nomme gain adaptatif. Ainsi, si les véhicules sont trop éloignés, le gain k s'adapte en diminuant suffisamment pour que la commande reste dans la plage de fonctionnement définie en (2.54). A l'inverse, en conditions standards, le gain k est maximum, et noté k_{max} . Ce type d'approche se retrouve dans la littérature, notamment dans [134], [9]. La suite de la section détaille la construction du gain adaptatif k .

2.4.2 Gains adaptatifs pour saturer la vitesse

L'objectif de ce paragraphe est de faire évoluer le gain de la commande longitudinale de manière à éviter des saturations sur la vitesse des membres du convoi.

Même si la définition d'un gain adaptatif pour les lois de commande locale et référencée leader n'est pas nécessaire (la loi de commande globale étant utilisée par la suite), la synthèse de tels gains permet de valider les performances désirées et de les comparer à celles du gain de la commande globale lorsque σ_{i+1} est proche de 0 ou de 1.

Ainsi, la synthèse d'un gain adaptatif pour chacune des commandes développées (locale, référencée leader et globale) est exposée. Puis, pour vérification, ce gain est comparé aux gains calculés précédemment.

2.4.2.1 Synthèse de gains adaptatifs pour la commande de proche-en-proche

La 1^{ière} ligne de (2.54) s'écrit :

$$0 \leq v_{i+1} \leq v_{max} \quad (2.55)$$

Dans le cas de la commande de proche-en-proche, v_{i+1} est donné par l'expression (2.32). Pour construire le gain adaptatif, il est supposé que la consigne latérale est parfaitement satisfaite, c'est-à-dire les erreurs latérales et angulaires des véhicules i et $(i+1)$ sont supposées nulles. Dans ce cas, il reste :

$$0 \leq v_i + ke_{i+1}^i \leq v_{max} \quad (2.56)$$

L'expression (2.56) peut encore s'écrire :

$$-v_i \leq ke_{i+1}^i \leq v_{max} - v_i \quad (2.57)$$

Les 3 inégalités suivantes sont déduites :

$$\begin{aligned} \frac{-v_i}{e_{i+1}^i} &\leq k \leq \frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i} & \text{si } e_{i+1}^i > 0 \\ \frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i} &\leq k \leq \frac{-v_i}{e_{i+1}^i} & \text{si } e_{i+1}^i < 0 \\ k & & \text{quelconque si } e_{i+1}^i = 0 \end{aligned} \quad (2.58)$$

De plus, comme $0 < k \leq k_{max}$, les inéquations que doit vérifier k s'expriment finalement comme :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\frac{-v_i}{e_{i+1}^i}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^i = 0 \end{aligned} \quad (2.59)$$

2.4.2.2 Synthèse de gains adaptatifs pour l'approche basée sur le leader

La synthèse d'un gain adaptatif pour la loi de commande référencée leader est réalisée de la même manière que pour la commande de proche-en-proche.

Les objectifs (2.54) s'écrivent toujours :

$$0 \leq v_{i+1} \leq v_{max} \quad (2.60)$$

Cette fois v_{i+1} est donnée par l'expression (2.40). Si les consignes latérales des véhicules 1 et $i + 1$ sont supposées satisfaites, il est obtenu :

$$0 \leq v_1 + ke_{i+1}^1 \leq v_{max} \quad (2.61)$$

soit encore :

$$-v_1 \leq ke_{i+1}^1 \leq v_{max} - v_1 \quad (2.62)$$

Les 3 inéquations suivantes sont déduites :

$$\begin{aligned} \frac{-v_1}{e_{i+1}^1} &\leq k \leq \frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1} & \text{si } e_{i+1}^1 > 0 \\ \frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1} &\leq k \leq \frac{-v_1}{e_{i+1}^1} & \text{si } e_{i+1}^1 < 0 \\ k &\leq \text{quelconque} & \text{si } e_{i+1}^1 = 0 \end{aligned} \quad (2.63)$$

Or, comme $0 < k \leq k_{max}$, il est finalement obtenu :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\frac{-v_1}{e_{i+1}^1}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^1 = 0 \end{aligned} \quad (2.64)$$

2.4.2.3 Gain adaptatif pour la commande globale

Si la commande globale (2.47) est reportée dans la première ligne de (2.54) (en supposant toujours que les consignes latérales des véhicules 1, i et $i + 1$ sont satisfaites), il est obtenu :

$$0 \leq \frac{(\sigma_{i+1}v_1 + [1 - \sigma_{i+1} + A(z_{i+1})(s_1 - s_i + d - id)]v_i + kc_{i+1})}{1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)} \leq v_{max} \quad (2.65)$$

Pour isoler k à partir de (2.65), il faut tenir compte du signe de $1 + A(z_{i+1})e_i^1$ (où $e_i^1 = s_1 - s_i - id + d$) et du signe de c_{i+1} .

– Si $1 + A(z_{i+1})e_i^1 > 0$,

* si $c_{i+1} > 0$:

$$\frac{-\sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \leq k \leq \frac{v_{max}(1+A(z_{i+1})e_i^1) - \sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \quad (2.66)$$

* si $c_{i+1} < 0$:

$$\frac{v_{max}(1+A(z_{i+1})e_i^1) - \sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \leq k \leq \frac{-\sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \quad (2.67)$$

* si $c_{i+1} = 0$: k peut être quelconque

– Si $1 + A(z_{i+1})e_i^1 < 0$

* si $c_{i+1} > 0$:

$$\frac{v_{max}(1+A(z_{i+1})e_i^1) - \sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \leq k \leq \frac{-\sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \quad (2.68)$$

* si $c_{i+1} < 0$:

$$\frac{-\sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \leq k \leq \frac{v_{max}(1+A(z_{i+1})e_i^1) - \sigma_{i+1}v_1 - (1-\sigma_{i+1})v_i - A(z_{i+1})v_i e_i^1}{c_{i+1}} \quad (2.69)$$

* si $c_{i+1} = 0$: k peut être quelconque.

– Si $1 + A(z_{i+1}) = 0$, la commande est singulière !

Le gain adaptatif à utiliser dans la commande globale s'obtient alors en assurant dans les inéquations (2.66) à (2.69) que $0 < k \leq k_{max}$ au moyen de la fonction *min*, comme cela avait été fait dans les sections 2.4.2.1 et 2.4.2.2.

2.4.2.4 Comparaison des gains calculés précédemment

Les gains obtenus pour la commande globale peuvent être comparés aux gains pour la commande de proche-en-proche et pour la commande référencée leader. En effet, en fixant $\sigma_{i+1} = 0$ ou $\sigma_{i+1} = 1$, les expressions des gains doivent être équivalentes.

– Avec $\sigma_{i+1} = 0$, les gains pour la commande globale et de proche-en-proche doivent être identiques.

Dans ce cas, e_{i+1}^i est proche de $-d + d_s$ et donc $A(z_{i+1}) \simeq 0$. Donc, l'expression de k est donnée par (2.66) et (2.67). De surcroît, dans cette situation, il est à remarquer que $c_{i+1} \simeq e_{i+1}^i$. Aussi, les inégalités (2.66)-(2.67) mènent à :

$$\begin{aligned} \frac{-v_i}{e_{i+1}^i} &\leq k \leq \frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i} & \text{si } e_{i+1}^i \simeq c_{i+1} > 0 \\ \frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i} &\leq k \leq \frac{-v_i}{e_{i+1}^i} & \text{si } e_{i+1}^i \simeq c_{i+1} < 0 \end{aligned} \quad (2.70)$$

L'expression de k calculée pour l'approche locale (2.59) est bien retrouvée.

– En prenant $\sigma_{i+1} = 1$, le gain adaptatif pour la commande globale et celle référencée leader doivent être similaires.

Dans ce cas, e_{i+1}^i est nécessairement positif et donc $A(z_{i+1}) \simeq 0$. Donc, l'expression de k est toujours donnée par (2.66) et (2.67). Dans cette situation, il est à remarquer que $c_{i+1} \simeq e_{i+1}^1$. Par conséquent, les inégalités (2.66)-(2.67) mènent à :

$$\begin{aligned} \frac{-v_1}{e_{i+1}^1} &\leq k \leq \frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1} & \text{si } e_{i+1}^1 \simeq c_{i+1} > 0 \\ \frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1} &\leq k \leq \frac{-v_1}{e_{i+1}^1} & \text{si } e_{i+1}^1 \simeq c_{i+1} < 0 \end{aligned} \quad (2.71)$$

L'encadrement calculé avec l'approche basée sur le leader (2.64) est retrouvé.

Aussi, comme attendu, les contraintes sur les gains déterminées pour $\sigma_{i+1} = 0$ ou $\sigma_{i+1} = 1$ correspondent respectivement aux expressions pour les commandes locale et référencée leader.

2.4.3 Saturation en accélération

La saturation en vitesse étant adressée, l'étape suivante concerne la saturation en accélération. Pour cela, les gains adaptatifs sont d'abord utilisés : la synthèse de gains pour la commande de proche-en-proche et la commande référencée leader est présentée. Puis, l'accélération est saturée par l'analyse de la vitesse précédente.

2.4.3.1 Utilisation des gains adaptatifs

Synthèse de gains pour la commande de proche-en-proche :

Le gain recherché doit aussi respecter la seconde inégalité (2.54). Pour assurer une accélération dans la plage désirée, le gain k doit donc être choisi comme suit :

$$-a_{conf} \leq \dot{v}_i + k\dot{e}_{i+1}^i \leq a_{conf} \quad (2.72)$$

Par conséquent, puisque la loi de commande a été construite pour imposer $\dot{e}_{i+1}^i = -k\dot{e}_{i+1}^i$, alors k doit satisfaire (avec $a_i = \dot{v}_i$) :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\sqrt{\frac{a_{conf}+a_i}{e_{i+1}^i}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\sqrt{\frac{-a_{conf}+a_i}{e_{i+1}^i}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^i = 0 \end{aligned} \quad (2.73)$$

La combinaison de (2.73) et (2.59) fournit l'expression finale de k :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\frac{v_{max}-v_i}{e_{i+1}^i}, \sqrt{\frac{a_{conf}+a_i}{e_{i+1}^i}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\frac{-v_i}{e_{i+1}^i}, \sqrt{\frac{-a_{conf}+a_i}{e_{i+1}^i}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^i < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^i = 0 \end{aligned} \quad (2.74)$$

Synthèse de gains pour la commande référencé leader :

La seconde l'inégalité (2.54) fournit cette fois la contrainte suivante :

$$-a_{conf} \leq \dot{v}_1 + k\dot{e}_{i+1}^1 \leq a_{conf} \quad (2.75)$$

Puisque la loi de commande a été construite pour imposer $\dot{e}_{i+1}^1 = -ke_{i+1}^1$, il est obtenu (avec $a_1 = \dot{v}_1$) :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\sqrt{\frac{a_{conf}+a_1}{e_{i+1}^1}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\sqrt{\frac{-a_{conf}+a_1}{e_{i+1}^1}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^1 = 0 \end{aligned} \quad (2.76)$$

La combinaison de (2.76) et (2.64) fournit l'expression finale de k :

$$\begin{aligned} 0 < k &\leq \min\left(\frac{v_{max}-v_1}{e_{i+1}^1}, \sqrt{\frac{a_{conf}+a_1}{e_{i+1}^1}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 > 0 \\ 0 < k &\leq \min\left(\frac{-v_1}{e_{i+1}^1}, \sqrt{\frac{-a_{conf}+a_1}{e_{i+1}^1}}, k_{max}\right) & \text{si } e_{i+1}^1 < 0 \\ k &= k_{max} & \text{si } e_{i+1}^1 = 0 \end{aligned} \quad (2.77)$$

Malheureusement, les véhicules expérimentaux ne disposent pas d'un dispositif de mesures permettant d'accéder à l'accélération. Les gains adaptatifs calculés ci-dessus ne peuvent donc pas être implantés. Afin de surmonter cette difficulté, il est possible de se baser sur l'analyse des vitesses mesurées pour gérer la saturation en accélération.

2.4.3.2 Saturation en accélération grâce aux mesures précédentes

Comme la mesure de l'accélération est inaccessible, il est nécessaire de se fier à la vitesse précédente pour gérer les saturations en accélération.

$a_{i+1}(t)$ peut être approximée par $\frac{v_{i+1}(t)-v_{i+1}(t-T_e)}{T_e}$ où T_e est la période d'échantillonnage. En reportant ceci dans la seconde inégalité (2.54), il est obtenu :

$$-a_{conf} \leq \frac{v_{i+1}(t)-v_{i+1}(t-T_e)}{T_e} \leq a_{conf} \quad (2.78)$$

ce qui conduit à l'encadrement suivant pour la vitesse courante :

$$-a_{conf}T_e + v_{i+1}(t-T_e) \leq v_{i+1}(t) \leq a_{conf}T_e + v_{i+1}(t-T_e) \quad (2.79)$$

Dès lors, il convient de respecter que toute commande calculée (avec les gains adaptatifs assurant la saturation en vitesse) respecte cet encadrement et, au besoin, de limiter cette vitesse par une des bornes. Cela assure que l'accélération/décélération est également saturée de manière à ne pas excéder a_{conf} .

2.4.4 Validation des saturations en vitesse et en accélération par simulation

Simulation 8 :

La gestion des saturations intégrée à la commande doit permettre de surmonter les difficultés rencontrées dans la simulation 7, où les véhicules démarraient avec une inter-distance importante. Le convoi est donc simulé à nouveau, en reprenant les paramètres de la simulation 7, et en intégrant la gestion des saturations avec comme paramètres $v_{max} = 4m/s$ et $a_{conf} = 1m/s^2$. Les résultats obtenus sont conformes aux attentes : les saturations en vitesse, visibles sur la figure 2.34, sont celles voulues.

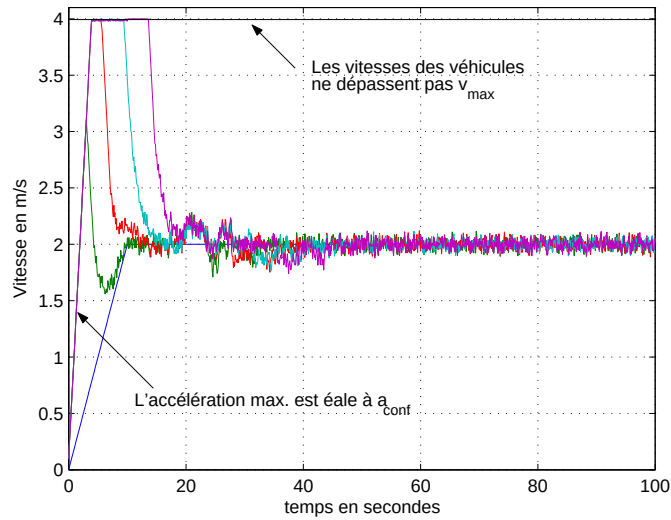


FIG. 2.34 – Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 8

Ces limitations en vitesse ont été obtenues grâce au gain adaptatif k , comme le témoigne la figure 2.35.

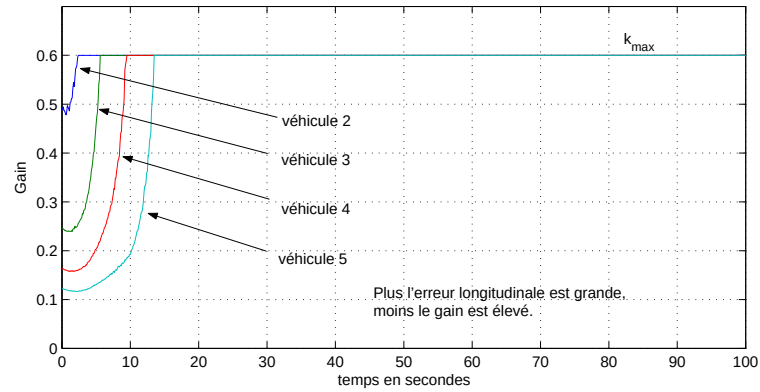


FIG. 2.35 – Gain adaptatif - Simulation 8

Enfin, l'introduction de ces saturations ne dégrade que la rapidité de la convergence : les écarts curvilignes désirés sont au final respectés, voir Fig. 2.36.

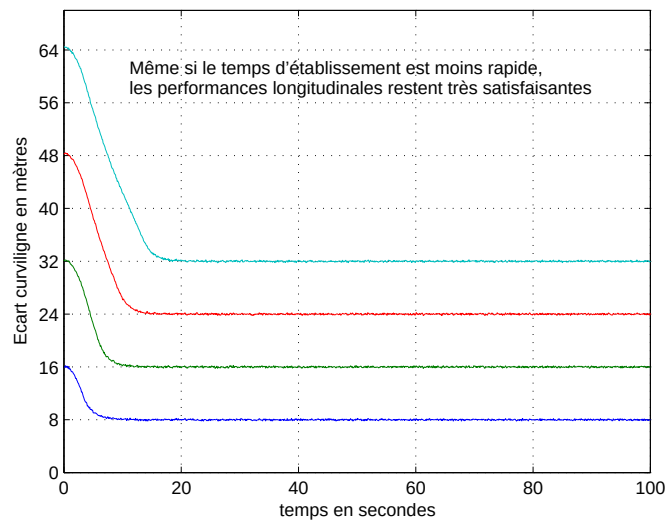


FIG. 2.36 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 8

Simulation 9 :

Dans cette simulation, les paramètres de la loi de commande globale restent les mêmes que précédemment, seules les configurations initiales des robots ont été modifiées : les véhicules sont placés par rapport au chemin de référence dans l'ordre inverse

à celui défini dans le convoi, comme le montre la figure 2.37. Ainsi, les véhicules du convoi s'accrochent au fur et à mesure au convoi, lors du passage du leader. Il est à noter que pour éviter tout risque de collision, l'erreur latérale initiale des véhicules est 7.50 m , soit largement supérieure à la largeur d'un véhicule.

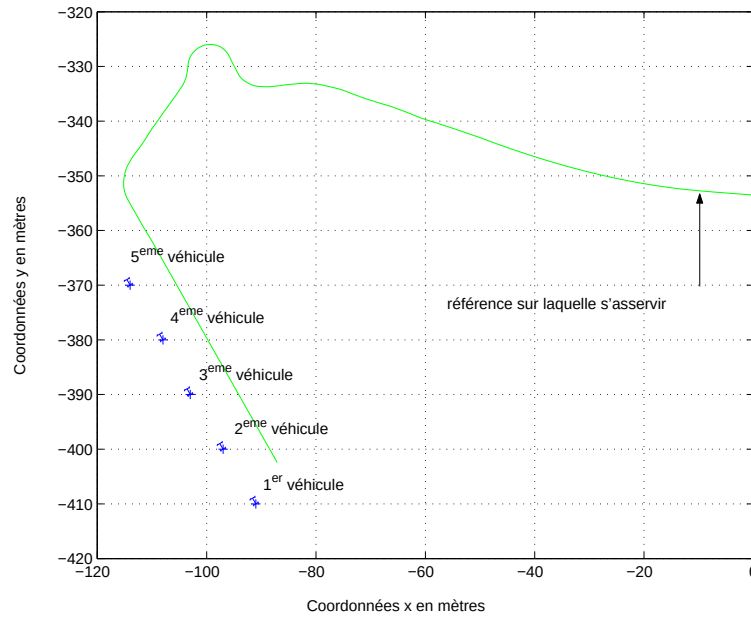


FIG. 2.37 – Chemin de référence et configurations initiales du convoi - Simulation 9

La figure 2.38 indique des performances très satisfaisantes : l'erreur curviligne étant du même ordre que les bruits capteurs introduits.

La gestion des saturations, grâce à l'introduction des gains adaptatifs (Fig. 2.40), fonctionne correctement : les accélérations/décélérations observées sur la figure 2.39 restent inférieures à a_{conf} et les véhicules restent à l'arrêt jusqu'à ce que les membres du convoi devant être placés devant eux, soient effectivement passés devant eux.

Au début de la simulation, les erreurs longitudinales étant inférieures à $-d + d_s$, la loi de commande globale se comportait comme une commande de proche-en-proche ($\sigma_{i+1} = 0$, voir Fig. 2.41). Puis, à mesure que l'erreur curviligne tend vers 0, la commande globale commute vers une commande référencée leader, comme désiré.

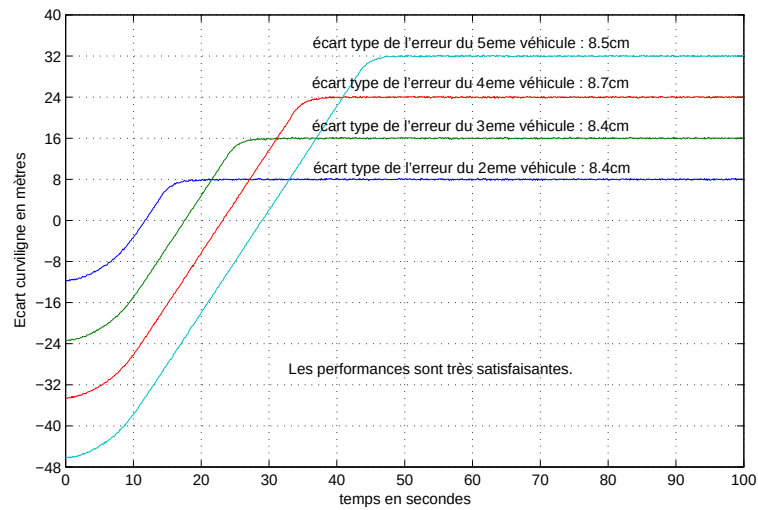


FIG. 2.38 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 9

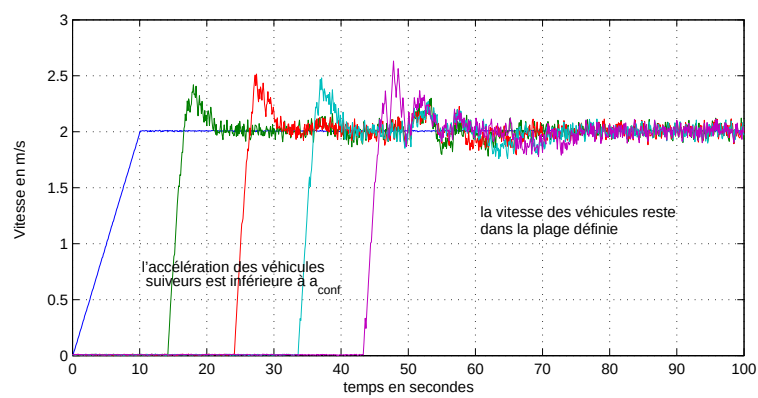


FIG. 2.39 – Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 9

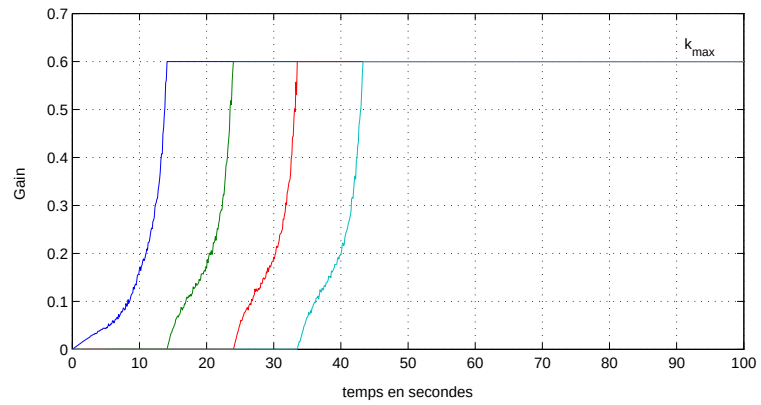
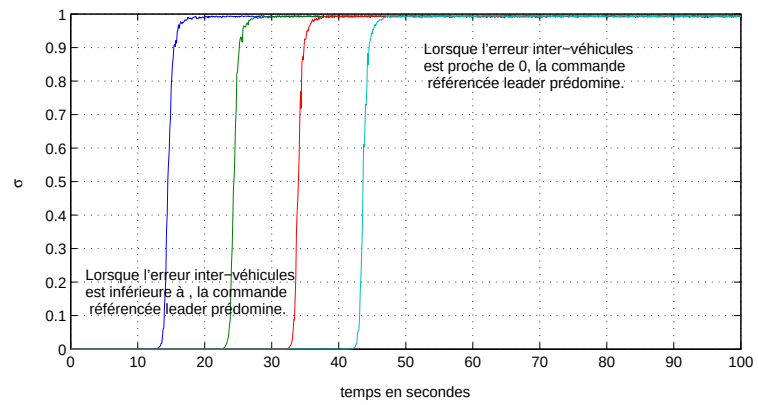


FIG. 2.40 – Evolution du gain adaptatif - Simulation 9

FIG. 2.41 – Evolution de σ_{i+1} - Simulation 9

Simulation 10 :

Par le biais du gain adaptatif, des accélérations/décélérations confortables sont assurées lors du déplacement du convoi, comme illustré sur les deux simulations précédentes. Cela peut, par contre, poser des problèmes sur le plan de la sécurité. La simulation suivante illustre ce problème. Dans cette simulation, les paramètres de la loi de commande restent identiques et le convoi est correctement initialisé : erreurs latérales et longitudinales quasi-nulles. Contrairement aux précédentes simulations, le leader atteint progressivement et maintient une vitesse de fonctionnement de $3.5m/s$, puis à $t = 50s$, décélère brutalement pour s'arrêter et repart finalement après $20s$. Les saturations en vitesse et accélération sont bien respectées, voir Fig. 2.42. Quand le leader stoppe, tous les suiveurs décélèrent progressivement avec une accélération de $-a_{conf}$. L'écart entre le leader et le premier suiveur chute brusquement, la commande du premier suiveur, initialement référencée leader, commute en proche-en-proche Fig. 2.43. Les autres inter-distances restant proches de la consigne (comme tous les véhicules décélèrent de manière identique au même instant), la commande de ces véhicules reste basée sur le leader.

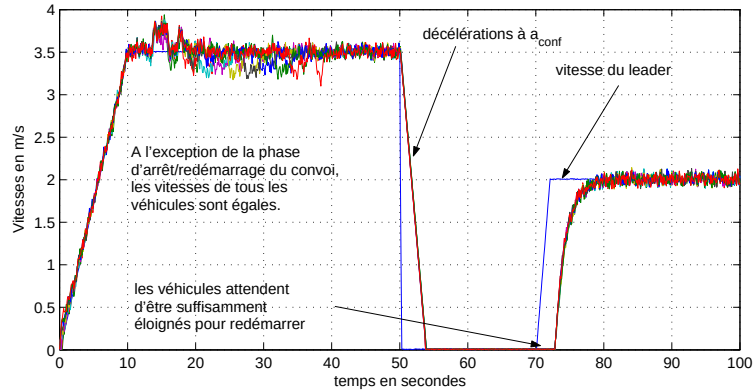
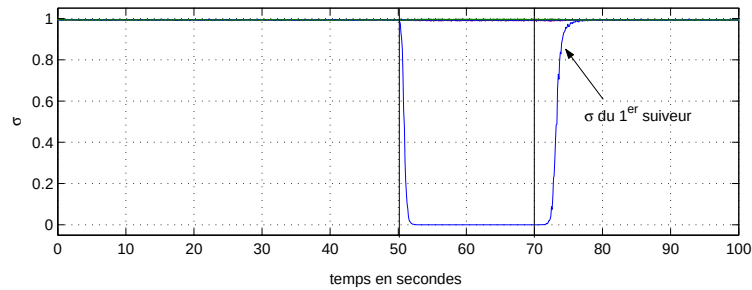


FIG. 2.42 – Vitesse des véhicules du convoi - Simulation 10

FIG. 2.43 – Evolution de σ_{i+1} - Simulation 10

Par conséquent, le comportement présenté par la commande est bien celui voulu. Cependant, l'étude de l'écart curviligne inter-véhicules montre des anomalies : lors de l'arrêt du leader, l'écart entre celui-ci et son suiveur est 1.30 m , ce qui est très différent de la consigne de 8.0 m . Les performances sont donc loin d'être respectées, voir Fig. 2.44 et Fig. 2.45. Pire, une distance de sécurité $d_s = 3.0\text{ m}$, en dessous de laquelle tout écart inter-véhicule est prohibé (collision), avait été définie et n'est pas respectée : les exigences de sécurité n'ont pas été satisfaites. Le leader a connu une décélération presque infinie (arrêt brusque). Pour respecter la distance de sécurité, il eut fallu que le 1^{er} suiveur (et les autres) décélèrent beaucoup plus vite qu'avec a_{conf} .

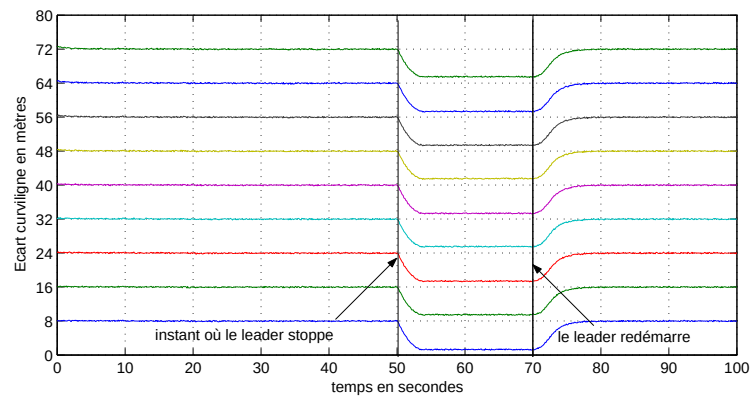


FIG. 2.44 – Ecart curviligne avec le leader - Simulation 10

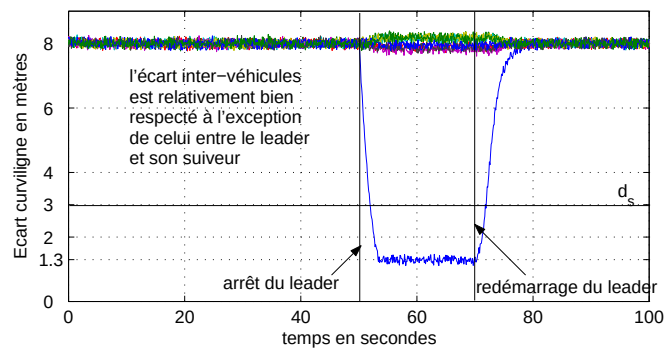


FIG. 2.45 – Ecart curviligne inter-véhicules - Simulation 10

Pour adresser ce problème, il est proposé dans le chapitre suivant de développer un module de supervision, nommé “Monitoring”, gérant le confort et la sécurité du convoi, en fonction de toutes les configurations susceptibles d’être rencontrées.

2.5 Bilan

Ce chapitre présente la synthèse de lois de commande originales gérant un convoi de véhicules du type voiture.

Un point essentiel de la méthode adoptée pour la synthèse consiste au découplage des commandes latérale et longitudinale. En effet, grâce à une linéarisation exacte (par chaînage du système), les performances de la loi de commande latérale sont rendues indépendantes de la vitesse des véhicules. De cette manière, la vitesse peut être utilisée librement pour assurer la commande longitudinale, il y a donc bien découplage entre les deux commandes.

La loi de commande longitudinale, basée également sur une approche linéarisation exacte, assure la régulation d’une inter-distance curviligne : la distance devant être respectée entre deux véhicules consécutifs dans le convoi est la distance le long du chemin de référence, et non pas la distance directe. Ceci permet d’assurer un comportement cohérent au convoi, même lors du suivi de trajectoires à fortes courbures.

Enfin, la loi de commande longitudinale est dite globale, car elle tient compte non seulement du véhicule précédent, mais également du véhicule de tête du convoi. Le recalage sur le leader permet d’éviter les oscillations du convoi observées lorsque des commandes de proche-en-proche sont utilisées (chaque véhicule est régulé sur le véhicule le précédant) en raison des accumulations d’erreur d’asservissement le long du convoi.

Un ensemble de simulations a été présenté et illustre les performances et les avantages de la commande proposée. Cependant, dans des situations a priori anormales, où les écarts longitudinaux sont très éloignés de la consigne, de fortes accélérations et des vitesses élevées peuvent être observées. Pour ramener ces grandeurs dans des plages acceptables et confortables pour l’utilisateur, des gains adaptatifs ont été introduits et corrigent efficacement ces défauts. En contre-partie, ces gains adaptatifs peuvent induire, dans de rares situations, des risques de collision jusque là absent. Ce dernier problème est adressé au Chapitre III via un module de supervision.

Chapitre 3

Commande du convoi incluant les situations exceptionnelles via un Monitoring

La loi de commande synthétisée dans le chapitre précédent offre de bonnes performances en conditions standards : les objectifs fixés sont respectés. Cependant, lorsque le convoi n'est pas correctement initialisé, la commande peut présenter des comportements non désirés, et notamment de fortes accélérations/décélérations. Afin de s'affranchir de tels comportements, il a été proposé de saturer la vitesse et l'accélération des véhicules. Cet ajout assure une commande réaliste pour les actionneurs du véhicule, et confortable pour les passagers, mais les exigences de sécurité peuvent ne plus être garanties dans certaines situations : par exemple, si le leader venait à ne pas respecter les saturations fixées (arrêt brutal,...), alors le premier suiveur, comme sa décélération est limitée, peut venir heurter le leader. Aussi, faut-il maintenant considérer toutes ces situations pour garantir un fonctionnement sûr du convoi.

Un module de supervision du système, nommé "Monitoring", est proposé dans ce chapitre pour adresser ce problème. Celui-ci a pour objectif d'adapter les performances de la commande au besoin de la situation rencontrée. Ce module de supervision comporte 2 fonctionnalités :

La première fonction de supervision, dite "de commande", concerne les performances de la loi de commande contrôlant le convoi. L'objectif est d'assurer au peloton de véhicules un comportement cohérent (saturations des vitesses et accélérations, marge de sécurité minimale à respecter entre les véhicules, etc.) face aux situations réelles rencontrées dans la pratique. Cette "fonction de commande" est présentée dans une première section.

La seconde fonction, dite "de coordination", est quant à elle d'un plus haut-niveau que celle pour la commande du convoi. En effet, celle-ci traite de l'interaction du convoi formé avec d'autres entités. Plus concrètement, la "fonction de coordination" gère l'insertion et la désinsertion de véhicules susceptibles d'intégrer ou de quitter le convoi déjà formé. Ces fonctionnalités sont exposées dans la deuxième section du chapitre.

Ensuite, afin de valider le module de supervision mis en place, une série de simulations illustre les performances de ce dernier. Pour cela, face à l'étendue des situations que peut rencontrer le convoi, et dont il faut tenir compte, une liste de différents scénarii a été dressée : chacun de ces scénarii soulève une difficulté particulière. Ainsi, les performances du module de supervision sont testées par la simulation des différents scénarii proposés. L'ensemble de ces simulations constitue la troisième section du chapitre.

3.1 Supervision de la commande du convoi

Dans cette section, il est proposé de greffer une fonction de supervision à la commande implantée pour gérer le convoi, de manière que celui-ci ait un comportement approprié aux transports de passagers en milieu urbain. L'objectif principal reste bien sûr d'assurer aux passagers du véhicule la sécurité, tout en assurant un confort décent. Pour ce faire, une unité gérant le confort et la sécurité est mise en place : celle-ci est basée sur un logigramme gérant l'accélération des véhicules en fonction de la distance intervéhicules. La première partie de la section expose ce module de "Confort/Sécurité". Malheureusement, la saturation des commandes en vitesse (introduite en fin de chapitre précédent) et en accélération (gestion du confort et de la sécurité) peut quelquefois, lors de situations exceptionnelles, provoquer des comportements pour le moins inattendus. Même si ces situations ne se rencontrent jamais en fonctionnement standard, il est possible, notamment en cas de pannes, de se retrouver devant ces singularités. Par devoir de rigueur, il est nécessaire de s'intéresser et traiter ces cas. A l'aide de gains adaptatifs, une solution aux singularités de la commande est apportée dans une seconde partie.

3.1.1 Confort et Sécurité du convoi

L'une des contraintes liées à la conduite en convoi reste d'assurer une sécurité et un confort suffisant pour les passagers des véhicules, tout en prodiguant des performances satisfaisantes sur l'évolution en convoi des véhicules.

Cette section aborde donc le confort et la sécurité du convoi. En premier lieu, la notion de confort est introduite. Puis, une méthode, permettant d'intégrer le confort à la commande, est proposée. En second lieu, la sécurité est définie et incorporée dans le fonctionnement du convoi.

3.1.1.1 Confort

Les maux des transports (cinétose) rencontrés par les usagers de la route sont essentiellement la conséquence de grandes accélérations : sur des chaussées en lacet, la succession de virages, provoquant des accélérations latérales (causées notamment par la force centrifuge) liées à la vitesse du véhicule, est une des meilleures illustrations. De même, la succession de fortes accélérations et freinages brutaux est très désagréable pour les passagers.

La notion de confort exposée ici est en rapport direct avec l'accélération des véhicules. L'approche proposée consiste donc à borner l'accélération/décélération des membres du convoi de manière à éliminer tout désagrément.

Dans l'application développée, les accélérations latérales (de l'ordre de $\frac{v^2}{R}$ où R est le rayon de courbure du chemin et v la vitesse du mobile) peuvent être négligées : l'environnement de travail étant en milieu urbain, donc à faible vitesse.

Par contre, les accélérations/décélérations longitudinales ne peuvent être négligées. Les simulations 7 et 8 du Chapitre II pour lesquelles les écarts initiaux inter-véhicules sont importants, prouvent la nécessité de saturer l'accélération des véhicules. De plus, une succession d'accélérations et de décélérations, engendrées par un bruit de mesure important, ne serait également pas agréable.

Par conséquent, la saturation de l'accélération par une valeur confortable a_{conf} , réalisée dans la section 2.4.3.2, répond tout à fait aux exigences de confort du convoi. Ainsi, a_{conf} représente la valeur maximale assurant une accélération/décélération confortable pour les passagers.

Une telle saturation n'est malheureusement pas sans conséquence sur les performances du convoi. La simulation 10 du Chapitre II, où le leader du convoi s'arrête brutalement, en est la preuve : d'une part, l'écart avec le leader n'est plus respecté, mais surtout le premier suiveur pénètre dans la zone de sécurité du leader.

Le fait que l'écart avec le leader ne soit plus celui désiré se comprend aisément : comme en régime nominal les véhicules circulent sensiblement tous à la même vitesse et comme la décélération des suiveurs est moins forte que celle du leader, l'espacement ne peut être respecté. Cela ne pose a priori aucun problème dans le fonctionnement du convoi. Le confort des passagers est, ainsi, délibérément privilégié (via une décélération bornée) devant les performances de régulation longitudinale.

Cependant, si le premier suiveur pénètre dans la zone de sécurité du leader (c'est-à-dire $e_2^1 < -d + d_s$), la sécurité du convoi n'est plus assurée. Aussi, il est nécessaire de gérer également la sécurité du convoi.

3.1.1.2 Sécurité

La sécurité définie ici concerne les risques de collision entre membres du convoi.

Ainsi, la sécurité du convoi est dite assurée lorsqu'aucun risque de collision entre un membre du convoi et ses voisins directs (véhicules immédiatement devant et derrière) est présent. Les risques de collision entre un élément du peloton et un autre élément différent de ses voisins directs ne sont pas considérés. En effet, une fois le convoi formé, si une telle situation survenait, c'est que les véhicules placés entre les deux véhicules se heurtant auraient déjà été emboutis.

Comme vu dans la partie consacrée au "Confort", les notions de confort et sécurité sont étroitement liées. Comme vu ci-dessus, l'ajout du module gérant le confort peut être à l'origine des collisions. Par conséquent, il est obligatoire d'introduire également un module assurant la sécurité. Celui-ci a comme but d'éviter tout risque de collision au sein du convoi.

Ainsi, si l'accélération/décélération du $(i+1)^{eme}$ véhicule est saturée par a_{conf} , une évaluation de la sécurité est réalisée :

- Si l'accélération est supérieure à a_{conf} ($a_{i+1} > a_{conf} > 0$), la situation est telle que le véhicule est plus éloigné du véhicule le précédant immédiatement que l'écart désiré. Dans ce cas de figure, a_{i+1} peut être limitée à a_{conf} sans qu'aucun risque de collision n'advienne.
- Le cas où le véhicule est soumis à une décélération plus élevée que $-a_{conf}$ (donc $a_{i+1} < -a_{conf} < 0$), survient si le i^{eme} véhicule décélère ou s'arrête brutalement. Dans un pareil cas, les risques de collision doivent être étudiés. Pour cela, l'approche développée prédit d'abord la distance d'arrêt d_{arret} nécessaire au véhicule $i+1$ avec une décélération confortable $-a_{conf}$. Il est obtenu par l'expression suivante :

$$d_{arret} = -a_{conf} \frac{t_f^2}{2} + v_{i+1} t_f + t_h v_{i+1} \quad \text{où} \quad t_f = \frac{v_{i+1}}{a_{conf}}$$

Soit encore :

$$d_{arret} = t_h v_{i+1} + \frac{v_{i+1}^2}{2a_{conf}} \quad (3.1)$$

Dans cette expression (3.1), t_f représente la durée nécessaire pour que le véhicule $i+1$, soumis à une décélération de $-a_{conf}$, depuis une vitesse v_{i+1} puisse s'arrêter. t_h est le délai de latence (en seconde) nécessaire au véhicule pour appliquer la commande calculée. Ainsi, $t_h v_{i+1}$ est la distance parcourue entre l'instant où la commande est envoyée aux actionneurs du véhicule et le moment où la commande est réellement appliquée.

Cette prédiction d_{arret} est alors soustrait à l'écart courant avec le véhicule immédiatement devant. En considérant le pire des cas : le véhicule précédent stoppe net, le résultat obtenu donne la distance finale d_{finale} entre les deux véhicules à l'arrêt.

$$\begin{aligned} d_{finale} &= (s_i - s_{i+1}) - d_{arret} \\ d_{finale} &= (s_i - s_{i+1}) - t_h v_{i+1} - \frac{v_{i+1}^2}{2a_{conf}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Selon la valeur de la distance obtenue, il est possible de prédire si les véhicules sont hors d'atteinte, ou si une collision risque de se produire.

- Si la distance finale d_{finale} est supérieure à d_s , alors a_{i+1} peut être limitée à $-a_{conf}$ en toute sécurité.
- Sinon, la décélération d'urgence, notée $-a_{urg}$, permettant d'obtenir une distance finale égale à d_s est calculée. En utilisant (3.2), il est écrit :

$$d_s = (s_i - s_{i+1}) - t_h v_{i+1} - \frac{v_{i+1}^2}{2a_{urg}}$$

d'où, il est déduit :

$$-a_{urg} = \frac{v_{i+1}^2}{2(d_s - (s_i - s_{i+1}) + t_h v_{i+1})} \quad (3.3)$$

L'accélération a_{i+1} est ensuite limitée par cette valeur $-a_{urg}$. Il est à remarquer que seul ce cas de figure conduit à imposer une accélération différente des limites fixées ($-a_{urg} < -a_{conf}$). Dans ce cas, la sécurité est privilégiée au détriment du confort des passagers.

3.1.1.3 Bilan

Dans cette section, un module de supervision “Confort”, assurant une conduite agréable, a été implanté dans la gestion du convoi. Cependant, dans certaines situations, ce module peut perturber le comportement du convoi, et des risques de collision peuvent apparaître. Pour surmonter ce type de danger, un module “Sécurité” est également ajouté. De ce fait, comme le module “Confort” est indissociable du module “Sécurité”, ils sont fusionnés en un unique bloc de supervision “Confort/Sécurité”. De manière synthétique, cette supervision peut être décrite par le schéma sur la figure 3.1.

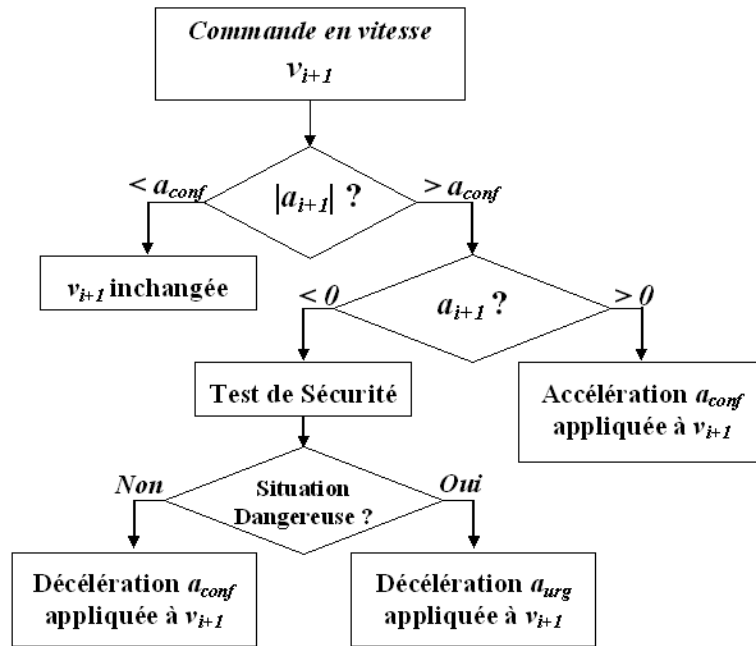


FIG. 3.1 – Schéma de supervision gérant le Confort et la Sécurité du convoi

Enfin, il est à noter que le module “Confort/Sécurité” développé ici ne tient compte que de la distance entre deux véhicules voisins. Cela permet d’assurer la sécurité du convoi lorsque celui-ci est formé. La généralisation du présent module entre tous les véhicules du convoi, même s’ils ne sont pas voisins, permettrait d’adresser tous les autres risques potentiels de collision. Les modules d’insertion/désinsertion présentés dans la suite permettent en grande partie d’adresser cela.

3.1.2 Gestion de la singularité de la commande

Le module de supervision permet de résoudre le problème posé par la singularité de la loi de commande (2.53). En effet, il a été vu que pour $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) = 0$, la commande n'était pas définie. De même, si $|1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)|$ est voisin de zéro, de fortes commandes sont générées. L'introduction des saturations en vitesse et accélération permet de limiter ces commandes aberrantes. Sur un plan pratique, les problèmes de singularité se trouvent par conséquent résolus.

Malheureusement, si l'ajout de saturation permet de surmonter la singularité de la commande, de nouveaux comportements inattendus, décrits dans la suite, apparaissent.

La loi de commande synthétisée (2.53) permet d'amener et de réguler c_{i+1} à une valeur nulle. En effet, comme $\dot{c}_{i+1} = -k c_{i+1}$, l'évolution de c_{i+1} au cours du temps est de la forme $c_{i+1}(t) = c_{i+1}(t=0)e^{-kt}$. Cependant, l'introduction des saturations sur la commande peut provoquer, dans certains cas, des comportements inattendus, comme ceux observés sur la figure Fig. 3.2. Dans ce cas de figure, les trois véhicules formant le convoi sont configurés initialement de la sorte : le premier est situé 4 m devant le deuxième et 10.4 m devant le troisième (soit un écart de 6.4 m entre le deuxième et le troisième). Comme dans les simulations précédentes, la distance inter-véhicules désirée est $d = 8m$. Quelques calculs donnent à l'instant initial : $A(z_3) \simeq 0.25$ et $e_2^1 = -4 m$. Par conséquent, à l'initialisation, il est obtenu : $1 + A(z_3)(s_1 - s_2 - d) \simeq 0$.

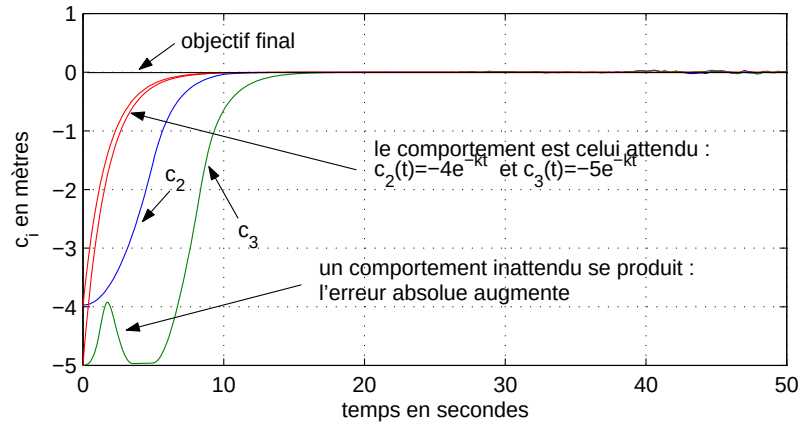


FIG. 3.2 – Evolution de c_{i+1}

Sur cette figure, les courbes rouges illustrent le comportement de c_2 et c_3 au cours

d'une simulation sans saturation. Leur évolution est celle attendue : elle est exponentielle. Les deux autres courbes, bleue et verte, représentent respectivement c_2 et c_3 avec la commande saturée. Si c_2 présente initialement un léger retard, son évolution devient ensuite bien celle attendue. Ce retard initial est principalement la conséquence des saturations en accélération, empêchant le véhicule d'atteindre instantanément la vitesse calculée par la commande sans saturation. Par contre, l'évolution de c_3 est plus particulière : c_3 décroît, puis augmente et, finalement, décroît à nouveau, pour atteindre une valeur nulle. L'étude de l'évolution de e_2^1 et e_3^2 est comme attendue similaire à celle de c_3 , voir la figure 3.3.

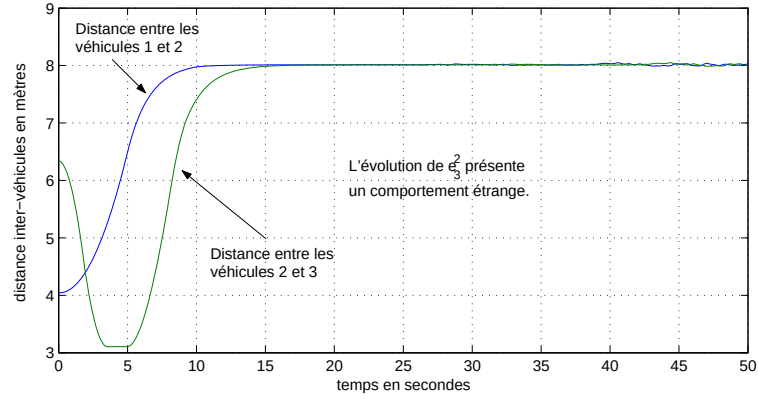


FIG. 3.3 – Evolution de e_2^1 et de e_3^2

Ce comportement est très inquiétant : le véhicule 3 se rapproche anormalement du véhicule 2, le risque de collisions se trouve considérablement augmenté. L'origine de ce comportement tient à ce que les véhicules sont initialement trop proches les uns des autres. Dans une telle situation, les véhicules devraient, en effet, être en mesure de reculer pour pouvoir s'éloigner suffisamment, mais les saturations s'y opposent ($v_{i+1} \geq 0$). Même si la commutation de la commande est telle que l'écart inter-véhicules reste toujours supérieur à la distance limite fixée d_s , cette augmentation de l'erreur longitudinale absolue reste problématique. En effet, il est naturel dans un convoi de véhicules d'observer une erreur inter-véhicules tendant vers zéro de manière monotone.

D'un point de vue mathématique, l'analyse de la loi de commande (2.53) montre que le terme $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)$ du dénominateur est directement lié au comportement singulier observé : lorsque celui-ci n'est pas strictement positif, un comportement comme celui décrit sur la figure 3.3 est obtenu.

En effet, si les distances inter-véhicules sont trop serrées, les véhicules commandés doivent, en toute logique, rester à l'arrêt. En supposant que $v_1 = 0$ (le leader est arrêté), le premier suiveur doit également être à l'arrêt ($v_2 = 0$, car $c_2 < 0$ et la vitesse des véhicules ne peut être négative). De même, si tous les véhicules sont trop rapprochés, les consignes c_{i+1} (avec $i < n$) sont négatives et les vitesses des différents éléments du convoi doivent être nulles si le leader est à l'arrêt. En supposant que $v_i = 0$, la commande

en vitesse du $(i+1)^{eme}$ véhicule, calculée sans saturation par (2.53) est donc de même signe que $\frac{kc_{i+1}}{1+A(z_{i+1})(s_1-s_i-id+d)}$. Or, $k > 0$ et $c_{i+1} < 0$, donc la commande est de signe opposé à $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)$.

- Si $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) > 0$, la commande est négative et les saturations bornent la commande à une vitesse nulle ($v_{i+1} = 0$). Le comportement de la commande est donc bien celui attendu.
- Si $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$, la commande est par conséquent positive ($v_{i+1} > 0$). Dans cette situation particulière où $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$, et les véhicules sont trop proches ($e_i^1 < 0$ et $e_{i+1}^i < 0$), le comportement inattendu est observé.

La figure 3.4 représente graphiquement l'état de $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)$ en fonction des conditions rencontrées sur e_i^1 et e_{i+1}^i .

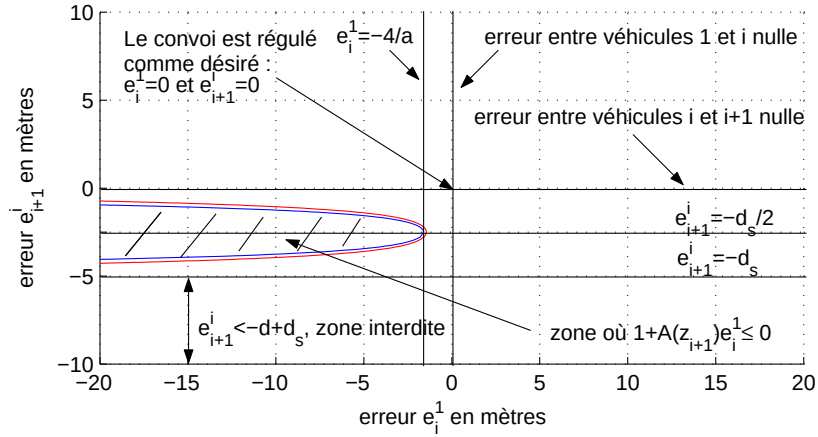


FIG. 3.4 – Zone d'influence de $(1 + A(z_{i+1})e_i^1)$ en fonction des erreurs longitudinales

La lecture de la figure corrobore l'observation selon laquelle ce comportement apparaît uniquement pour une inter-distance entre véhicules trop faible.

Dans ces conditions particulières ($1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$ et $e_{i+1}^i < 0$), il serait souhaitable d'imposer une évolution croissante de l'erreur inter-véhicules, alors négative, pour se stabiliser à une valeur nulle. Ceci se ramène à satisfaire la condition $\dot{e}_{i+1}^i \geq 0$, c'est à dire que $v_{i+1} \leq v_i$, pour $e_{i+1}^i < 0$.

Une méthode permettant d'obtenir cette condition, consiste à se baser sur les gains adaptatifs. Pour cela, en reportant (2.53) dans l'inégalité $v_{i+1} < v_i$, et en supposant les

performances latérales satisfaites ($y_j = \tilde{\theta}_j = 0$ pour $j \in \{1, i, i+1\}$), il est obtenu :

$$\frac{\sigma_{i+1}v_1 + [1 - \sigma_{i+1} + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - (i-1)d)]v_i + kc_{i+1}}{1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - (i-1)d)} \leq v_i \quad (3.4)$$

La résolution de cette expression (3.4) permet d'exprimer k , pour $e_{i+1}^i < 0$ et pour $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$:

– Si $c_{i+1} < 0$, alors il est obtenu :

$$k \leq \frac{\sigma_{i+1}(v_i - v_1)}{c_{i+1}} \quad (3.5)$$

Par conséquent, pour $e_{i+1}^i < 0$, $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$ et $c_{i+1} < 0$, le gain adaptatif introduit en (2.69) doit être réajusté en fonction de (3.5), dans le but d'éviter des comportements non-désirés de la commande.

– Enfin, la situation où $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$ et $c_{i+1} > 0$, ne se rencontre jamais. En effet, comme $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d) < 0$ et $A(z_{i+1}) > 0$ (voir (2.45)), l'erreur $e_i^1 = s_1 - s_i - id + d$ est nécessairement négative. De plus, comme $e_{i+1}^i < 0$, la configuration $c_{i+1} > 0$, définie en (2.41), est irréalisable.

Finalement, l'introduction d'un gain adaptatif permet de surmonter les dysfonctionnements introduits par les saturations de la commande. Les simulations, reportées sur les figures Fig. 3.5 et Fig. 3.6, prouvent le bon fonctionnement de la méthode proposée. Les erreurs e_{i+1}^i et c_{i+1} tendent vers une valeur nulle de manière monotone. De plus, lorsque le premier véhicule suiveur est à l'arrêt, le second suiveur l'est également. Seuls les retards observés précédemment, causés par les saturations, restent logiquement présents.

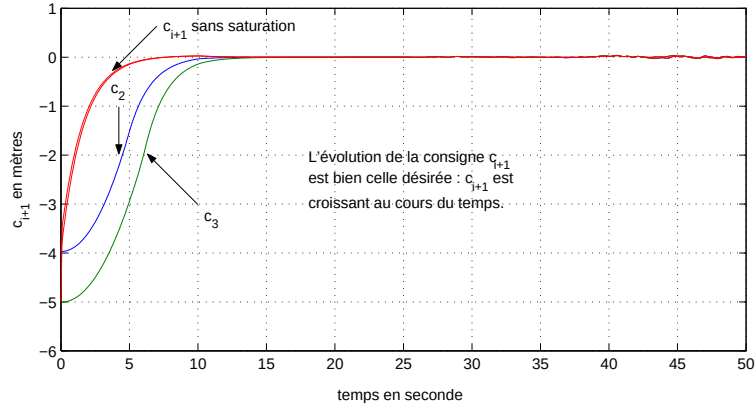
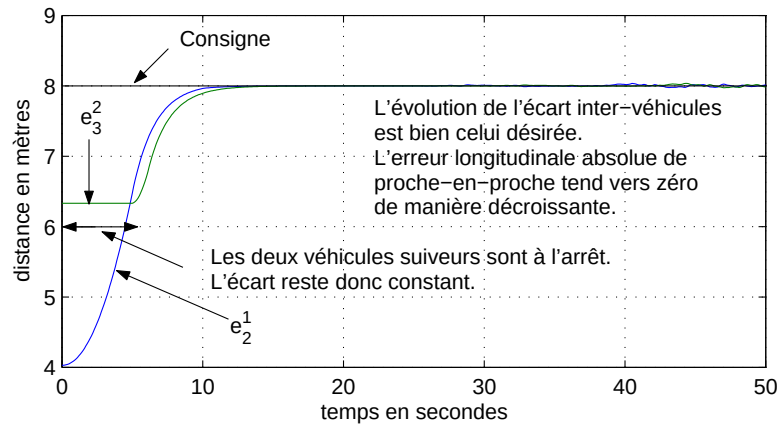


FIG. 3.5 – Evolution de c_{i+1} après correction des défauts introduits par les saturations

Par conséquent, les vices de commande, dus aux saturations, sont corrigés et le comportement de la commande (avec gestion des saturations) est celui souhaité : évolution monotone des erreurs c_{i+1} et e_{i+1}^i tendant vers zéro. Ainsi, le comportement du convoi pendant le régime transitoire est validé et la bonne initialisation du convoi est donc garantie.

FIG. 3.6 – Evolution de e_{i+1}^i après correction des défauts introduits par les saturations

3.2 Insertion et désinsertion d'un membre dans le convoi

Jusqu'à présent, le nombre de véhicules formant le convoi est fixé et n'évolue pas. Cependant, la commande implantée permet l'ajout de véhicules en queue de convoi sans difficulté, voir simulation 9 page 146. A contrario, l'insertion d'un véhicule à une position donnée dans le convoi, en cours de déplacement, n'est pas chose aisée. De même, si un élément du peloton doit quitter le convoi, des difficultés ne sont pas à exclure.

Cette section propose une méthode originale permettant de gérer ces 2 problèmes d'insertion et de désinsertion d'un véhicule au sein du convoi. Pour réaliser ces tâches, chaque véhicule (membre du convoi ou susceptible de l'intégrer) est analysé, et selon sa configuration, une autorisation pour intégrer ou quitter le convoi est susceptible de lui être accordée. Si l'autorisation est reçue, une procédure spécifique est lancée, sinon, aucune modification n'intervient sur le fonctionnement du convoi (voir figure 3.7). Dans une première partie, l'insertion d'un véhicule est exposée. Dans une seconde partie, la désinsertion est décrite.

3.2.1 Insertion d'un véhicule

La démarche concernant l'insertion d'un nouvel élément dans le convoi est détaillée dans ce paragraphe. Il est rappelé que le nouveau membre du convoi ne doit pas se

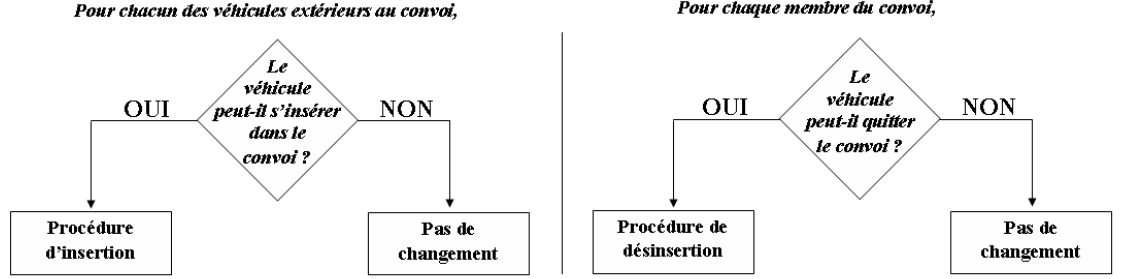


FIG. 3.7 – Schéma représentant à quel moment déclencher les procédures d'insertion et de désinsertion

trouver sur le chemin de référence afin d'éviter les collisions (la seule exception est lorsque le véhicule entrant doit assurer le rôle de leader. Dans ce cas, celui-ci peut se situer sur le chemin de référence).

Préalablement, il est nécessaire de connaître la localisation du véhicule susceptible d'insérer le convoi, nommé "véhicule entrant", ainsi que la position, notée j , que celui-ci doit prendre dans le convoi (pour un convoi de n véhicules, j peut prendre toute valeur entière entre 1 et $n + 1$). Enfin, il est noté d la consigne d'inter-distance au sein du convoi. La procédure d'insertion comporte alors 3 étapes :

- En premier lieu, l'état du véhicule entrant $X_e = (s_e, y_e, \tilde{\theta}_e)^T$ est calculé.
- En deuxième lieu, l'écart longitudinal entre le véhicule entrant et le j^{eme} véhicule du convoi (le véhicule devant céder sa place au véhicule entrant), donc $s_e - s_j$, est analysé. Si cet écart $s_e - s_j$ est inférieur à une valeur fixée $2d$, le véhicule entrant peut rejoindre le convoi, voir figure 3.9. Sinon, l'élément entrant est considéré trop éloigné de sa position dans le convoi et il doit attendre que le convoi soit plus proche de lui, voir figure 3.8. Cette distance de $2d$ correspond en fait au moment où le véhicule $(j - 2)$ (s'il existe) vient à dépasser l'élément entrant. Celle-ci a été choisie de sorte que le véhicule entrant soit prêt à intégrer le convoi suffisamment à l'avance afin d'éviter des pics de commande (ce qui serait le cas si le nouvel élément du peloton démarrerait sa procédure d'entrée dans le peloton au dernier moment). De même, le véhicule, initialement placé en j^{eme} position au sein, peut ainsi anticiper l'insertion du nouvel arrivant en augmentant l'écart avec le véhicule $(j - 1)$.
- En troisième lieu, si l'étape précédente est satisfaite, le véhicule entrant insère le convoi en j^{eme} position. Le précédent véhicule dans le convoi occupant cette place recule d'un échelon pour occuper la $(j + 1)^{eme}$ position. De même, tous les véhicules placés au-delà de la j^{eme} place reculent d'une place, voir figure 3.10. Le changement de position des véhicules situés en j^{eme} position ou au-delà, se fait brusquement. Ainsi, des transitions brutales au niveau des commandes du convoi risquent d'être engendrées. Cette commutation de commande pourrait se réaliser

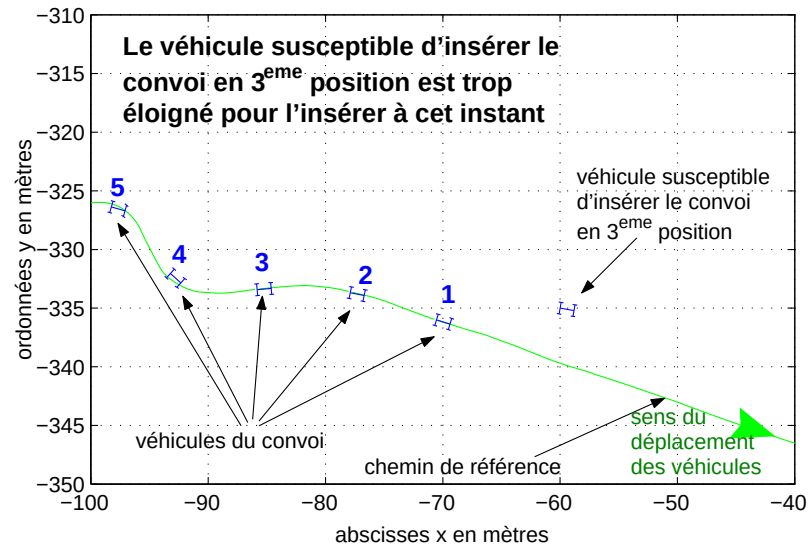


FIG. 3.8 – Le véhicule entrant est trop avancé pour insérer le convoi

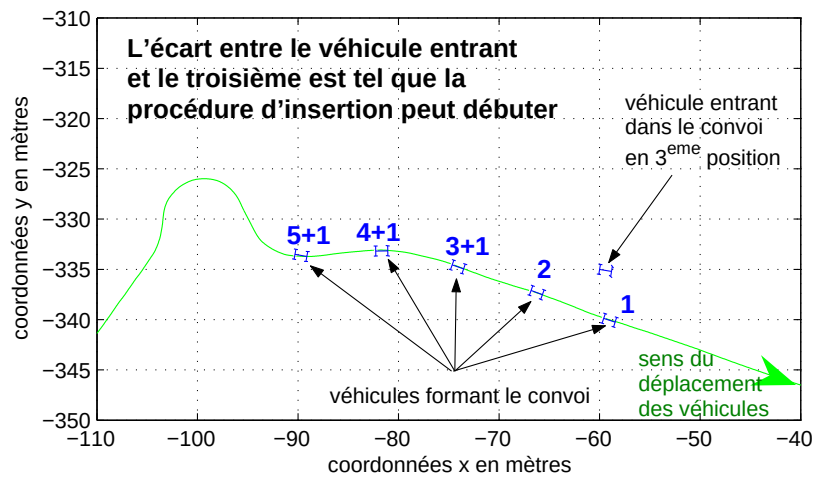


FIG. 3.9 – Le véhicule entrant est en train d'insérer le convoi

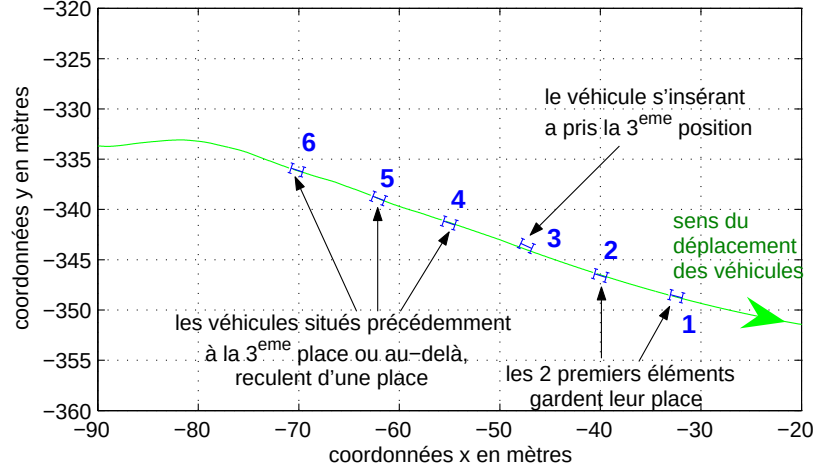


FIG. 3.10 – Le convoi se reforme

de manière plus souple. Dans [42], une transition plus lisse entre différentes lois de contrôle s'effectue par l'introduction de fonctions permettant une commutation progressive, avec dans ce cas des fonctions sigmoïdes. Cependant, dans l'application développée ici, le module de gestion du confort et de la sécurité du convoi lisse naturellement les commandes appliquées au convoi. De ce fait, les éventuels pics de commande, liés aux transitions engendrées par le changement de position au sein du convoi, sont lissés grâce au module de supervision.

Lors de la transition, l'ancien véhicule situé à la j^{eme} position, et cédant sa place pour la $(j + 1)^{eme}$, est très loin du nouveau véhicule j (une distance longitudinale de $2d$ sépare les 2 éléments). Ce grand écart fait que la commande globale, pour ce véhicule, va se comporter comme une commande référencée sur le leader. La consigne de la loi de commande devient un écart curviligne jd avec le leader (le véhicule occupant maintenant la $(j + 1)^{eme}$ position), alors qu'il était précédemment de $(j - 1)d$ (le véhicule occupait précédemment la j^{eme} position). Par conséquent, le "nouveau" véhicule $(j + 1)$ va avoir tendance à ralentir pour s'éloigner du leader, ce qui est le comportement attendu, car il va permettre de créer un espace pour le nouvel élément entrant.

A l'inverse, pour le véhicule entrant, son écart longitudinal avec le véhicule $j - 1$ est initialement négatif. Sa commande longitudinale va se comporter comme une commande de proche-en-proche. Il va, par conséquent, laisser passer ce véhicule avant de prendre sa place dans le convoi, ce qui permet d'éviter les collisions.

Finalement, le convoi, initialement formé de n véhicules, présente un membre de plus. Les véhicules situés avant ce nouvel élément gardent leur place dans le convoi. L'insertion passe inaperçue pour ces derniers. Les véhicules placés après reculent d'une place dans le convoi. Il est à noter que le nouvel élément du convoi peut prendre n'importe quelle position (même si le véhicule entrant devient le leader, l'ancien leader devenant ainsi le premier suiveur).

3.2.2 Désinsertion d'un véhicule

L'opération présentée ici est la désinsertion d'un véhicule du convoi. La procédure de désinsertion est décrite étape par étape. Dans la démarche proposée, le véhicule quittant le convoi est supposé s'arrêter dans le voisinage du chemin de référence. Cependant, il aurait été également possible que le véhicule sortant joigne un nouveau chemin sur lequel s'asservir ou soit conduit manuellement.

La procédure de désinsertion se déroule selon les étapes suivantes :

- Avant tout, une pré-étape recensant les différentes informations est nécessaire. D'une part, le véhicule quittant le convoi de longueur n , doit être spécifié : le véhicule j est désigné comme le véhicule quittant le convoi (j étant un entier compris entre 1 et n). D'autre part, la localisation de l'endroit où le véhicule doit s'arrêter, doit être connue suffisamment en avance. Les coordonnées absolues de ce point sont notées (X_f, Y_f) et l'orientation désirée du véhicule à l'arrêt est θ_f . A partir de ces données, l'abscisse curviligne s_f de cet objectif d'arrêt est calculée. Enfin, comme précédemment, la consigne d'inter-distance au sein du convoi est notée d .
- La première étape analyse si le véhicule sortant est suffisamment près de son objectif pour quitter le convoi. Pour cela, la distance curviligne $s_f - s_j$ est étudiée. Si cette distance est inférieure à une distance choisie égale à $2.5d$, le véhicule est considéré suffisamment près de l'objectif de sortie pour entamer la procédure de désinsertion. Sinon, il doit attendre de s'approcher de l'objectif.
- La deuxième étape est réalisée seulement si la condition précédente est validée. La commande latérale actuelle commute sur un nouvel objectif qui est de suivre désormais une droite Δ inclinée à θ_f dans un repère absolu (voir Figure 3.11) et qui passe par le point visé. L'écart latéral à cette nouvelle trajectoire est noté y_f . La loi de commande utilisée est toujours la loi de commande (2.23) gérant le guidage latéral des véhicules au sein du convoi, seule la trajectoire à suivre a changé. Cette commande latérale présente une expression simplifiée, puisque la droite Δ possède une courbure nulle.

$$\delta_j = \arctan(L \cos^3(\theta_j - \theta_f)[-K_{fd} \tan(\theta_j - \theta_f) - K_{fp} y_f]) \quad (3.6)$$

Les gains K_{fp} et K_{fd} sont calculés de manière à obtenir une distance d'établissement égale à la valeur absolue de l'écart longitudinal, noté d_f , entre le point d'arrêt et l'élément sortant. Les expressions (2.21) et (2.22), données dans le chapitre II,

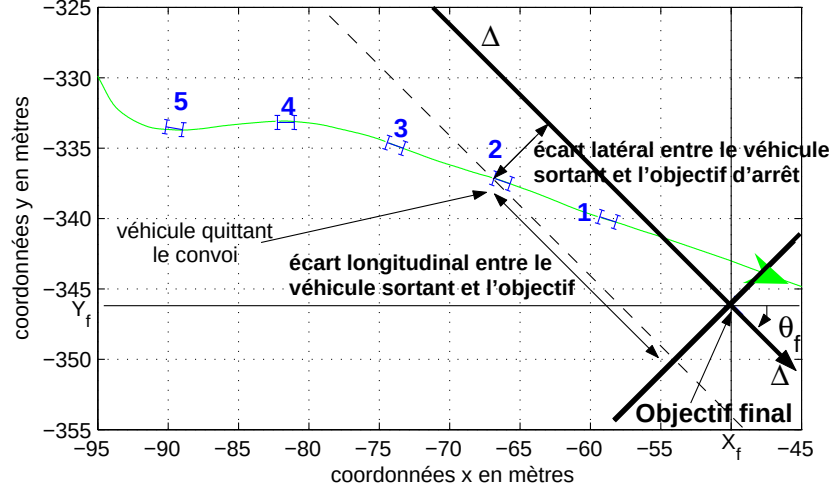


FIG. 3.11 – Phases initiales de la désinsertion

sont donc réutilisées. Il est à noter que si $|d_f| < 5.0m$, la distance d'établissement permettant de calculer les gains de la commande latérale est saturée à $5.0m$, afin d'éviter des gains, et donc des commandes trop importantes.

$$K_{fp} \simeq \min\left(\frac{22.5}{d_f^2}; \frac{22.5}{5^2}\right) \quad K_{fd} \simeq \min\left(\frac{9.5}{d_f}; \frac{9.5}{5}\right) \quad (3.7)$$

La commande longitudinale reste pour le moment appliquée au véhicule sortant.

- La troisième étape est la commutation de la commande longitudinale. Avant la commutation, la commande longitudinale appliquée au véhicule sortant est toujours la commande globale du convoi. Grâce au maintien de cette loi, la sécurité des véhicules du convoi reste assurée. Avant de commuter la commande longitudinale, la sécurité du convoi doit être garantie, et en particulier les risques de collision entre le véhicule sortant et l'ensemble du convoi doivent être exclus. C'est le cas dès lors que le véhicule sortant présente une erreur latérale avec le chemin de référence suivi par le convoi supérieure à une distance fixée à $2.0m$ (liée à la longueur des véhicules). De plus, l'élément sortant ne doit plus couper cette trajectoire après commutation de la commande longitudinale. Pour cela, il faut s'assurer que le véhicule sortant et son point d'arrêt soient situés du même côté du chemin de référence. Une vérification aisée consiste à comparer les signes de l'écart latéral y_j du véhicule sortant et celui de l'écart latéral entre le point d'arrêt et la trajectoire du peloton, noté $y_{Objectif}$. Si les deux signes sont égaux, alors le véhicule quittant le convoi est situé du bon côté. En conséquence, si $|y_j| > 2m$ et

$\text{signe}(y_j) = \text{signe}(y_{\text{Objectif}})$, la sécurité est assurée et la commande longitudinale peut commuter.

L'objectif de la loi longitudinale est d'annuler l'erreur longitudinale, notée d_f . Afin d'exprimer d_f , les abscisses curvilignes du véhicule j et du point d'arrêt le long de l'axe longitudinal, noté Δ sur la figure 3.11, sont introduites : elles sont respectivement notées $s_{\Delta,j}$ et $s_{\Delta,f}$. L'erreur longitudinale $d_f = s_{\Delta,j} - s_{\Delta,f}$ exprime donc la différence curviligne entre le véhicule j et l'objectif d'arrêt, le long de la droite Δ . L'origine de cet axe Δ , situé au point d'arrêt, et son orientation sont telles que $s_{\Delta,f} = 0$ et $s_{\Delta,j} \leq 0$ tant que l'objectif n'est pas dépassé (donc $d_f \leq 0$, tant que le point d'arrêt n'est pas atteint). La relation $\dot{d}_f = v_j \cos(\theta_j - \theta_f)$ se déduit de la figure 3.11. Une simple commande proportionnelle permet d'atteindre l'objectif fixé.

$$v_j = \frac{-k_f d_f}{\cos(\theta_j - \theta_f)} \quad \text{où} \quad k_f > 0 \quad (3.8)$$

Afin d'assurer la continuité de la commande, la vitesse initiale est prise égale à la dernière commande longitudinale du convoi, ce qui fournit la valeur de k_f . Une saturation de la commande est ensuite ajoutée à la nouvelle commande longitudinale. Le gain k_f peut être adaptatif, de manière à éviter les saturations en vitesse.

$$k_f = \min\left(\frac{v_{\max} \cos(\theta_j - \theta_f)}{|d_f|}, k_{\max}\right) \quad (3.9)$$

Les deux lois de commande du convoi ayant commuté, le véhicule j ne fait plus partie du convoi.

- La dernière étape consiste à réordonnancer les véhicules. Le convoi, initialement de n véhicules, ne compte plus que $n - 1$ éléments. Les $j - 1$ premiers éléments du convoi restent à leur place, tandis que les $n - j$ véhicules situés après le véhicule ayant quitté le convoi avancent d'une place dans le convoi (le $(j + 1)^{\text{eme}}$ véhicule devient le j^{eme} , et ainsi de suite). La commande globale pour ces véhicules va se comporter comme une commande référencée leader, et il est attendu qu'ils accélèrent pour combler le vide laissé par le véhicule sortant.

En parallèle, le véhicule ayant quitté le convoi continue sa procédure d'arrêt hors de portée du convoi.

Comme pour l'insertion, n'importe quel élément du convoi, quelle que soit sa position, est susceptible de quitter le convoi (même si le véhicule sortant est le leader, le premier suiveur devenant leader).

3.2.3 Synthèse de l'Insertion/Désinsertion de véhicules dans le convoi

Dans cette section, une approche de supervision gérant l'insertion et la désinsertion d'un véhicule au sein du convoi est proposée. Celle-ci est résumée sur le schéma de la figure 3.12. Afin de réaliser ces manœuvres, il est nécessaire de connaître l'état de l'ensemble des membres du convoi. De ce fait, cette fonctionnalité doit être centralisée et gérée par un module de coordination. Plus de précisions sont données dans la section consacrée sur l'architecture dans le chapitre IV.

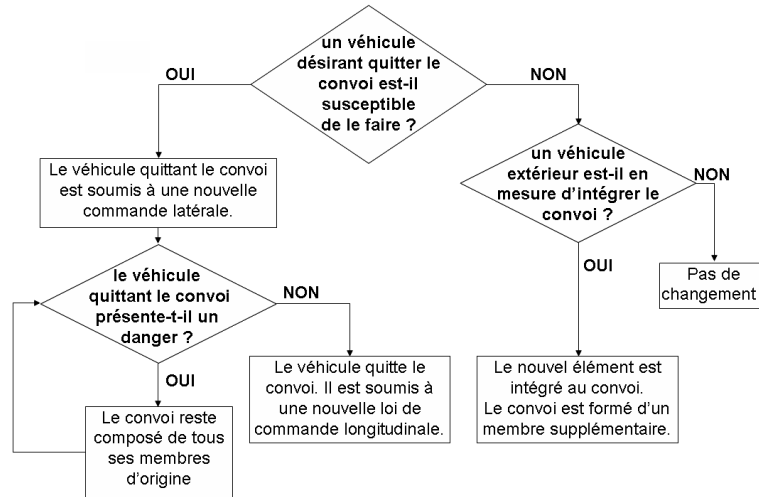


FIG. 3.12 – Schéma de supervision gérant l’Insertion/Désinsertion d’un véhicule au sein du convoi

Enfin, il est à remarquer que les commandes utilisées lors de l’arrêt d’un ou de véhicule(s) ne présentent aucune singularité.

3.3 Validation par simulation

La gestion du convoi développée dans ce chapitre est maintenant éprouvée au moyen de simulations. Afin de coller le plus fidèlement possible à la réalité, chacune des simulations est basée sur un scénario représentant une situation susceptible d’être rencontrée en pratique par le convoi. Après avoir décrit sommairement chacun des scénarii, la simulation de ces derniers est présentée dans les parties suivantes.

3.3.1 Description des scénarii

Dans cette partie, est présenté un échantillon de scénarii représentatifs des différentes situations que peut être amené à rencontrer le convoi. Ces 7 scénarii complémentaires sont exposés selon leur complexité.

– Scénario 1 : Convoi correctement initialisé

Ce scénario de base représente les conditions initiales idéales pour le convoi : tous les véhicules présentent un écart longitudinal très proche de la consigne et le leader est supposé ne présenter aucun comportement étrange. Ceci constitue le scénario de base. D’ailleurs, c’est ce dernier qui a été joué dans les simulations visant à valider les performances de la loi de commande en conditions standards au Chapitre II. Seules les performances en conditions standards sont validées dans cet essai.

- Scénario 2 : Grand écart initial

Dans ce scénario, le convoi est correctement ordonné (chaque véhicule est positionné à sa place dans le convoi) mais cette fois avec un large écart inter-véhicule. Comme précédemment, l'évolution de la vitesse du leader n'affiche aucun comportement critique. L'objectif du scénario est de traiter les fortes accélérations et vitesses auxquelles sont soumis les robots afin de respecter l'inter-distance désirée.

- Scénario 3 : Accrochage progressif des véhicules à la queue du convoi.

Dans cette configuration initiale, les véhicules sont situés dans l'ordre opposé à leur position dans le convoi. Ainsi, le leader est initialement en queue de peloton, puis, est placé le premier suiveur et ce jusqu'au dernier suiveur. Au démarrage, le leader avance le long du chemin de référence. Dès qu'il parvient à proximité du premier suiveur (abscisses curvilignes des deux robots mobiles voisines), ce dernier vient s'accrocher au leader. De même, lorsque le véhicule i passe aux alentours du véhicule $i + 1$, celui-ci s'accroche au convoi. Il est à noter que tous les véhicules, à l'exception du leader, doivent observer à l'instant initial une erreur latérale assez grande pour pouvoir laisser passer les véhicules précédents sur le chemin de référence sans risquer de les heurter.

Ce type de scénario se rencontre notamment dans le cadre d'applications de ramassage de véhicules : un véhicule, conduit manuellement, passe dans le voisinage de véhicules parkés [27]. Au fur et à mesure, ceux-ci viennent se fixer en queue de peloton.

L'objectif de ce scénario consiste à valider les performances longitudinales du convoi avec des erreurs inter-véhicules initiales négatives tout en préservant la sécurité du convoi.

- Scénario 4 : Arrêt brusque du leader

Dans ce scénario, l'état initial n'a aucune importance. Une fois le convoi formé (inter-distances respectées), le leader stoppe brutalement. Un tel arrêt du leader peut survenir en cas de danger : par exemple, en cas de détection d'obstacles imprévisibles.

Ici, le confort et la sécurité des passagers sont testés. En effet, le convoi soumis à une forte décélération peut être très désagréable pour les passagers, tandis que la distance d'arrêt des véhicules du convoi peut être telle que des risques de collision ne sont pas à exclure.

- Scénario 4 bis : Arrêt brusque de n'importe quel véhicule

Ce scénario, très similaire au scénario 4, consiste en l'arrêt brutal d'un robot du convoi.

Dans la pratique, un tel cas de figure peut survenir en cas de panne subite d'un engin. Ou encore, en cas de détection d'obstacles mobiles, un module de supervision de haut-niveau peut choisir de remplacer la commande longitudinale générée au profit d'une brusque décélération, cette dernière pouvant se justifier éventuellement en cas de présence de dangers : obstacle mobile (piétons,...).

Là encore, le confort et la sécurité sont éprouvés.

- Scénario 5 : Etat initial tel que la commande soit singulière
Un des problèmes soulevés dans la synthèse de la loi de commande est la singularité de la commande (dénominateur nul, voir (2.48)). Même, si celle-ci est rarissime, la résolution de cette difficulté est nécessaire. Ainsi, ce scénario n’a comme seul but de valider la méthode employée pour surmonter cette singularité.
- Scénario 6 : Désinsertion d’un membre du convoi
Au cours de la simulation, un véhicule (n’importe lequel) quitte le convoi. Les éléments restants dans le peloton continuent à fonctionner. Le véhicule suivant l’élément quittant le convoi, prend sa place au sein du peloton.
En pratique, dans le cadre d’une alternative aux transports en commun, n’importe quel élément arrivant à destination doit être en mesure de quitter le convoi. Bien sûr, en parallèle à cette désinsertion, le convoi doit continuer à fonctionner.
Le but d’un tel scénario est de mettre en avant le module de supervision, et particulièrement sa capacité à gérer la modularité du convoi en se séparant d’un élément.
- Scénario 7 : Insertion d’un nouveau membre
Au cours de la simulation, un véhicule placé aux alentours du chemin de référence intègre le convoi. Sa position dans le peloton est fixée par l’utilisateur du convoi (n’importe quelle position est possible). Le véhicule qui y était placé à l’origine occupe la place suivante, et ainsi de suite, jusqu’à atteindre la fin du convoi.
La possibilité d’intégrer n’importe quelle position dans le convoi se justifie notamment par l’introduction d’un véhicule sur une voie de circulation où un peloton est déjà présent : plutôt qu’attendre que le convoi soit passé (ce qui peut durer longtemps si le convoi est particulièrement long), le véhicule s’intégrant dans le convoi n’aurait pas besoin de s’arrêter pour pénétrer sur la voie. De plus, ce scénario est la prémisse de la jonction de deux pelotons circulant sur deux voies adjacentes en un unique peloton en file.
Ici également, l’intérêt se porte sur la supervision, à travers la capacité d’insertion d’un élément supplémentaire dans le convoi.

3.3.2 Scénario 1 : en conditions standards

Même si ce scénario a déjà été validé dans le chapitre précédent, un nouvel essai est effectué afin de prouver que le monitoring ne perturbe en rien les performances en conditions standards. La simulation effectuée prouve le bon fonctionnement en conditions standards de la commande avec l’ajout de la supervision, voir figure 3.13. Les performances longitudinales sont conservées identiquement.

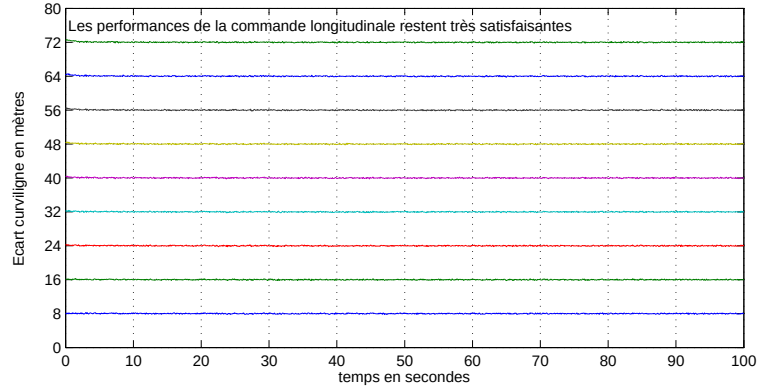


FIG. 3.13 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 1

3.3.3 Scénario 2 : écart initial important

Les saturations introduites permettent de limiter les commandes dans des plages raisonnables et confortables. La simulation 8 du Chapitre II en est une illustration. Cette simulation est effectuée de nouveau, avec le module de supervision. Elle permet de prouver, encore une fois, la non-influence du module de supervision sur les performances de la commande longitudinale, voir figure 3.14.

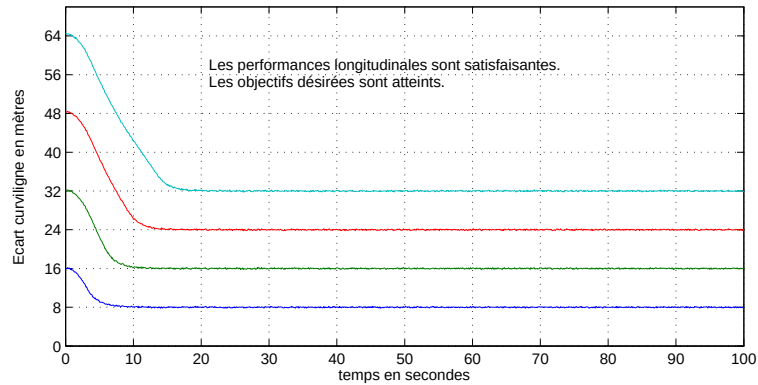


FIG. 3.14 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 2

3.3.4 Scénario 3 : accrochage progressif en queue de peloton

De même, ce scénario a déjà été validé dans la simulation 9 du Chapitre II. Il est réitéré pour prouver la non-influence du monitoring.

Les résultats sont fidèles aux attentes (Fig. 3.15). Les performances longitudinales, dans ce cas de figure, sont donc indépendantes du monitoring.

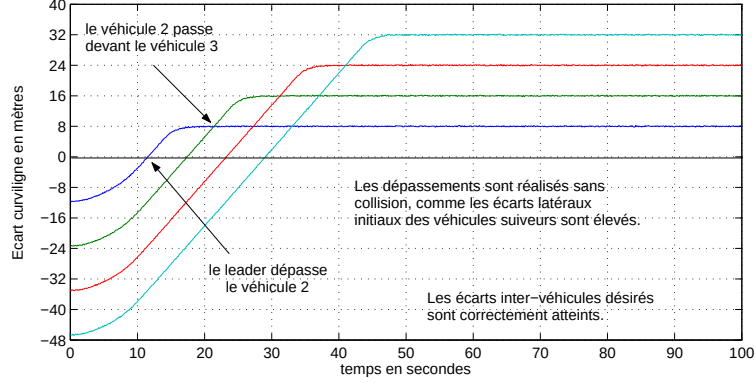


FIG. 3.15 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 3

3.3.5 Scénario 4 : arrêt brusque du leader

Le convoi simulé, formé de 10 véhicules, est initialisé à un état proche des consignes désirées. Lors du scénario numéroté 4a, le leader atteint et maintient une vitesse de $3m/s$. Puis brusquement, il stoppe net et reste à l'arrêt quelques instants (20 secondes). Finalement, le leader redémarre progressivement et continue son parcours à une vitesse de $2m/s$.

L'observation des erreurs e_{i+1}^i et e_{i+1}^1 respectivement sur les figures Fig. 3.16 et Fig. 3.17, donne de précieuses indications sur le comportement du convoi. Pour respecter les exigences de confort, le premier suiveur n'est pas en mesure de décélérer à la même allure que le leader, une saturation de l'accélération est réalisée. Tout risque de collision étant écarté, le premier suiveur décélère avec une accélération de $-a_{conf}$, Fig. 3.18. Ainsi, lorsque ce dernier s'arrête, la distance le séparant du leader est inférieure à d , mais reste supérieure à d_s comme imposée par le Monitoring. En effet, il a été choisi d'assurer le confort plutôt que les performances longitudinales. Dès que le leader redémarre, l'écart augmente pour finalement être maintenu à d . Les autres véhicules du convoi décélèrent également avec une accélération de $-a_{conf}$ jusqu'à l'arrêt, c'est-à-dire la même décélération que le véhicule 2. C'est pourquoi, excepté e_2^1 , toutes les distances inter-véhicules restent à la consigne désirée d , voir Fig. 3.17.

Le scénario suivant, noté 4b est similaire au précédent. Le seul changement intervient sur la vitesse du leader qui est maintenue à $3.5m/s$. De cette manière, lorsque le véhicule de tête stoppe brutalement, le test de sécurité est négatif : un risque de collision apparaît. En effet, la distance de prédiction d_{finale} , exprimée en (3.2), est inférieure à d_s ($d_{finale} < d_s$). Par conséquent, une décélération d'urgence a_{urg} doit être calculée pour écarter ce risque. D'après (3.3), il est obtenu $a_{urg} \simeq -1.25m/s^2$, Fig. 3.21. L'écart inter-véhicules est ainsi maintenu hors de la plage interdite ($\geq d_s$) et vaut approximativement d_s , comme indiqué sur la figure 3.20. Celui-ci converge de nouveau vers d , une fois le leader reparti. Dans ce cas de figure, la sécurité prime sur le confort du convoi. Le 3^{ème} véhicule (2^{ème} suiveur) n'est pas en mesure de décélérer à la même allure que

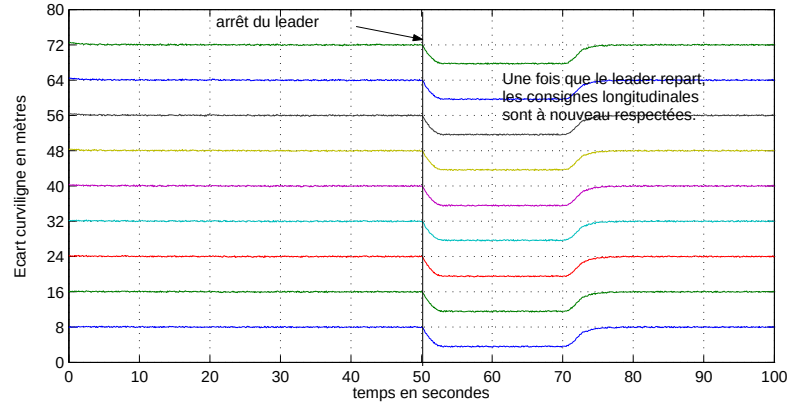


FIG. 3.16 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 4a

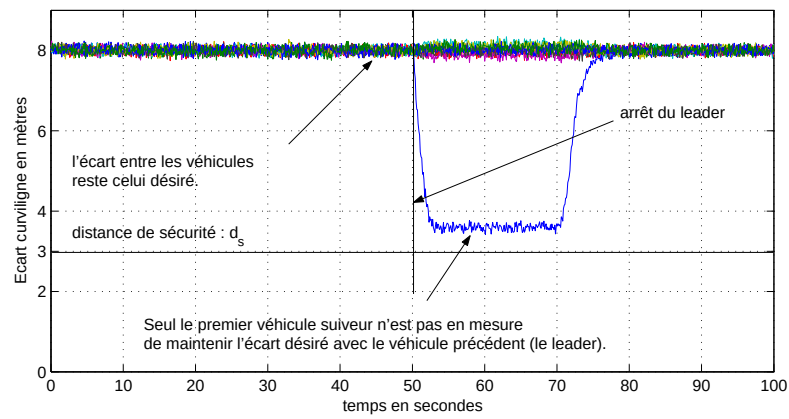


FIG. 3.17 – Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4a

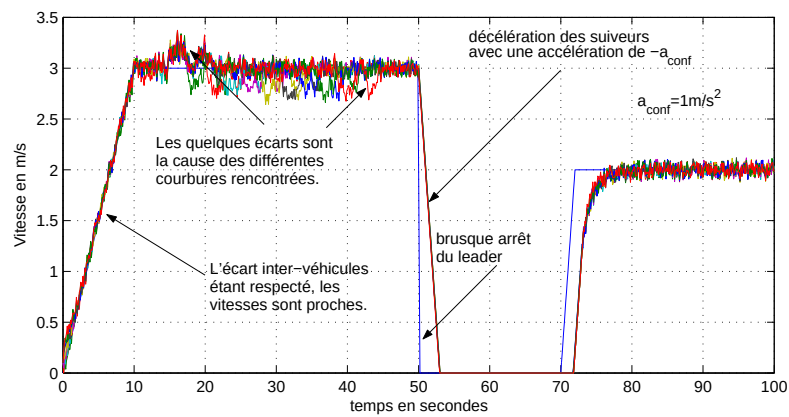


FIG. 3.18 – Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4a

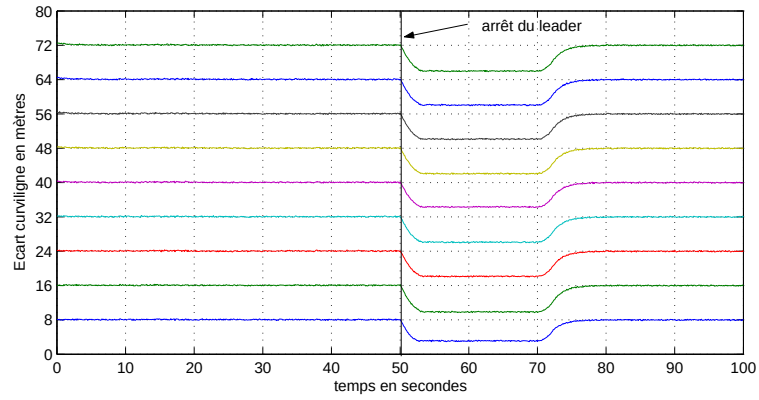


FIG. 3.19 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 4b

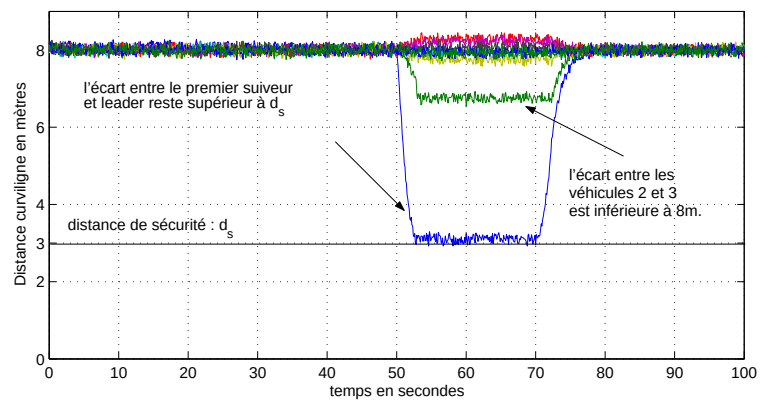


FIG. 3.20 – Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4b

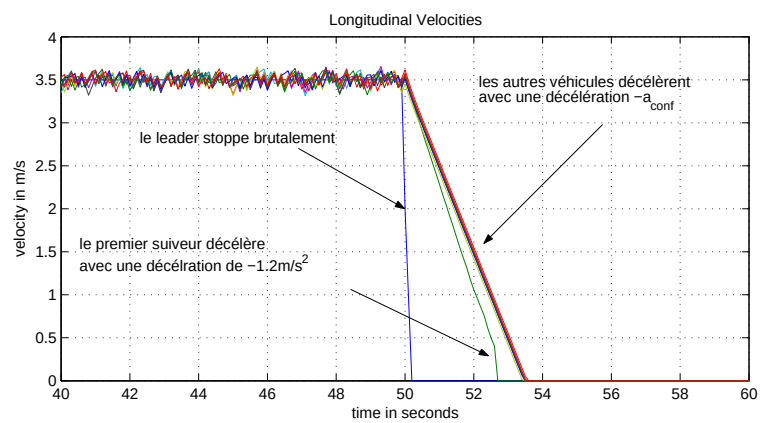


FIG. 3.21 – Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4b

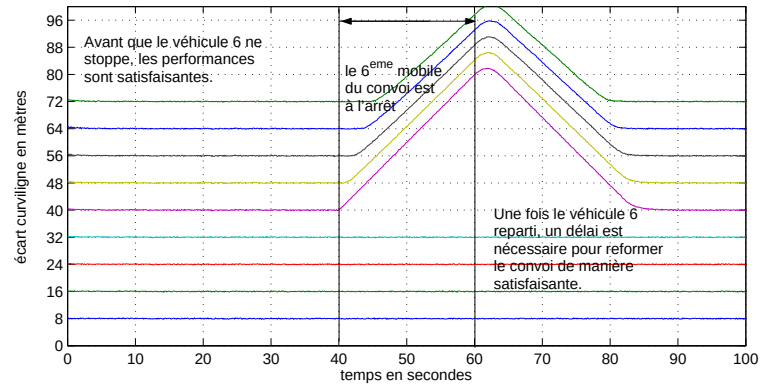


FIG. 3.22 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 4c

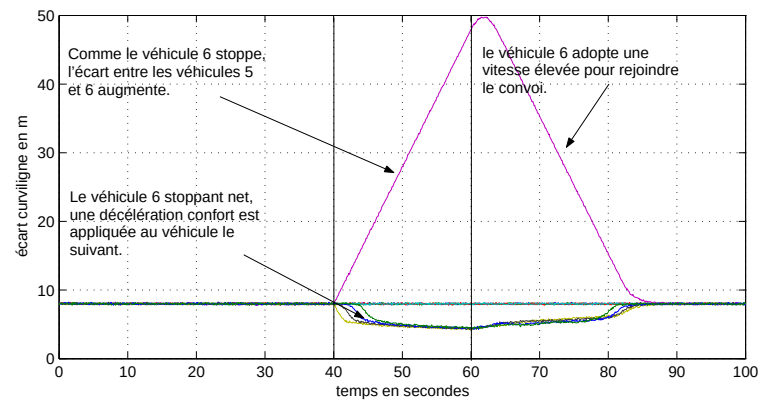


FIG. 3.23 – Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 4c

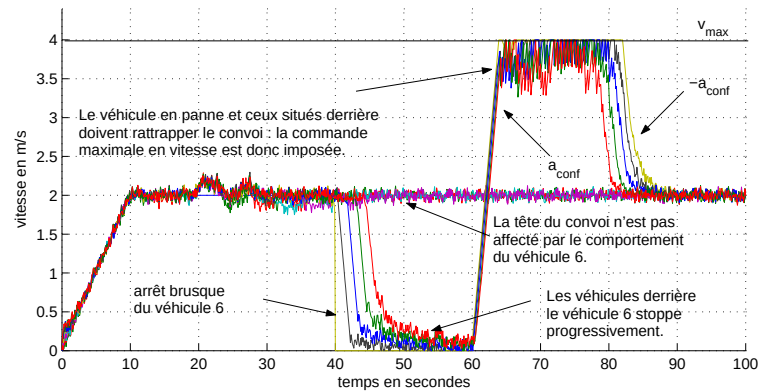


FIG. 3.24 – Vitesse longitudinale calculée - Scénario 4c

le 1^{er} suiveur (saturation de la commande en accélération par a_{conf} , comme il n'y a pas de risque de collision) et décélère avec la valeur confort $-a_{conf}$. L'écart entre les véhicules 2 et 3 est donc inférieur à la consigne d (le confort est privilégié au détriment des performances de régulation longitudinale).

Enfin, une variante consiste à stopper un véhicule du convoi brutalement. La commande longitudinale est court-circuitée : la vitesse est fixée nulle. Un tel cas de figure peut se rencontrer, par exemple, dans le cas d'une panne ou, éventuellement, en cas de détection d'un obstacle dangereux. Ce scénario, nommé 4c, prouve que la gestion de la sécurité et du confort est respectée également dans le cas d'un comportement aberrant de n'importe quel élément du peloton. Le leader est soumis à une vitesse constante de $2m/s$ tout au long de la simulation. Durant cet essai, le véhicule 6 est stoppé brutalement, Fig. 3.24. De ce fait, les véhicules suivants décélèrent en souplesse avec $-a_{conf}$ (sécurité assurée), tandis que les membres précédents continuent leur route sans se soucier de la queue du convoi. Les écarts des éléments de la queue avec le leader croissent donc continuellement, Fig. 3.22 et Fig. 3.23, tant que le véhicule 6 n'applique plus les commandes longitudinales calculées. Lorsque la commande est rétablie, l'écart avec le leader diminue pour atteindre la consigne désirée. Cette diminution n'est effective qu'une fois la vitesse du véhicule 6 supérieure à v_1 . Celui redémarre avec l'accélération a_{conf} pour atteindre v_{max} . Ce comportement est généralisé à l'ensemble de la queue du convoi. Et donc, le convoi est ainsi reformé.

3.3.6 Scénario 5 : état singulier de la commande

Le convoi est formé de 3 véhicules. Ceux-ci sont disposés de sorte que l'expression $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - (i - 1)d)$ soit nulle.

Pour le 3^{eme} véhicule du convoi, la singularité est obtenue pour l'égalité suivante : $1 + A(z_3)(s_1 - s_2 - d) = 0$. En fixant $e_2^1 = s_1 - s_2 - d$, la relation (2.50) permet de déterminer quelle(s) valeur(s) doit prendre $e_3^2 = s_2 - s_3 - d$, donc s_3 . Une simulation est effectuée.

Une comparaison avec cette même commande sans monitoring (commande standard avec saturation représentée en magenta sur les figures Fig. 3.25, Fig. 3.26 et Fig. 3.27) est réalisée.

Un pic de vitesse non désiré survient en début de simulation, provoquant un rapprochement inquiétant des véhicules Fig. 3.25 et Fig. 3.26. Celui-ci s'observe sur la figure 3.27 et est engendré par la négativité de $1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - (i - 1)d)$. Ce phénomène ne se rencontre pas lorsque la commande est couplée avec le monitoring (ici, introduction du gain adaptatif). Ainsi, même si les saturations évitent la génération de commandes aberrantes, des difficultés subsistent et sont clairement corrigées par le monitoring.

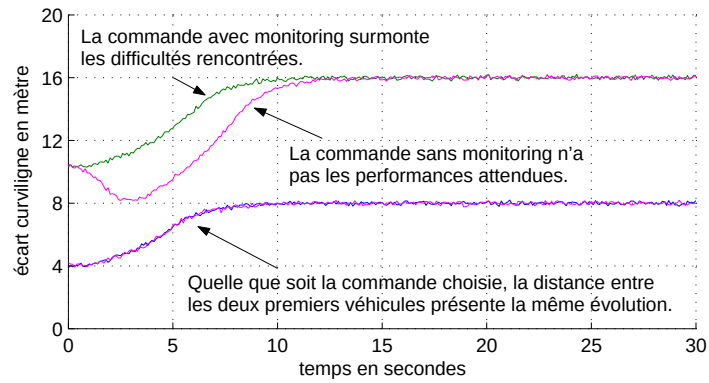


FIG. 3.25 – Distance curviligne avec le leader - Scénario 5

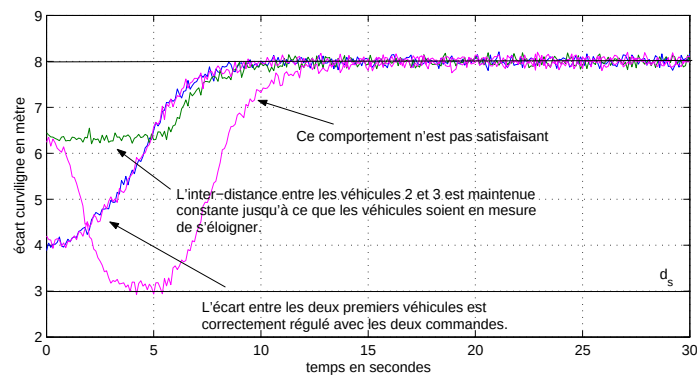


FIG. 3.26 – Ecart curviligne inter-véhicules - Scénario 5

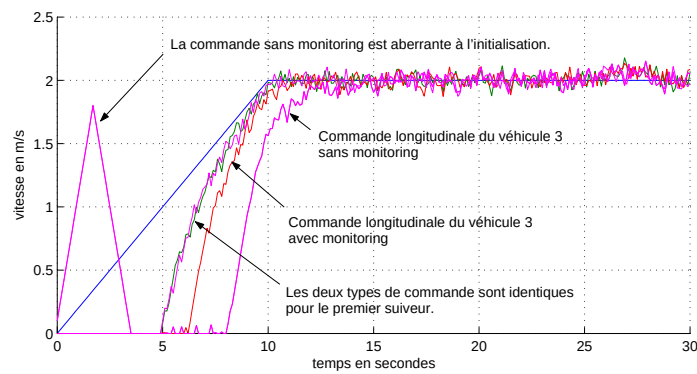


FIG. 3.27 – Vitesse longitudinale générée - Scénario 5

3.3.7 Scénario 6 : désinsertion

Lors de cette simulation, l'intérêt se porte sur la capacité des véhicules à quitter le convoi. Celui-ci, initialement composé de 5 éléments, est proche des consignes désirées. Durant l'essai, 2 membres du peloton viennent à le quitter : les véhicules placés en 3^{ème}, et 1^{ère} positions. Ces derniers doivent se rendre en positions prédéterminées repérables sur la figure 3.28.

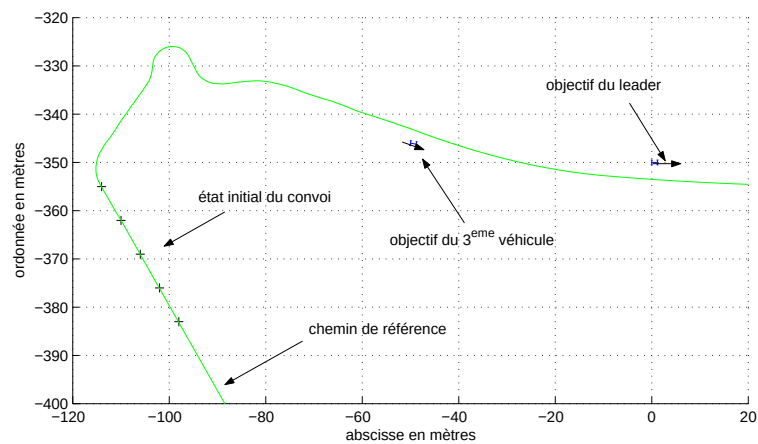


FIG. 3.28 – Configuration initiale du convoi - Scénario 6

L'évolution de l'écart curviligne avec le leader reste fidèle aux attentes, Fig. 3.29 : lorsque le véhicule sortant, quitte le convoi, les éléments situés derrière comblent l'espace laissé libre. Malgré la modification de la structure du convoi, les commandes appliquées sont confortables, Fig. 3.30. De plus, le départ du leader ne pose aucun problème : le premier suiveur devient le nouveau leader. Finalement, le convoi n'est plus formé que par 3 véhicules après les départs de 2 éléments.

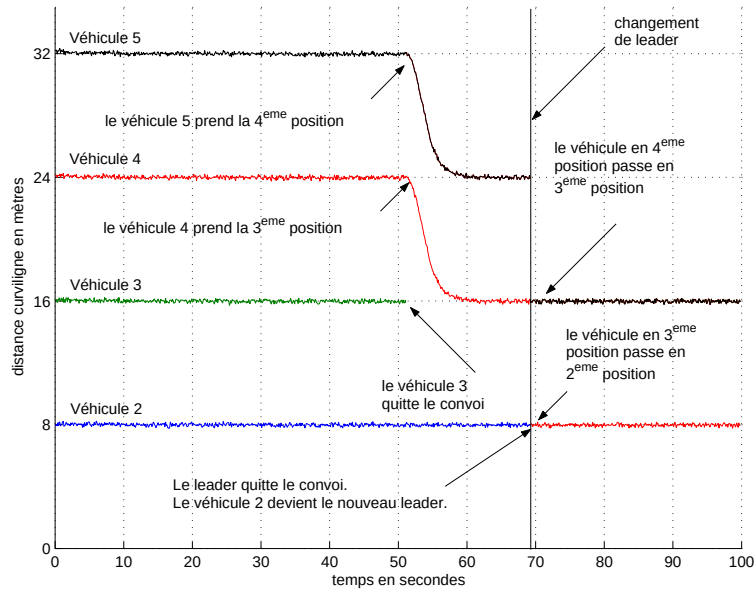


FIG. 3.29 – Ecart curviligne avec le leader - Scénario 6

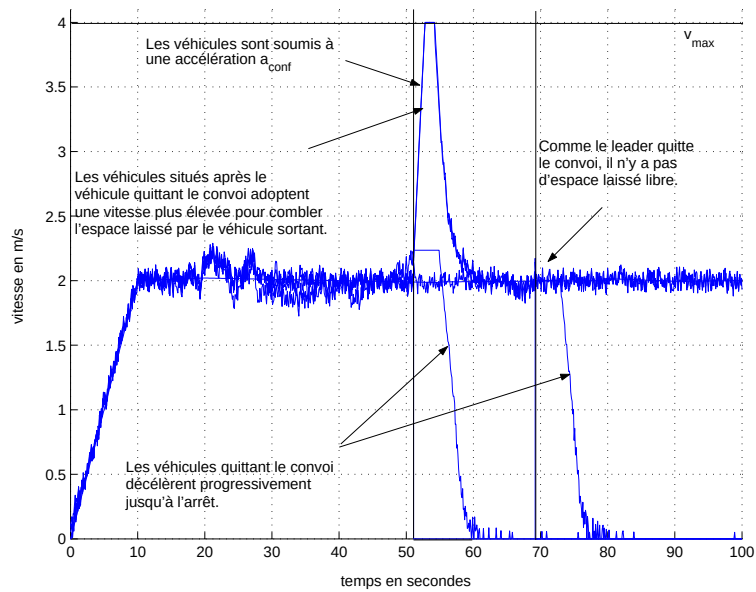


FIG. 3.30 – Vitesse longitudinale - Scénario 6

3.3.8 Scénario 7 : insertion

Cette simulation est l'opposée de la précédente. A un convoi de 5 véhicules, 2 nouveaux membres viennent se greffer : l'un prend la 3^{ème} position dans le convoi et le suivant la place de leader. Leurs positions sont visibles sur la figure 3.31.

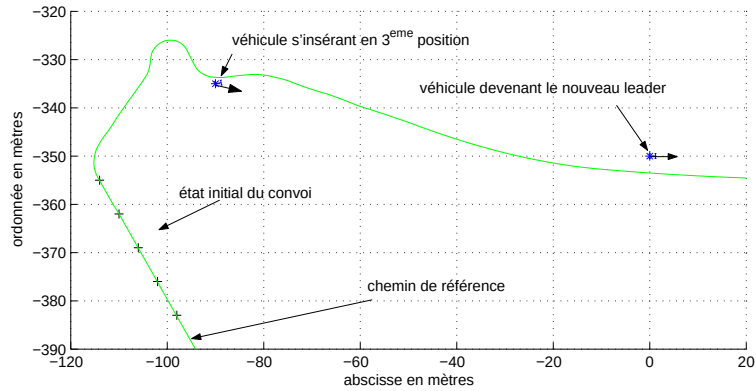


FIG. 3.31 – Configuration initiale du convoi - Scénario 7

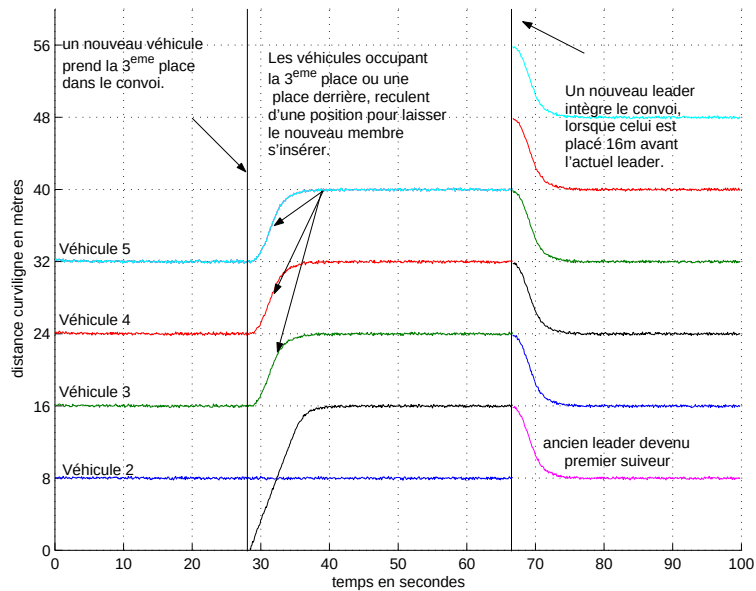


FIG. 3.32 – Ecart curviligne avec le leader - Scénario 7

Les différentes figures Fig. 3.32 et Fig. 3.33 exposent les performances de la commande, et en particulier de la supervision gérant l'insertion en convoi. Dans cette simulation, le véhicule est supposé commencer à intégrer le convoi lorsque son écart

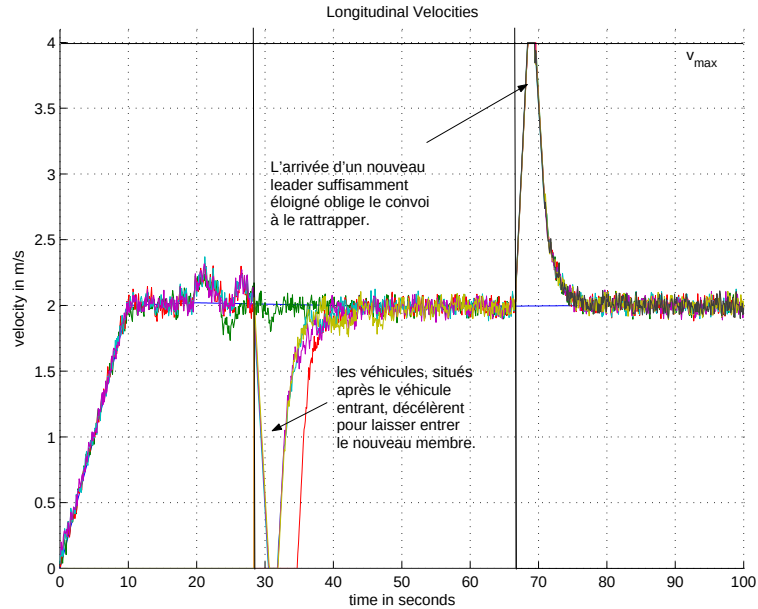


FIG. 3.33 – Vitesse longitudinale - Scénario 7

curviligne avec le véhicule qu'il doit remplacer dans le convoi est inférieur à $2d$. Cette valeur semble être un bon compromis : le véhicule n'est pas trop en avance sur le convoi (pas d'espace laissé libre pour ce véhicule trop longtemps) et a juste la distance nécessaire pour anticiper son insertion. Dans un premier temps, lorsque le nouveau membre intègre le peloton en 3^{ème} position, les éléments du convoi placés en cette position ou au-delà décélèrent pour reculer d'une place au sein du peloton, permettant ainsi de libérer un espace pour le véhicule entrant (Fig. 3.32 et Fig. 3.33). Les véhicules placés devant continuent leur fonctionnement sans être influencés par la procédure d'insertion. Le convoi est reformé et fonctionne en conditions standards assez rapidement. Dans un second temps, l'intégration d'un nouveau leader (à une distance de $2d$ de l'ancien leader, devenu le premier suiveur) oblige le convoi à accélérer pour rejoindre ce nouveau leader. Là encore, les performances sont très satisfaisantes.

3.3.9 Bilan des simulations

La diversité des simulations effectuées a pour objectif d'illustrer l'ensemble des situations auxquelles un convoi de véhicules peut être confronté, et donc de vérifier le bon fonctionnement en situations réelles, de la commande couplée à un module de supervision. Ainsi, les performances très satisfaisantes de toutes les simulations valident l'efficacité de la loi de commande et du monitoring.

3.4 Bilan du Monitoring

Dans ce chapitre, un module de supervision, nommé “monitoring”, a été introduit. Cet élément permet d’amender la loi de commande globale du convoi lorsque des situations exceptionnelles sont rencontrées. En effet, la loi de commande globale avait été validée pour des conditions standards. Comme en pratique, des aléas peuvent malheureusement survenir (pannes, arrêt d’urgence, etc.), il est nécessaire de pouvoir gérer ces imprévus. Pour réaliser cette tâche, il faut recenser un vaste ensemble d’informations (issues du convoi ou de l’environnement de travail). A partir des données récoltées, le module de supervision vérifie les commandes du convoi, et la cohérence de celles-ci avec l’attitude désirée, définie par l’utilisateur. Si les commandes sont fidèles aux attentes fixées, elles sont appliquées aux robots. Sinon, le module de supervision génère de nouvelles commandes selon les critères de fonctionnement souhaités.

Le module de supervision peut être divisé en deux fonctions distinctes : une propre au convoi et l’autre plus en interaction avec l’environnement. Ces 2 fonctions sont tout d’abord rappelées dans une première section. Ce module n’est cependant qu’une ébauche vers d’autres fonctionnalités plus complexes encore, qui sont abordées dans une deuxième section.

3.4.1 Les différents composants du monitoring

Les performances de la loi de commande globale sont très satisfaisantes en conditions standards. Malheureusement, dès que le convoi quitte ces conditions, les performances se retrouvent diminuées, voire deviennent critiques. Ainsi, à cette loi de commande, ont été ajoutées différentes entités, décrites au cours du chapitre, permettant de surmonter ces difficultés :

- La saturation de la vitesse permet de limiter celle-ci dans des limites définies comme raisonnables, afin d’éviter des commandes utopiques de forte amplitude sur des véhicules réels.
- De fortes accélérations, inconfortables pour les passagers, voire irréalisables en pratique, sont corrigées par une saturation de l’accélération/décélération des véhicules à une valeur acceptable.
- Un module sécurité, complémentaire au module confort (saturation en accélération) est mis en place pour outrepasser ces saturations lorsqu’il y a risque de collision.
- Une unité spécifique, visant à surmonter les quelques dysfonctionnements de la loi de commande liés à l’ajout de la saturation en vitesse, a finalement été introduite.

Toutes ces unités viennent se greffer à la loi de commande globale du convoi afin de former une commande longitudinale adaptée à des véhicules grandeur réelle. L’ordonnancement selon lequel viennent s’appliquer ces unités est résumé en figure Fig. 3.34 :

- La première opération consiste à déterminer les gains adaptatifs permettant d’obtenir une commande dans une plage de fonctionnement acceptable, et de gérer les dysfonctionnements engendrés par les saturations.
- La deuxième étape est le calcul proprement dit de la loi longitudinale globale pour chaque véhicule du convoi.

- En troisième point, les commandes calculées précédemment sont, en cas de nécessité, régénérées pour obtenir des commandes assurant la sécurité, et si possible le confort.

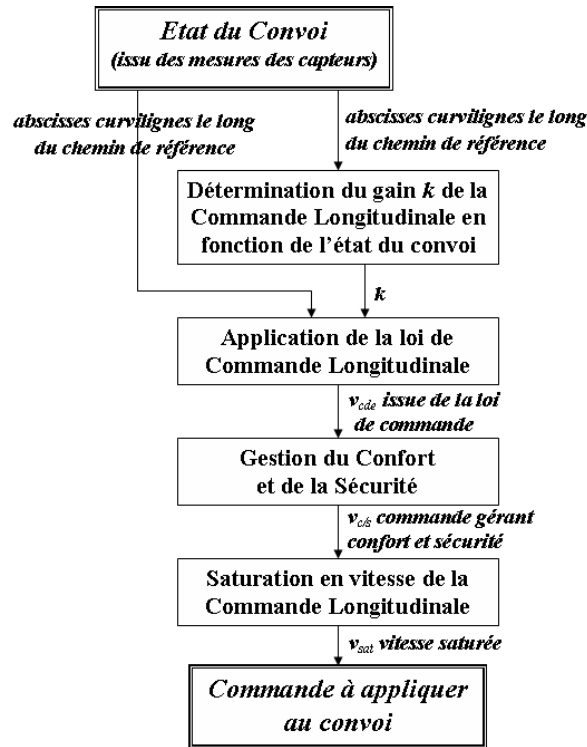


FIG. 3.34 – Les différentes étapes menant à l’obtention d’une commande en vitesse en conduite en convoi

Enfin, une unité de supervision de plus haut-niveau permet de rendre le convoi modulaire. Cette modularité est abordée via la gestion de l’insertion ou désinsertion d’un véhicule au sein du convoi. Il est à souligner que cette fonctionnalité est la seule intervenant au niveau de la coordination du convoi avec son environnement. Cette fonction dite “de coordination” assigne aux différents robots mobiles leurs lois de commande (conduite “classique” en convoi ou véhicule en phase de désinsertion du convoi) selon leurs situations.

Finalement, le fonctionnement et le bon comportement du convoi ont été testés et validés par simulations. Différentes configurations et divers modes de fonctionnement ont été éprouvés. En effet, un échantillon de scénarii, reflétant l’ensemble des cas de figure envisagés, a défini le déroulement des simulations.

3.4.2 Vers d'autres fonctionnalités

Même si le module de supervision développé gère efficacement la commande au sein du convoi, il ne tient compte que de l'ensemble du convoi et non pas de ses interactions avec des éléments extérieurs. Par conséquent, des innovations sur la gestion du convoi avec son environnement peuvent et doivent être menées pour assurer la pertinence de la commande du convoi dans toutes les situations réelles. Outre l'insertion ou la désinsertion d'un véhicule, plusieurs autres fonctionnalités sont envisageables :

- L'interaction entre un convoi et un autre peut déboucher notamment sur la jonction des deux pelotons en un unique. Un tel schéma semble incontournable en pratique si, sur une route composée de deux voies où chacune est occupée par un convoi, la chaussée venait à être réduite pour finalement n'offrir qu'une seule voie de circulation, voir figure 3.35.

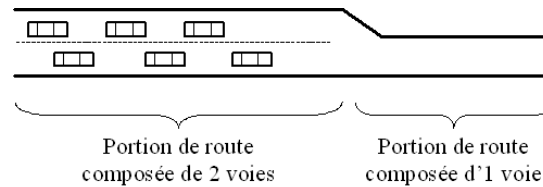


FIG. 3.35 – Nécessité de la jonction de 2 convois en 1

- A l'opposé de la jonction de convois, la scission d'un convoi en plusieurs convois est une fonctionnalité intéressante. En conditions réelles, à l'approche d'une bifurcation importante illustrée en figure 3.36, il est possible qu'une partie du convoi (véhicules avec la flèche pointant vers le haut) doive prendre une direction (A) et l'autre partie (véhicules avec la flèche pointant vers le bas) suive l'autre direction (B).

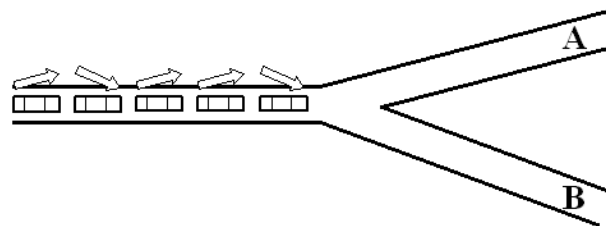


FIG. 3.36 – Scission du convoi à l'approche d'une bifurcation

- Le convoi doit tenir compte de son environnement de travail et au besoin interagir avec. En cas d'arrivées soudaines d'obstacles dans le domaine de travail, il faut que le convoi puisse détecter ces obstacles et réagir le mieux possible, notamment en les évitant. Classiquement, l'introduction de forces attractives et/ou répulsives est utilisée pour l'évitement d'obstacles. Dans [23], une telle démarche est exposée.

- La scission du convoi peut également être envisagée dans le cas où un véhicule du convoi vient à tomber en panne. Ainsi, le convoi se séparerait en deux : un premier peloton formé par les éléments situés en amont de la panne, continuerait son parcours sans être perturbé par la panne et un deuxième peloton, en aval de la panne, soit attendrait le rétablissement du véhicule posant problème (qui deviendrait ainsi le leader d'un deuxième convoi), soit éviterait ce véhicule pour continuer son parcours.
- Une particularité de la commande développée concerne la régulation longitudinale d'une distance curviligne le long d'un chemin de référence et non pas d'une distance directe. Ce type de distance reste fidèle à la distance parcourue par les robots le long de la référence, même en cas de fortes courbures. Malheureusement, si le chemin de référence venait à repasser à proximité de son tracé, des collisions peuvent advenir comme le prouve l'exemple illustré par la figure 3.37. Dans cette illustration, le convoi formé de 6 véhicules, nommés *A*, *B*, *C*, *D*, *E*,

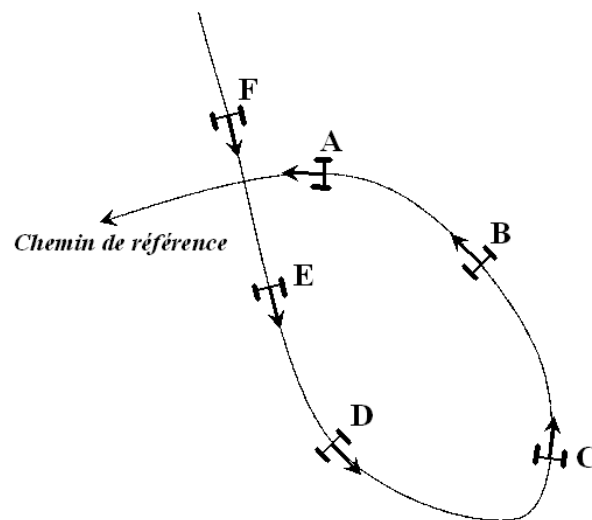


FIG. 3.37 – Illustration des risques que peuvent provoquer un chemin se recoupant

et *F*, est sujet à une collision entre les véhicules *A* et *F*, bien que le convoi soit correctement régulé. Une approche possible pour surmonter ces risques est, par exemple, d'étudier également la distance directe entre les différents membres du convoi.

- Enfin, pour s'intégrer pleinement dans la circulation urbaine, le convoi doit respecter le code de la route, et en particulier les panneaux de signalisation et les feux tricolores. Ainsi, un ou des dispositif(s) gérant la détection de la signalisation, prenant une décision et l'appliquant, doit obligatoirement être mis en place.

Chapitre 4

Implantation et validation expérimentale des lois de commande

Après avoir énoncé les différentes étapes menant à la synthèse d'une commande adaptée aux situations réelles, la phase suivante est logiquement consacrée à l'implantation et la validation de cette commande sur des voitures électriques prévues pour la conduite urbaine. Ce chapitre a ainsi comme objectif de valider par expérimentations les lois précédemment introduites. Pour ce faire, il est nécessaire d'équiper préalablement les véhicules expérimentaux et de mettre en œuvre une implantation optimale de tous les équipements.

C'est pourquoi, une première section décrit le dispositif expérimental nécessaire pour la mise en œuvre d'une conduite en convoi. Les caractéristiques propres du véhicule expérimental sont tout d'abord présentées. Ensuite, les capteurs embarqués, permettant aux véhicules de se localiser dans leur environnement, et la communication sans fil inter-véhicules, permettant aux véhicules de se localiser au sein du convoi, sont décrits. Enfin, la section s'achève par la présentation d'une architecture informatique tenant compte de l'application visée et des contraintes matérielles rencontrées.

Les expérimentations sont alors présentées dans la deuxième section. En premier lieu, la validation du guidage latéral est effectuée à l'aide d'un seul véhicule. Puis, pour évaluer les performances longitudinales, des convois de deux et trois véhicules sont réalisés en second lieu.

4.1 Mise en œuvre sur véhicules urbains

Dans cette section, une plateforme expérimentale (un peloton de véhicules) est présentée. Pour commencer, le véhicule urbain, nommé Cycab est détaillé. Puis, les organes sensoriels greffés à ces robots pour leur permettre de détecter leur environnement de travail, sont exposés. Deux types de capteurs ont été considérés pour l'application de convoi autonome présentée dans ce mémoire : d'une part, un capteur RTK-GPS (Real

Time Kinematic - Global Positioning System), et d'autre part, un capteur visuel permettant de se situer précisément dans un repère absolu. Ensuite, pour la localisation au sein du convoi, un échange d'informations est nécessaire quel que soit le capteur utilisé. Afin de résoudre ce transfert de données, l'usage de communications sans fil a été choisi et est détaillé. Enfin, une architecture propre au convoi est proposée. Celle-ci a pour rôle essentiel de coordonner et gérer l'interaction entre les différents membres du convoi au moyen des communications inter-véhicules.

4.1.1 Présentation du véhicule expérimental : le CyCab

Dans le cadre d'un grand programme de recherche, de nouveaux moyens de transport intelligents pour la ville ont vu le jour. L'objectif principal est de limiter l'usage des voitures particulières en offrant une alternative pratique, non polluante et économe en espace et en énergie. S'appuyant sur les dernières innovations technologiques développées dans le cadre du programme Praxitèle, l'INRIA est à l'origine de la conception de petits véhicules électriques, nommés "CyCab" (voir Fig. 4.1), destinés à une utilisation en libre-service. Les Cycabs sont actuellement fabriqués de façon industrielle par la société Robosoft (<http://www.robosoft.fr>), une société de technologie innovante issue de l'INRIA.



FIG. 4.1 – Le véhicule expérimental Cycab

Ces véhicules sont spécifiquement conçus pour les zones où la circulation automobile doit être fortement restreinte : centre urbain, gare/aérogare, campus universitaire, site touristique. En effet, leurs faibles dimensions (longueur 1.90 m, largeur 1.20 m, poids 300 kg) sont des avantages dans de tels environnements. Les prototypes actuels sont équipés d'un moteur électrique de 1 kW sur chacune des quatre roues motrices. Ces 4 moteurs sont alimentés par 8 batteries de plomb, autorisant une autonomie de 2 heures pour une utilisation en continu. Un ordinateur embarqué permet de piloter le robot manuellement via l'usage d'un joystick, ou de manière entièrement autonome.

Les exemplaires dont est doté le LASMEA, peuvent transporter deux individus à une vitesse maximale $v_{max} = 18km/h$. La configuration cinématique utilisée est identique à celle d'une voiture (c'est-à-dire, seules les roues avant sont directrices).

De plus, un PC est ajouté dans chaque Cycab. Cet ordinateur de haut niveau rassemble l'information reçue par les différents capteurs utilisés et génère les commandes de chaque véhicule, déterminées par les lois de commande implantées. Les consignes de commande sont ensuite transmises à l'ordinateur embarqué dans le Cycab par un réseau Ethernet. Ces consignes de commande, ou les ordres du joystick dans le cas d'une conduite manuelle, sont alors transmis, au moyen d'un bus CAN, aux microcontrôleurs MPC555 agissant sur les actionneurs du robot. En plus d'envoyer les consignes aux actionneurs, les deux cartes MPC555 (disposées sur les trains avant et arrière) permettent de remonter les mesures des codeurs disposés sur chaque roue. Les odomètres utilisés peuvent remonter les vitesses de chacune des 4 roues à la fréquence de 100 Hz. Enfin, l'angle de braquage de l'essieu avant du véhicule est également mesuré à la même fréquence d'acquisition.

4.1.2 Capteurs utilisés pour le retour d'état

Dans la section précédente, le fonctionnement matériel d'un Cycab, circulant de manière autonome, a été abordé. Cependant, pour être en mesure de commander précisément l'engin, des capacités de localisation doivent être disponibles. Les seules contraintes portant sur le capteur à utiliser pour réaliser le retour d'état concernent sa précision et son taux de rafraîchissement. Sa nature et son mode de fonctionnement, peuvent être quelconque du moment que ces contraintes sont satisfaites. Deux types de capteurs absolus ont été mis en œuvre : le GPS cinématique (RTK-GPS : Real-Time Kinematic Global Positioning System) et un système de localisation absolue basé sur la vision. Le premier cité est, sans conteste, actuellement le meilleur capteur sur le marché en terme de fiabilité et de précision, son utilisation se justifie pleinement. Cependant, afin de prouver l'indépendance entre la commande et la nature du capteur, un système de localisation original basé sur la vision a également été utilisé.

4.1.2.1 RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System)

Les capteurs RTK-GPS sont des capteurs de localisation absolue, basés sur des technologies de positionnement par satellites.

Principe général

Parmi la vaste gamme des systèmes de positionnement par satellites, les dispositifs les plus sophistiqués comprennent un système d'augmentation de la précision. Le plus classique est le GPS différentiel (DGPS : Differential Global Positioning System), pour lequel un ensemble de stations-relais terrestres placées en des positions connues, transmettent des corrections à apporter aux signaux de positionnement délivrés par les satellites. Le principe du DGPS est fondé sur le fait que, si deux récepteurs ob-

servent les mêmes satellites, ils font des erreurs de mesure d'autant plus semblables que ces récepteurs sont proches. En plaçant un récepteur, dit de référence, sur une position parfaitement connue, il est possible de comparer les mesures fournies par les signaux GPS à sa position théorique, et ainsi de connaître l'erreur courante des mesures GPS. Celle-ci sert ensuite à corriger les erreurs de mesure des récepteurs placés sur des positions inconnues. Afin que le récepteur de référence puisse communiquer avec les différents récepteurs mobiles, ceux-ci doivent être équipés d'une antenne capable de recevoir les signaux de corrections différentielles émis par la station de référence. La figure 4.2 résume le fonctionnement du DGPS.

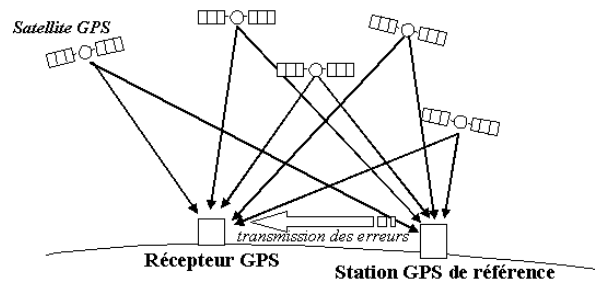


FIG. 4.2 – Fonctionnement du DGPS

Des techniques DGPS plus sophistiquées peuvent porter la précision du positionnement jusqu'à quelques millimètres. Un récepteur GPS cinématique temps réel (RTK-GPS : Real-Time Kinematic GPS) permet ainsi d'obtenir des performances de localisation de l'ordre du centimètre en temps réel. Ce dispositif utilise les corrections différentielles, ainsi que la phase du code et la phase de la porteuse des signaux GPS (rappelées sur la figure 4.3). En effet, l'usage des deux fréquences porteuses offre une source de données bien plus riche. Le RTK GPS permet donc un calcul de positionnement d'une extrême précision.

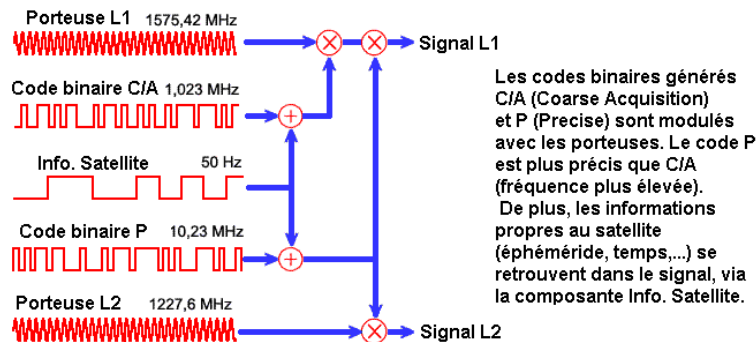


FIG. 4.3 – Représentation d'un signal GPS

Matériel utilisé

Les capteurs RTK-GPS utilisés pour l'application de conduite en convoi, des "Sagitta" (Fig. 4.4), sont produits par Thales et se composent d'une antenne GPS et d'une unité de traitement, alimentée sur batteries. Chaque capteur, monté sur un des éléments du convoi, transmet son état par le biais d'une liaison série RS-232 reliée au PC haut-niveau du véhicule. L'antenne GPS est fixée à la verticale du milieu de l'essieu arrière du véhicule (voir figure Fig 4.5) de façon à pouvoir délivrer directement le positionnement du point de contrôle *O* du véhicule, cf. Figure 2.3. Ces capteurs sont également équipés d'une communication UHF permettant la réception des corrections différentielles. La communication UHF autorise un domaine de fonctionnement, indiqué par le datasheet, de 40 km autour du récepteur de référence sur terrain dégagé. Finalement, le capteur est configuré pour donner sa position (longitude, latitude et altitude), les composantes de sa vitesse (selon la longitude, la latitude et l'altitude), une estimation de la qualité des mesures et l'instant où ces mesures sont prises.



FIG. 4.4 – Le Sagitta : un capteur RTK-GPS

En fonctionnement optimal, le récepteur offre une précision horizontale (longitude et latitude) de $1 \text{ cm} + 0.5 \text{ ppm}$ et de $2 \text{ cm} + 0.1 \text{ ppm}$ en altitude pour une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Enfin, à l'initialisation, le récepteur n'a besoin que de 30 secondes pour fonctionner.

En théorie, 4 satellites doivent être disponibles en vision directe. Cependant, dans la pratique, pour atteindre des performances optimales, un minimum de 5 satellites est préférable. Cette configuration n'est malheureusement pas toujours satisfaite dans le milieu urbain, comme le prouve les recherches [25] : quelques satellites peuvent ne pas être visibles, car cachés du capteur par des bâtiments élevés.



FIG. 4.5 – Implantation du capteur RTK-GPS sur Cycab

4.1.2.2 Localisation par vision

Connaissant les contraintes liées à l'utilisation de capteurs RTK-GPS en milieu urbain, une alternative a été considérée. Elle s'appuie sur une méthode originale développée au sein du LASMEA, fournissant la localisation d'un robot mobile à partir d'une séquence vidéo d'apprentissage. Un autre avantage de ce capteur est qu'il est également beaucoup moins coûteux qu'un récepteur RTK GPS.

En premier lieu, le fonctionnement global de cette méthode est décrit. Puis, en second lieu, les performances de l'approche sont présentées.

Principe général

Le principe de localisation par vision monoculaire se décompose en deux grandes phases distinctes. La première étape est une phase d'apprentissage. Une fois celle-ci effectuée, la seconde étape est la localisation en temps réel.

L'apprentissage consiste à définir le chemin de référence sur lequel le véhicule expérimental doit s'asservir. Pour cela, dans un premier temps, le robot est guidé manuellement sur ce chemin de référence, et une séquence vidéo est enregistrée avec une unique caméra (des extraits de l'enregistrement peuvent être visualisés sur le montage Fig 4.6). Ensuite, un calcul hors-ligne, basé sur les seules acquisitions de la caméra, permet d'obtenir une reconstruction 3D du chemin suivi et de son environnement. Le but de la reconstruction est d'obtenir la pose d'un sous-ensemble des positions successives de la caméra le long de la séquence de référence, ainsi qu'un ensemble d'amers visuels avec leurs positions 3D. Des techniques classiques utilisées en vision permettent la sélection des images clés les plus pertinentes, et donnent la pose de la caméra pour

ces images, ainsi qu'un ensemble de points 3D associés avec leur position 2D dans les images.



FIG. 4.6 – Extrait d'images issues d'une séquence vidéo

La phase de reconstruction achevée, la localisation est alors possible. A l'initialisation du processus de localisation, il faut savoir où le robot se trouve. Pour cela, l'image courante est comparée au jeu d'images clés issu de la reconstruction, afin de déterminer l'image clé correspondant le mieux, comme illustré sur la figure 4.7. La mise en correspondance des points d'intérêt de l'image courante et de l'image clé sélectionnée permet d'obtenir la pose initiale de la caméra. Cette pose est ensuite remise à jour durant le suivi du chemin de référence. Ainsi, il est possible de positionner en temps réel le véhicule grâce à une seule caméra.

Plus d'informations sur cette méthode de localisation par vision monoculaire en environnement urbain, peuvent notamment être trouvées dans [100].

Performances de la localisation

A partir de cette méthode, il semble évident que la précision de localisation est dépendante de l'environnement de travail. En effet, un milieu très structuré offre plus de points d'intérêt qu'un environnement pauvre en amers visuels. Ainsi, les performances obtenues sont bien meilleures dans un environnement complexe, comme c'est le cas pour les milieux urbains.

La caméra monoculaire est connectée sur le port FireWire du PC haut-niveau (c'est un port haut débit également connu sous le nom de bus IEEE 1394. Sa vitesse de transmission, beaucoup plus rapide que l'USB, en fait le port idéal pour la connexion de périphériques multimédia, comme les caméras). Le PC haut niveau est un Pentium 4 à 2.4 GHz. L'algorithme de localisation implanté sur ce PC, avec des images de taille 320×240 , fournit des résultats très satisfaisants, puisque l'erreur moyenne de localisation mesurée par un récepteur RTK-GPS (utilisé ici comme vérité terrain),

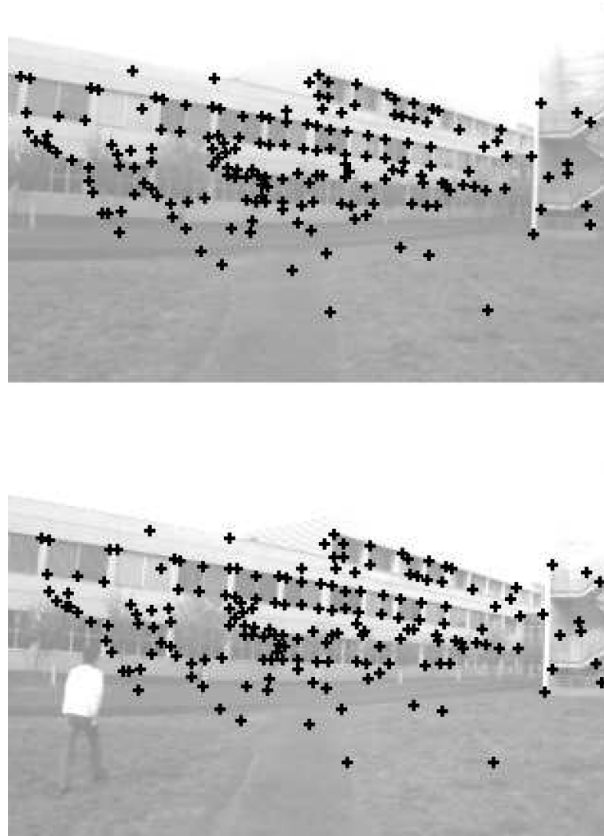


FIG. 4.7 – Exemple d'appariement de points entre une image du flux vidéo et l'image clé la plus proche

atteint 5 *cm* si l'environnement de travail est très structuré. Cette erreur peut monter à 50 *cm* dans le cas très défavorable d'un espace ouvert. Généralement, une erreur de l'ordre de 12 *cm* à 15 *cm* est obtenue. De plus, la localisation est fournie à une cadence de 30 *Hz*. Plus de précisions sont données dans [101].

4.1.2.3 Bilan des capteurs

La localisation de chaque véhicule est réalisée à l'aide d'un capteur absolu. Deux capteurs absolus ont été utilisés : un RTK-GPS, et un capteur basé sur la vision. L'avantage de ces deux capteurs est leur complémentarité. En effet, si le capteur RTK-GPS offre de meilleures performances sur terrain dégagé, où aucun risque d'occultation des signaux satellites n'est présent, il n'en est pas de même en environnement urbain. A l'opposé, la localisation par vision est nettement meilleure en milieu structuré, comme les agglomérations, qu'en environnement non structuré, par exemple en terrain dégagé. De plus, l'approche par vision permet d'obtenir l'orientation en toute circonstance, et ce même si le capteur reste à l'arrêt (ce qui n'est pas le cas avec un capteur RTK GPS).

Ainsi, le choix du capteur absolu est directement lié aux conditions expérimentales rencontrées.

4.1.3 Communication sans fil

Les capteurs présentés à la section précédente permettent à chaque véhicule de connaître sa localisation absolue avec une haute précision. Pour l'application visée (convoi de véhicules), il faut de surcroît que ces informations soient partagées entre les différents membres du peloton. Dès lors, une communication sans fil est incontournable.

Un réseau local sans fil (WLAN : Wireless Local Area Network) au sein du convoi a donc été mis en place. Les caractéristiques d'un réseau local sans fil sont décrites par la norme IEEE 802.11. Cette norme est la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbps. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des normes IEEE 802.11a, IEEE 802.11b et IEEE 802.11g, appelées normes IEEE 802.11 physiques) ou simplement pour préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité.

Plus précisément, entre les différents PC haut-niveau montés sur les Cycabs, le réseau utilisé est un réseau WiFi (initialement Wi-Fi : Wireless Fidelity, nom donné à la certification des matériels répondant à cette norme) répondant à la norme IEEE 802.11b. Un réseau Wi-Fi permet de relier tout type de périphérique à une liaison haut débit sur un rayon de plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert. Ses caractéristiques (débit, espace de recouvrement,...) sont correctement dimensionnées pour un convoi de robots, et en font une excellente solution pour l'application considérée ici.

4.1.4 Architecture du convoi

Si tous les éléments matériels (véhicules expérimentaux, capteurs,...) et logiciels (lois de commande,...) ont clairement été définis, l'interaction entre ceux-ci reste encore à préciser. Par conséquent, il faut proposer une architecture adaptée à l'application convoi. Dans cette section, plusieurs architectures existantes sont tout d'abord présentées, puis de façon plus générale, les approches centralisées et décentralisées sont comparées. Enfin, l'architecture retenue pour cette application de véhicules urbains est exposée.

4.1.4.1 Quelques architectures existantes

Dans la littérature, plusieurs types d'architecture sont présentés. Un état de l'art détaillé est donné dans [48].

L'un des exemples les plus célèbres dans le domaine des véhicules automatisés est indéniablement l'architecture de l'autoroute automatisée (AHS) du programme California PATH (Partners for Advanced Transit and Highways). Cette architecture, décrite dans [128] et [51] et illustrée sur la figure 4.8, est composée de 5 couches.

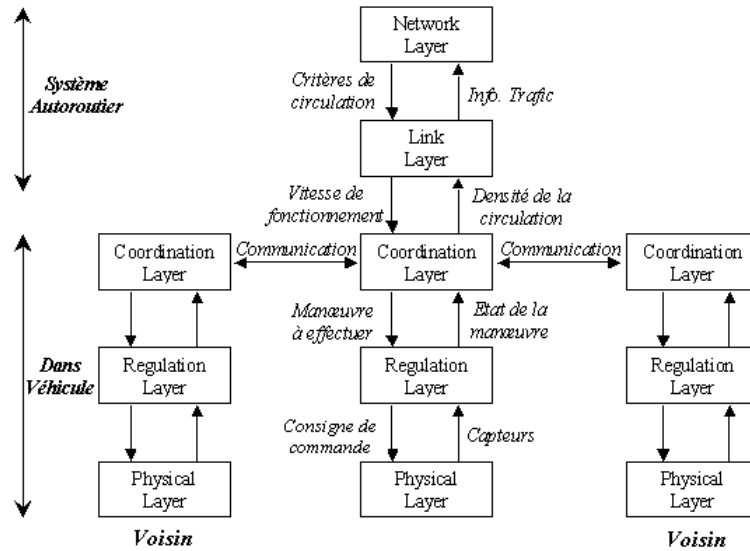


FIG. 4.8 – Architecture de commande de l’autoroute automatisée du programme PATH

Ces différentes couches, organisées hiérarchiquement, sont de la plus basse à la plus haute :

- La couche physique (*Physical Layer*) : elle comprend les contrôleurs physiques. Son rôle consiste à appliquer les consignes de commande sur les actionneurs physiques en tenant compte de la dynamique du système (moteur, transmission, frein,...) et à remonter les informations fournies par les capteurs.
- La couche de commande (*Regulation Layer*) : elle génère à partir des informations fournies par les couches en amont et en aval les consignes de commande. Dans cette couche, sont implantées les différentes lois de commande du convoi (suivre un véhicule, rejoindre ou quitter un convoi, changement de voies,...)
- La couche de coordination (*Coordination Layer*) : elle sélectionne l’action que doit entreprendre le véhicule. De plus, cette couche gère les communications permettant la coordination des différents membres du convoi.
- La couche lien (*Link Layer*) : elle contrôle le flux autoroutier en fonction d’un modèle tenant compte de la densité de circulation.
- La couche réseau (*Network Layer*) : elle est la couche de plus haut-niveau. Celle-ci contrôle globalement le trafic et autorise ou non les entrées sur l’autoroute automatisée selon les informations sur le trafic fournies par la couche lien.

La commande du véhicule est en fait réalisée par les couches de commande et de coordination. La première calculant les commandes à appliquer au véhicule par une loi de commande, elle-même sélectionnée par la deuxième couche.

Des architectures hiérarchisées de la sorte sont communément utilisées dans le domaine de l’autoroute automatisée. Ainsi, dans [48] (travaux très proches de [125]), trois

couches principales structurent l'architecture :

- La couche *guidance* permet l'acquisition des informations capteurs et le calcul des commandes à appliquer, à partir des objectifs définis par la couche supérieure. Elle se charge également de leurs applications sur les actionneurs physiques.
- La couche *management* rassemble toutes les informations émanant des véhicules (capteurs du véhicule par la couche inférieure, communication intra et inter-convoi via les autres couches *management*). A partir de ces données et des critères sur le trafic (obtenues via la couche supérieure), un objectif de commande est adressé à la couche *guidance*.
- La couche *traffic central* détermine, en fonction des informations émanant de la couche inférieure, des critères de trafic (obtenus par modèles, règles,...), et les communique à la couche *management*.

Par analogie, avec l'architecture PATH, les couches *Physical* et *Regulation* sont combinées dans la couche *guidance*. Les couches *Coordination* et *Link* se retrouvent dans la couche *management*. Enfin, les couches *Network* et *traffic central* sont similaires.

En fonction de l'architecture choisie, l'implantation des différentes couches au sein du système automatisé et la stratégie de fonctionnement diffèrent. Globalement, deux types d'approches se présentent (voir par exemple [48]).

- Dans le cas d'une approche centralisée, la prise de décision est gérée par une unité centrale (ayant le rôle de maître), collectant les différentes données nécessaires. Ce poste central est soit fixé à l'extérieur des éléments en coopération ou intégré dans un de ceux-ci, communément sur le leader. Dans tous les cas, une communication centralisée est requise.

Dans [128], les couches de gestion du trafic (*Network* et *Link*) gèrent le contrôle global du trafic des autoroutes automatisées. Les véhicules doivent attendre des ordres de cette unité centrale, ici une station fixe, et ne peuvent fonctionner de manière autonome sans cet élément.

De même, les travaux décrits dans [8], qui traitent de pelotons de bus, nécessitent une communication avec la route. Cette entité gère et impose les interactions entre les différents éléments.

Dans [12], les différents éléments en coopération (robots sous-marins) doivent attendre les ordres à appliquer (c'est-à-dire les commandes), provenant d'une unité centrale fixe (installée à la surface).

L'avantage principal de la centralisation est une meilleure coopération entre les éléments, puisque le poste central dispose simultanément de l'entière connaissance du système. Malheureusement, les transmissions peuvent provoquer de longs temps de réaction. De plus, les véhicules ne sont pas indépendants du poste central.

- L'approche décentralisée a pour objectif principal de rendre tous les robots du système indépendants d'un poste de commande central. Tous les véhicules doivent pouvoir fonctionner de manière autonome.

Par exemple, pour la régulation d'un écart inter-véhicules voisins, chaque robot,

à partir de mesures sur ses proches voisins, est capable de fonctionner en toute autonomie, sans l'aide d'un poste de commande central. Ainsi, dans les travaux [58], [60] et [59], les mesures relatives avec le véhicule de devant sont utilisées. Cependant, une communication entre les éléments voisins peut également être envisagée, comme dans [104].

Enfin, même en ayant recours à l'information provenant de véhicules autres que les proches voisins, le système peut fonctionner de manière décentralisée. Dans [115] et [114], les auteurs se basent également sur les informations du leader (par communication) pour assurer la stabilité du convoi.

Grâce à cette approche, le système est très réactif, notamment par le traitement immédiat des mesures locales. Cependant, si la commande générée sur chaque robot doit tenir compte des informations de tous les membres du convoi, les délais de communication deviendront très vite supérieurs à ceux enregistrés dans une approche centralisée. Ainsi, si un grand nombre de variables doivent être échangées, l'approche centralisée doit être privilégiée.

Dans [47] et [49], une approche originale par *teamwork* (coopération) est proposée. Celle-ci est basée sur une approche décentralisée, où chaque élément joue un rôle différent selon la situation. Par exemple, lors de la formation d'un convoi, un élément prend le rôle du *Leader*, les autres sont les *Followers* (suiveurs). Lorsqu'un véhicule manifeste le désir de quitter le convoi, il adopte le comportement du *Splitter* (véhicule démissionnaire). Le robot suiveur devient le *Gap Creator* (créateur d'espace), etc.

- Enfin, une approche intermédiaire consiste à adopter une stratégie mixte. Dans [94], un degré de centralisation est défini et donne plus ou moins d'importance à chacune des approches. La notion de centralisation est directement liée à la nature des mesures : celles locales sont caractéristiques d'une approche décentralisée, les globales sont en rapport avec une approche centralisée. A travers deux critères, le choix de ce degré est évalué :
 - En fonction des performances visées, quelle est la nécessité de devoir utiliser les mesures globales ? Et donc d'avoir recours à une stratégie plus centralisée ?
 - Quel est le retard provoqué par des mesures globales et y-a-t-il des risques de perturbations avec les mesures locales, qui justifieraient de recourir à une stratégie plus décentralisée ?

4.1.4.2 Solutions envisageables

Afin de réaliser la conduite en convoi de véhicules urbains, une architecture cohérente doit être trouvée. Une possibilité est de partir du modèle de l'autoroute automatisée du programme PATH (Fig. 4.8) et de l'adapter à l'application visée.

Dans un premier temps, comme l'un des objectifs est de ne pas avoir à équiper l'infrastructure (pour la portabilité de l'application), la communication avec celle-ci n'est pas souhaitée. Aussi, les deux couches supérieures (*Network* et *Link*) ne sont pas requises pour assurer la fonctionnalité convoi. Cependant, elles pourraient être utiles

par la suite pour assurer la gestion générale de la flotte de véhicules urbains par un centre de maintenance.

Actuellement, à partir des travaux décrits, la couche *coordination* a pour rôle de choisir entre la commande nominale, assurant la marche en convoi des véhicules, et les commandes latérale et longitudinale permettant l'insertion d'un véhicule dans le convoi ou la désinsertion d'un véhicule. La couche *commande* calcule ensuite les variables de commande et la couche *physique* les convertit en vitesse et en direction pour les appliquer sur les actionneurs réels. Elle fournit également les mesures locales à la couche *commande*.

Ensuite, selon le niveau d'autonomie souhaité pour les membres du convoi et des communications inter-véhicules mises en œuvre, l'une ou l'autre des approches (centralisée ou décentralisée) peut être préférée.

Approche centralisée

Une approche centralisée présente l'avantage de recenser toutes les données émises en un unique point : toutes les mesures parviennent à un poste central (intérieur ou extérieur au convoi) en seulement $2n$ communications (n communications pour recevoir les données des n véhicules, et n communications pour les émettre vers les robots. Si le poste central fait partie du convoi, seules $(2n - 2)$ communications sont nécessaires). Ainsi, en un nombre de communications relativement faible, chaque véhicule du convoi est en mesure de se représenter l'ensemble du convoi.

Cependant, dans le cadre de ces travaux, la loi de commande employée ne requiert pas la connaissance de l'état de tout le convoi, mais uniquement deux informations : les états du leader et du véhicule immédiatement devant. Dans ce cas particulier, seules $(2n - 3)$ communications sont nécessaires en utilisant une approche décentralisée (pour un convoi de n véhicules, le leader doit transmettre des informations aux $n - 1$ véhicules suiveurs, et chaque suiveur doit récupérer les données du véhicule précédent, soit $n - 2$ communications (le premier suiveur recevant déjà les données du leader)). Par conséquent, les délais de communication sont sensiblement les mêmes quelle que soit l'approche adoptée.

Néanmoins, si les mesures d'un autre véhicule du convoi, autre que le leader et le véhicule immédiatement devant celui commandé, venaient à être nécessaires pour une commande plus évoluée, l'approche décentralisée nécessiterait quasiment $3n$ communications contre $2n$ communications pour l'approche centralisée. Et bien sûr, ce gain serait d'autant plus important que le nombre de véhicules devant fournir des informations pour calculer la commande serait grand. Dans ce cas, une architecture centralisée permettrait cette fois de gagner en temps de communication.

Sur un plan matériel, une solution pourrait être d'implanter les couches *coordination* et *commande* dans une unité de commande, comme sur la figure 4.9. Celle-ci collecterait toutes les données et calculerait les consignes de commande de chaque élément du convoi. Une telle architecture serait également très bénéfique pour le développement : toutes les données seraient en effet accessibles sur un seul poste de travail. Néanmoins,

si des pannes venaient à se manifester sur ce poste central, le convoi se retrouverait hors d'usage.

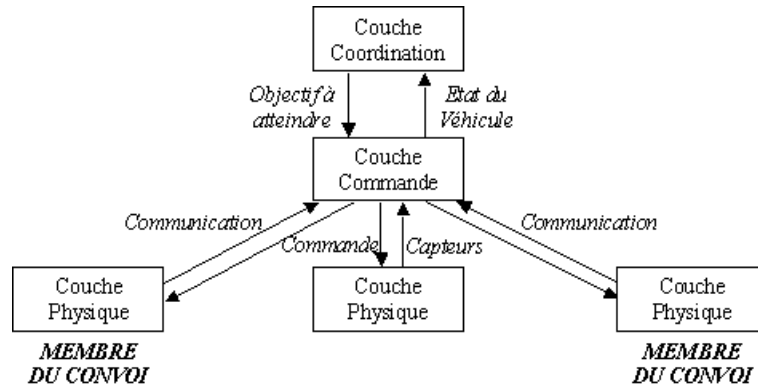


FIG. 4.9 – Une architecture alternative basée sur une approche centralisée

Approche décentralisée

Devant le manque de réactivité, en cas de panne, d'une architecture centralisée, et comme les délais de communication sont du même ordre de grandeur, l'alternative d'une approche décentralisée est envisageable.

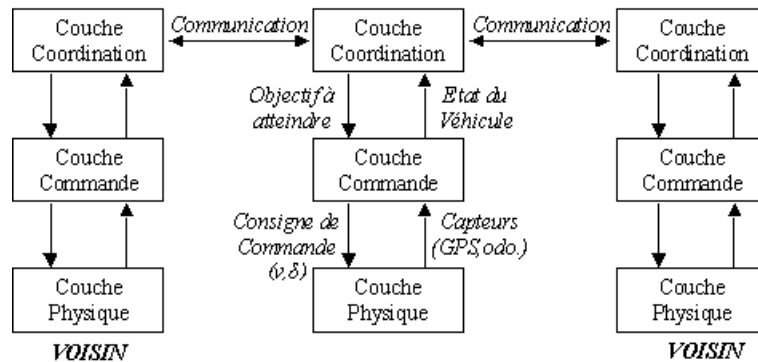


FIG. 4.10 – Architecture adoptée pour le convoi urbain

D'après le schéma Fig. 4.10, chaque véhicule est capable de fonctionner de manière autonome au sein du convoi, grâce aux données fournies par la communication. De plus, la commande décrite ne requiert qu'une communication avec le leader et le véhicule immédiatement devant, ce qui engendre une mise en œuvre pratique peu contraignante (il serait également envisageable de réduire encore les communications en mesurant l'écart avec le véhicule juste devant grâce à des capteurs de mesure locale, mais ceci im-

pose de fortes contraintes sur ces capteurs qui paraissent très difficilement réalisables). Par conséquent, et en grande partie en raison de sa plus grande autonomie, l'approche adoptée pour ces travaux est basée sur une architecture décentralisée.

4.1.4.3 Mise en pratique de l'architecture adaptée pour le convoi urbain (Fig. 4.10)

Au vu du type de convoi envisagé (basé sur les lois de commande développées dans les chapitres II et III et nécessitant seulement la connaissance de l'état du véhicule précédent et du leader) et des contraintes liées aux deux architectures susceptibles d'être implantées, il a été préféré l'architecture décentralisée à celle centralisée. En effet, pour des délais de communication du même ordre, l'approche centralisée présente l'important désavantage de laisser les différents éléments du convoi trop dépendants de l'unité centrale. La mise en œuvre d'une architecture décentralisée est détaillée ci-dessous par couche hiérarchique.

Couche Coordination

La couche de coordination collecte les différentes données provenant d'autres véhicules du convoi, au moyen de passerelles WiFi (décrites en début de section). Ces informations peuvent être de différents formats : toutes les mesures brutes d'un robot peuvent être transmises sans traitement, ou alors seul l'état évalué du robot (à partir des mesures précédentes) peut être transmis.

En adoptant une approche basée sur la communication de toutes les mesures effectuées localement, chaque élément du convoi recevant ces données doit être capable de les interpréter pour reconstruire l'état du convoi. Une telle approche présente quelques inconvénients : d'une part, chaque véhicule doit reconstruire l'état des membres du convoi à partir des mesures émises par ces derniers, d'autre part, la quantité d'informations transmise sur le réseau de communication est importante, et des risques de saturation du média peuvent alors survenir.

La transmission seule de l'état du véhicule élimine ces 2 difficultés : tous les véhicules, en recevant un état, n'ont plus à prédisposer d'un temps de calcul propre à la reconstruction de celui-ci à partir des mesures. De plus, le médium de communication se retrouve allégé en termes d'informations transmises.

Une approche de localisation basée sur la communication de l'état de chaque véhicule a par conséquent été adoptée. Cet état est reconstruit localement et indépendamment des autres éléments du convoi. Par conséquent, afin de pouvoir localiser les véhicules les uns par rapport aux autres, les états de ces derniers doivent être exprimés dans un même repère absolu. C'est tout à fait le cas ici, étant donné le système de localisation utilisé (GPS ou vision).

Une alternative, développée au LASMEA, mais non utilisée pour ces travaux, est présentée dans [57]. C'est une approche originale pour la localisation collective basée sur la communication de l'état de l'environnement. Chaque robot estime de manière indépendante l'état de son environnement et la transmet aux autres membres du groupe.

Il reçoit de la même façon les estimations de l'état de l'environnement faites par chacun des autres robots. La fusion de ces états donne l'état global de l'environnement.

Une fois le robot localisé dans le convoi, la coordination permet d'affecter la commande à appliquer à la couche inférieure. Pour le moment, le module de coordination est composé du seul module de supervision gérant, soit la commande liée à conduite standard en convoi, ou soit celles gérant les procédures d'insertion ou de désinsertion au sein du convoi.

Couche Commande

La couche commande a pour objectif de générer la commande à appliquer au véhicule. Elle se situe au niveau de l'ordinateur portable haut-niveau. A partir des mesures des capteurs implantés localement (RTK-GPS relié au PC portable par une liaison série classique RS232, ou vision par le biais d'un réseau IEEE 1394 (FireWire)) et de l'état du convoi provenant de la couche supérieure (couche *coordination*), les consignes en commandes longitudinale et latérale sont calculées et transmises à la couche inférieure : la couche *physique*.

Couche Physique

Finalement, les différents organes moteur du véhicule répondent aux consignes de commande, engendrant ainsi le mouvement du robot.

Schéma Global

L'ensemble de cette description peut se résumer sous la forme d'un schéma global Fig. 4.11.

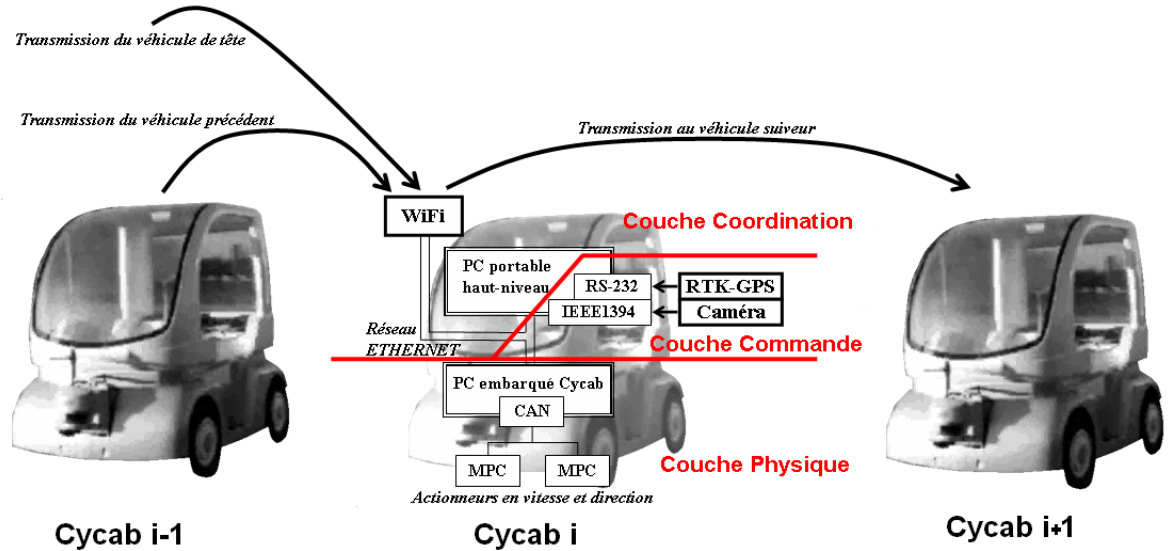


FIG. 4.11 – Architecture utilisée pour les applications de conduite en convoi

4.2 Expérimentations

A partir des développements précédents, il est possible de réaliser en pratique un convoi de véhicules urbains. Pour cela, la commande synthétisée dans les Chapitres II et III a été implantée sur les véhicules expérimentaux, équipés des ressources matérielles décrites dans la section précédente. De cette manière, plusieurs expériences ont pu être effectuées sur le campus des “Cézeaux”.

Les premiers essais présentés ne concernent qu’un seul Cycab, et valident les performances latérales. Puis, les expérimentations suivantes traitent des performances longitudinales, au travers d’évolutions en convoi réalisées avec deux puis trois véhicules. Ce fonctionnement en peloton a été testé, tout d’abord dans des conditions standards, puis en situations critiques.

4.2.1 Performances latérales

Cette partie a pour objectif de valider expérimentalement la commande latérale. Pour cela, un seul véhicule est utilisé, et les deux types de capteurs (RTK GPS et vision) ont été successivement considérés.

L’objectif de la commande latérale est le suivi d’un chemin. Ce chemin de référence est modifié d’une expérimentation à l’autre. Cette diversité permet d’illustrer le comportement de la commande latérale par rapport à différentes consignes.

Dans le cas où le capteur utilisé est le RTK GPS (sections 4.2.1.1, 4.2.1.2 et 4.2.1.3), un premier passage en conduite manuelle à basse vitesse constante permet d’enregistrer, toutes les 100 ms, les coordonnées du véhicule sur une trajectoire donnée. Un fichier,

composé de ces points de passage, constitue l'image du chemin de référence qui sera utilisée par l'algorithme de commande. Dans le cas où le capteur utilisé est la vision (section 4.2.1.4), le chemin de référence est obtenu par reconstruction 3D à partir de la séquence vidéo acquise, là encore, lors d'un premier passage en conduite manuelle à basse vitesse.

4.2.1.1 Performances latérales en ligne droite

Dans ce paragraphe, une portion de ligne droite constitue le chemin de référence. L'objectif est, d'une part d'évaluer les performances de la loi de commande latérale dans le cas le plus favorable (suivi d'un chemin à courbure nulle), et d'autre part de vérifier que celles-ci sont bien indépendantes de la vitesse du véhicule.

Les paramètres de la loi de commande sont identiques à ceux précédemment utilisés en simulation : $K_p = 0.09$ et $K_d = 0.6$. Ce choix impose (d'après (2.21) et (2.22)) une distance d'établissement d_m égale à 15.82 m . Cette distance est raisonnable comparée à l'échelle du véhicule. Prendre une distance plus faible aurait conduit à des angles de braquage plus élevés sur les roues avant, donc des trajectoires du véhicule avec des rayons de courbure plus courts, ce qui peut être inconfortable pour les passagers. La saturation de l'actionneur de direction aurait également été risquée.

Pour ce jeu d'expérimentations, la voiture est initialement disposée à environ 2 m de la trajectoire de référence, avec une erreur angulaire nulle ($y_{ini} = y_{(s=0)} = -2\text{ m}$ et $\tilde{\theta}_{ini} = \tilde{\theta}_{(s=0)} = 0^\circ$). Cinq essais ont été réalisés, pour cinq valeurs différentes de la vitesse du véhicule : 3.6 km/h , 5.9 km/h , 8.1 km/h , 10.3 km/h et 12.4 km/h . Les erreurs latérales entre le véhicule et le chemin de référence sont représentées sur le graphique Fig. 4.12 (courbes en bleu foncé à 3.6 km/h , en rouge à 5.9 km/h , en cyan à 8.1 km/h , en rose à 10.3 km/h et en vert à 12.4 km/h).

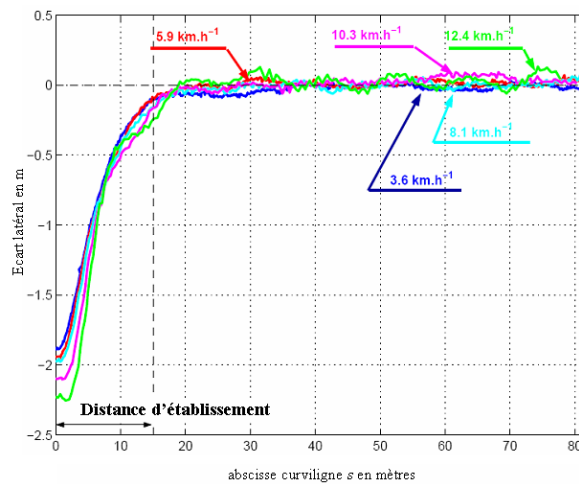


FIG. 4.12 – Erreurs latérales en ligne droite

Premièrement, les trajectoires du véhicule sont parfaitement superposées, et ce quelle que soit sa vitesse de fonctionnement. Par conséquent, les performances latérales sont bien indépendantes de la vitesse, comme attendu.

De plus, il est également possible de vérifier que la distance d'établissement correspond bien aux attentes : une fois que le Cycab a parcouru $d_m = 15.8 \text{ m}$ le long du chemin de référence, les erreurs latérales observées sont bien égales à 5 % de la valeur initiale $y_{d_m} = y_{(s=15.8 \text{ m})} = 0.05y_{(s=0)}$, soit environ 0.1 m . L'évolution de l'erreur latérale est donc bien fidèle à l'équation (2.17). De légères différences apparaissent aux grandes vitesses. Celles-ci s'expliquent par les retards introduits par les actionneurs. En effet, un court instant est nécessaire avant que les roues avant soient braquées. A haute vitesse, cela se traduit par quelques mètres avant que le véhicule ne commence à converger, comme l'attestent les courbes : l'erreur latérale reste constante une courte distance après l'instant initial.

Enfin, il est possible vérifier que les performances de régulation sont très satisfaisantes en ligne droite. La moyenne $\bar{y}$ et l'écart-type $std(y)$ de l'erreur latérale ont été calculés sur la plage où le véhicule avait déjà convergé sur le chemin de référence. Ces grandeurs sont reportées dans la table Tab. 4.1. Il est à noter que les performances sont détériorées aux hautes vitesses Ceci est toujours dû aux retards introduits par les actionneurs. De plus, l'acquisition des données GPS engendre également un délai supplémentaire. Bien que les mesures s'effectuent régulièrement au cours du temps (toutes les 100 ms), elles sont plus espacées en terme de distance lorsque la vitesse augmente. Par conséquent, les performances de la régulation sont dégradées aux hautes vitesses.

Vitesses	3.6 km/h	5.9 km/h	8.1 km/h	10.3 km/h	12.4 km/h
$\bar{y}$	-1.1 cm	1.5 cm	0.7 cm	3.5 cm	2.3 cm
$std(y)$	1.5 cm	2.1 cm	2.6 cm	2.7 cm	4.4 cm

TAB. 4.1 – Performances de régulation en ligne droite

4.2.1.2 Performances latérales en courbe

Dans l'expérimentation suivante, l'objectif de la commande latérale est le suivi d'un chemin aller-retour illustré par la figure 4.13 et mesurant 200 m . Celui-ci est caractéristique des situations pouvant être rencontrées en pratique : il est composé d'une succession de lignes droites et de virages à courbure variable. Plus précisément, sur cette trajectoire de référence, 3 sections sont distinguées, pour permettre ensuite de commenter les performances latérales : une chicane, un virage à 180° et deux lignes droites.

Dans un premier temps, l'indépendance des performances latérales par rapport à la vitesse est une nouvelle fois vérifiée. Pour cela, trois essais ont été réalisés respectivement à 3 km/h , 5 km/h et 7 km/h . Les autres paramètres de la loi de commande sont

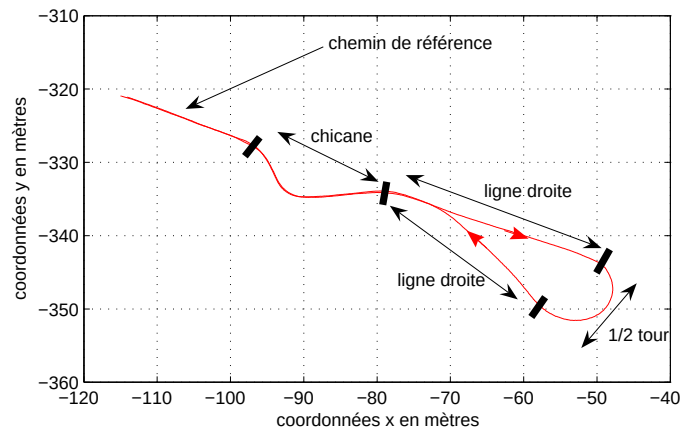


FIG. 4.13 – Chemin de référence

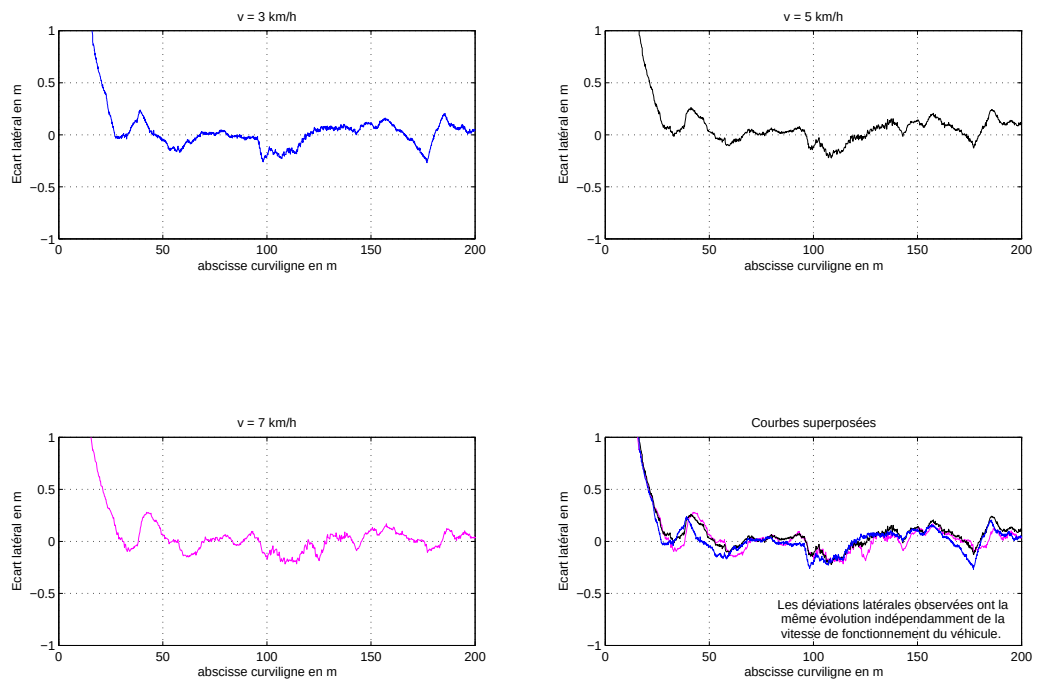


FIG. 4.14 – Erreurs latérales

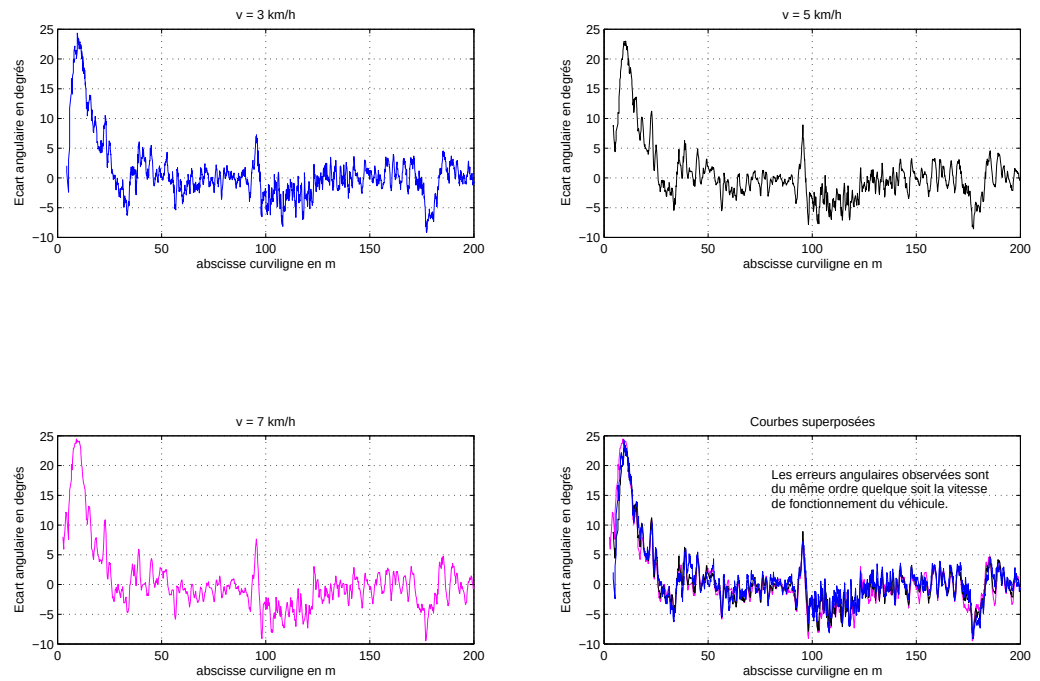


FIG. 4.15 – Erreurs angulaires

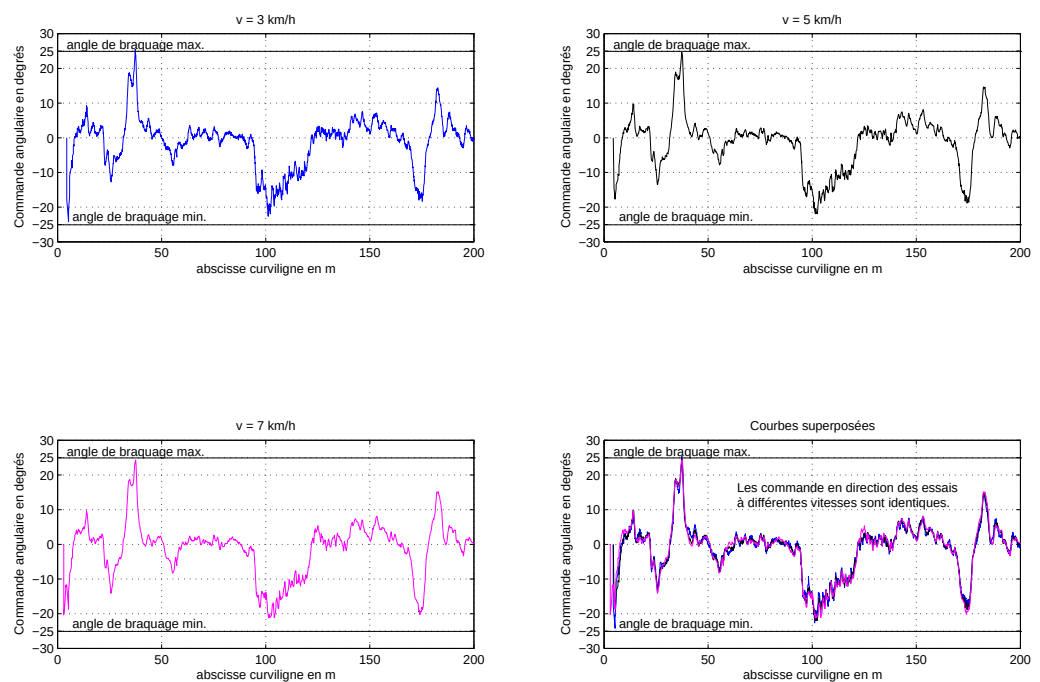


FIG. 4.16 – Commandes latérales générées

identiques à ceux des essais précédents. Les résultats expérimentaux sont reportés sur les figures Fig. 4.14, Fig. 4.15 et Fig. 4.16 en bleu (3 km/h), noir (5 km/h) et magenta (7 km/h).

L'observation globale de ces figures indique effectivement la non-influence de la vitesse sur les performances latérales : les commandes générées sont très proches les unes des autres, voir Fig. 4.16. Comme précédemment lors des essais en ligne droite, les performances latérales sont indépendantes de la vitesse. Néanmoins, en analysant plus précisément les courbes, des oscillations peuvent être visualisées aux vitesses les plus élevées. Celles-ci sont toujours dues aux délais introduits par les actionneurs et à l'acquisition des mesures GPS. Pour quantifier l'influence de la vitesse sur les acquisitions GPS, il est à noter qu'à 3 km/h , presque 2500 acquisitions sont réalisées durant l'ensemble du suivi contre 1000 acquisitions à 7 km/h . Enfin, l'observation de l'erreur angulaire met en évidence des performances de régulation inférieures sur les sections à grande courbure (abscisses curvilignes proches de 100 m et de 180 m). Ceci s'explique par le fait que l'actionneur de direction est alors très proche de la saturation.

Dans un second temps, quatre essais ont été réalisés à une vitesse constante de 4 km/h . Les paramètres de la loi de commande sont toujours identiques, seuls les états initiaux diffèrent et sont représentés sur la figure 4.17. L'objectif est ici de mettre en avant l'un des principaux avantages de l'approche linéarisation exacte pour la synthèse de la loi de commande latérale : comme aucune approximation n'est introduite durant la synthèse de la loi, l'écart latéral doit toujours respecter l'évolution donnée par (2.17), même si les erreurs latérales y et angulaires $\tilde{\theta}$ sont initialement importantes.

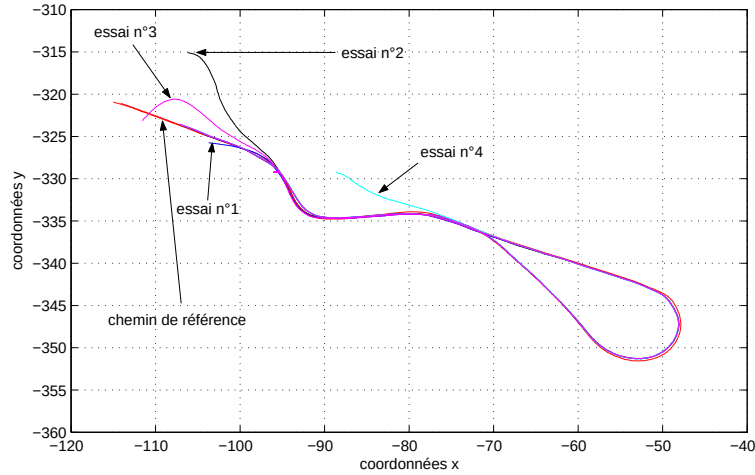


FIG. 4.17 – Trajectoires effectuées et chemin de référence

Dans le premier essai, qui sert d'étalon, le véhicule est initialement sur le chemin ($y_{ini} = 0 \text{ m}$ et $\tilde{\theta}_{ini} = 0^\circ$). Ensuite, dans le deuxième essai, l'écart latéral est élevé, alors que l'orientation du véhicule est proche de celle du chemin : le Cycab est disposé

initialement parallèlement au chemin à une distance de 15 m environ ($y_{ini} = 15$ m et $\tilde{\theta}_{ini} = 0^\circ$). Puis, dans le troisième essai, seule l'erreur angulaire est élevée : le véhicule est sur le chemin, mais son orientation présente un écart de près de 60° avec l'orientation du chemin ($y_{ini} = 0$ m et $\tilde{\theta}_{ini} = 60^\circ$). Enfin, dans la dernière expérimentation, le Cycab est disposé à l'intérieur de la chicane.

Les erreurs latérale et angulaire sont représentées sur les figures Fig. 4.18 et Fig. 4.19. Les 3 sections du chemin de référence sont indiquées : le virage à 180° à mi-parcours, puis une ligne droite et le passage de la chicane dans le sens du retour. Dans tous les cas, le véhicule rejoint la trajectoire de référence en 15.8 m. Ceci illustre que les performances de la loi de commande non-linéaire restent identiques, même pour des erreurs initiales grandes, comme attendu. Une fois le chemin de référence atteint, les évolutions des différentes erreurs, observées pour chacun des essais, sont très proches. Fort logiquement, les différentes évolutions de la commande en direction (angle de braquage de la roue avant) restent similaires, comme l'atteste la figure 4.20.

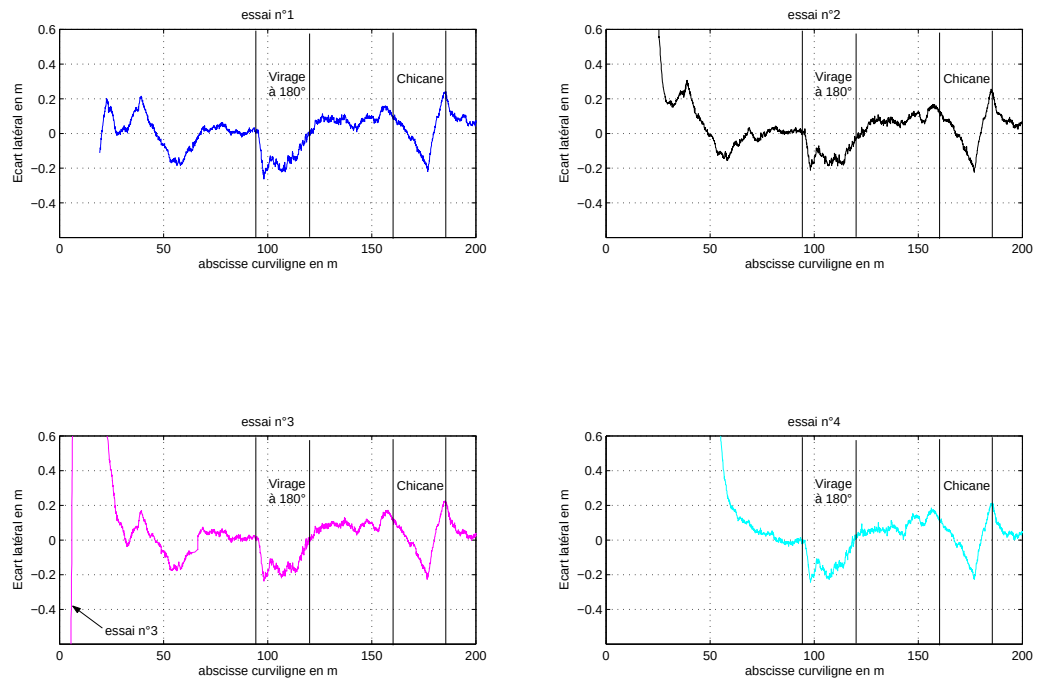


FIG. 4.18 – Erreurs latérales

L'étude statistique des performances latérales, sur les tableaux Tab. 4.2 et Tab. 4.3, confirme ces observations : toutes les erreurs, pour chacun des essais, sont du même ordre.

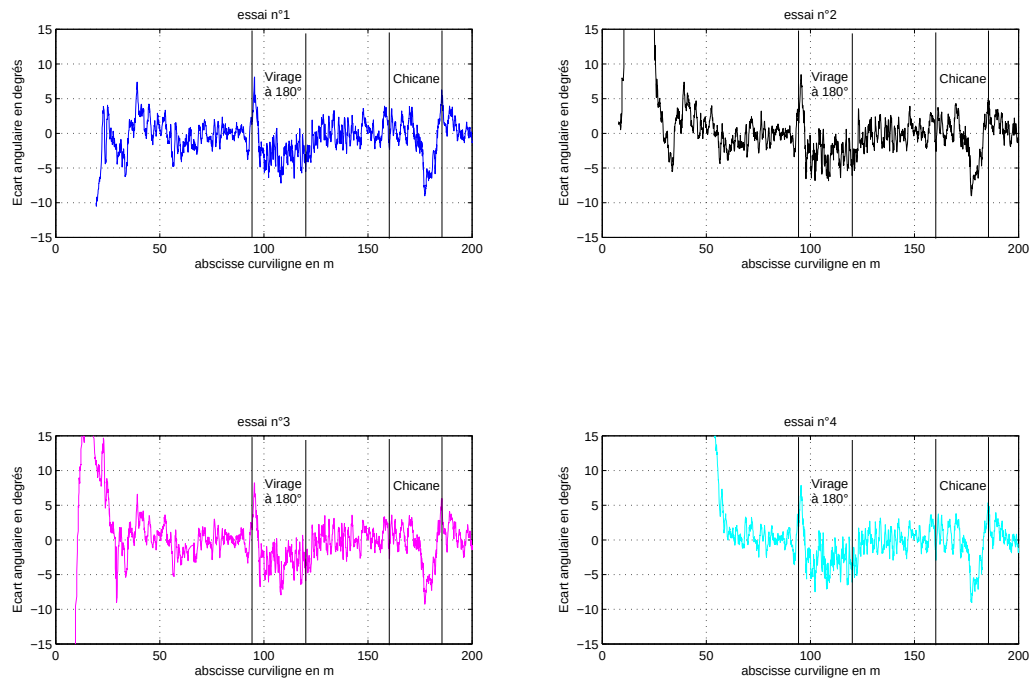


FIG. 4.19 – Erreurs angulaires

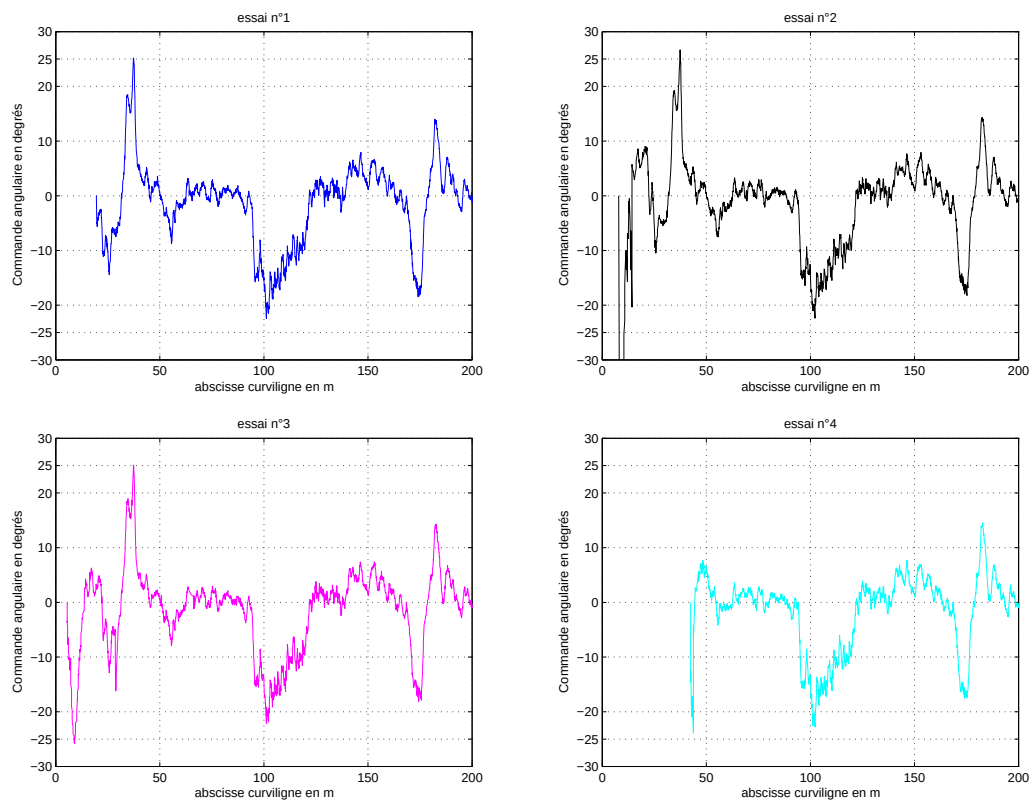


FIG. 4.20 – Commandes latérales sur l'angle des roues

Essais	virage à 180°	en ligne droite	chicane (retour)
1	9.5 cm	3.0 cm	11.7 cm
2	9.5 cm	3.0 cm	11.6 cm
3	9.5 cm	3.0 cm	11.2 cm
4	9.5 cm	4.0 cm	10.6 cm

TAB. 4.2 – Ecart-type de l'erreur latérale

Essais	virage à 180°	en ligne droite	chicane (retour)
1	1.7°	1.4°	3.2°
2	1.9°	1.4°	3.2°
3	1.9°	1.4°	3.2°
4	2.2°	1.4°	3.2°

TAB. 4.3 – Ecart-type de l'erreur angulaire

Plus précisément, l'observation de ces tableaux montre que les performances latérales en ligne droite sont bien supérieures à celles en courbe : des écarts-type proches de 3.0 cm et 1.4° sont révélés en ligne droite, contre 10 cm et 3° lors du suivi de grandes courbures (virage à 180° et chicane). Ces erreurs peuvent s'expliquer, d'une part par le fait que les actionneurs sont très proches de la saturation (Fig. 4.20), et d'autre part par le retard matériel introduit par ceux-ci. Une prédiction sur la commande permettrait certainement d'atténuer ces erreurs. L'évolution de l'erreur angulaire corrobore cette proposition : les performances de régulation angulaire sont meilleures à courbure constante, l'écart-type angulaire est d'environ 2.0° en virage et de 1.4° en ligne droite contre 3.2° dans la chicane.

4.2.1.3 Influence des gains

Les cinq expérimentations décrites ci-dessous illustrent l'influence des gains sur les performances de la commande latérale. Au cours de ces expérimentations, réalisées à la vitesse constante de 4 km/h, les gains sont modifiés pour assurer différentes distances d'établissement.

Les différents essais sont présentés sur le tableau Tab. 4.4, qui fournit les gains latéraux (K_p et K_d) et la distance d'établissement d_m associée, ainsi que la couleur représentant l'essai sur les figures Fig. 4.21 et Fig. 4.22. Enfin, le dernier essai, en ligne pointillée verte, correspond à un choix de gains, imposant un amortissement faible, donc une convergence avec des oscillations amorties.

L'observation de la figure 4.21 montre globalement que les distances d'établissement sont respectées. De même, le dernier essai donne effectivement une trajectoire qui oscille autour du chemin de référence en s'atténuant progressivement. La valeur des distances d'établissement peut être lue plus précisément sur la Fig. 4.22, qui représente l'évolution

Essais	K_p	K_d	d_m	couleur
1	0.16	0.8	12 m	noir
2	0.09	0.6	16 m	magenta
3	0.04	0.4	24 m	bleu
4	0.0225	0.3	32 m	marron

TAB. 4.4 – Paramètres des expérimentations

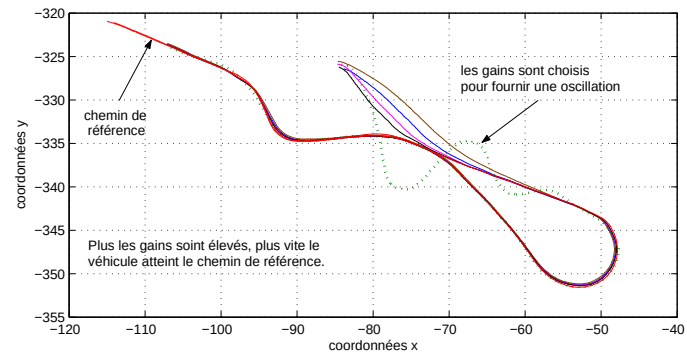


FIG. 4.21 – Trajectoires des essais avec différents gains

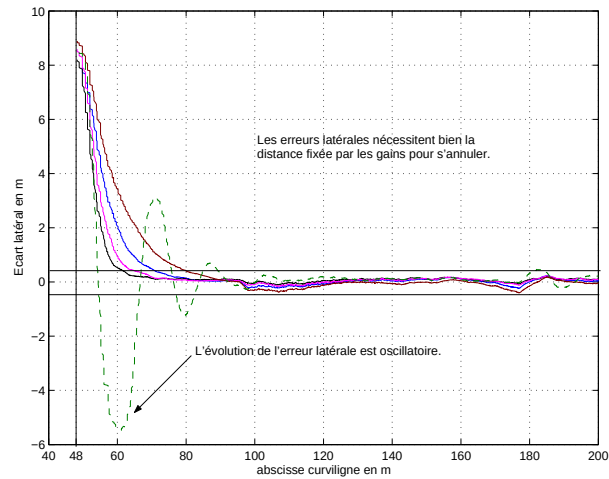


FIG. 4.22 – Erreurs latérales

de l'erreur latérale en fonction de la distance parcourue le long du chemin de référence.

4.2.1.4 Indépendance par rapport aux capteurs

Enfin, cinq dernières expérimentations ont été réalisées pour illustrer que le comportement de la loi de commande est indépendant du système de perception. Le suivi du chemin décrit par la figure 4.23 a été réalisé avec différentes modalités capteurs (les paramètres de la loi de commande restant les mêmes). Quatre expérimentations ont été réalisées avec le système de localisation basé sur la vision. La luminosité influant sur les performances de localisation, les deux premiers essais ont été réalisés lors d'une journée ensoleillée, les deux suivants lors d'une journée nuageuse qui est un contexte plus favorable pour le capteur de vision (pas de surexposition). Le capteur RTK-GPS était alors utilisé uniquement pour évaluer les erreurs latérales. Enfin, une cinquième expérimentation a été effectuée avec le système de localisation RTK-GPS pour commander le véhicule.

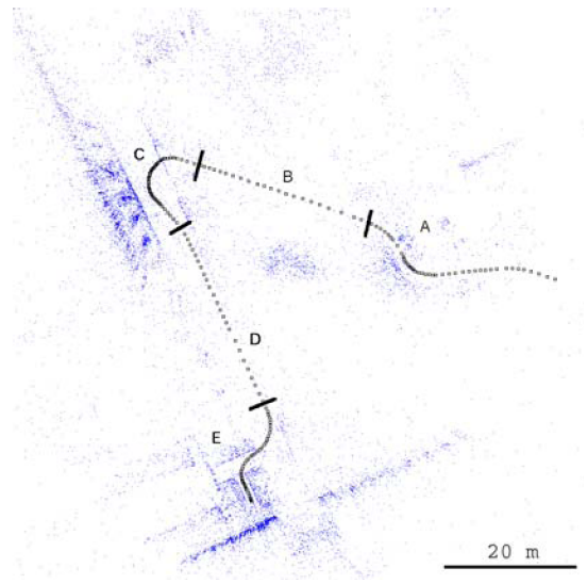


FIG. 4.23 – Trajectoires suivies par le véhicule

Les erreurs latérales enregistrées durant trois de ces essais sont illustrées sur la figure 4.24. Des lettres permettent d'identifier chacune des portions du chemin de référence (Fig. 4.23). Les erreurs latérales sur les portions droites sont sensiblement identiques. La moyenne des erreurs latérales en ligne droite (B et D) est nulle, et les écarts-type sont donnés par le tableau Tab. 4.5. Il est à constater que les erreurs sont globalement du même ordre. De ce fait, la nature des capteurs n'influe pas sur les performances de régulation en ligne droite.

Ensuite, le tableau Tab. 4.6 permet d'analyser les performances en courbes (C et E). Il fournit les valeurs extrêmes de l'écart latéral sur ces 2 parties de la trajectoire.

Il faut préciser que le deuxième essai effectué en journée ensoleillée a été réalisé

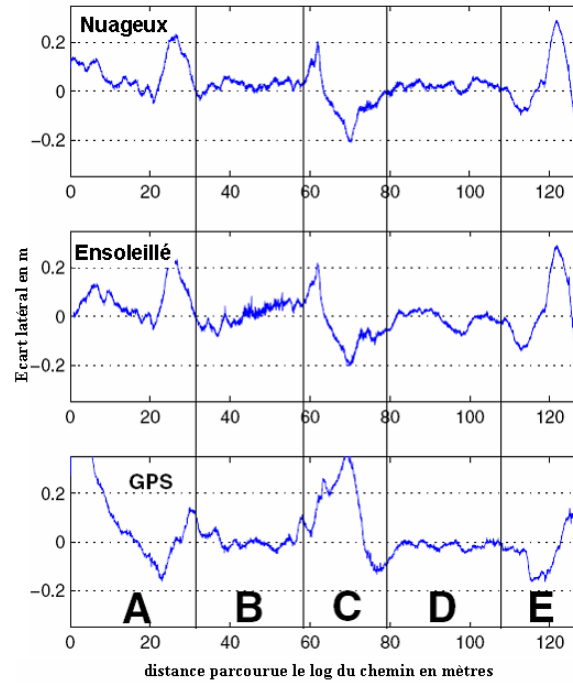


FIG. 4.24 – Ecarts latéraux avec le chemin référence

Conditions	Ensoleillé		Nuageux		RTK-GPS
B	3.5 cm	4.8 cm	3.4 cm	2.8 cm	2.7 cm
D	2.4 cm	1.9 cm	1.8 cm	2.3 cm	1.8 cm

TAB. 4.5 – Ecarts-type des erreurs latérales en ligne droite

Conditions	Ensoleillé		Nuageux		RTK-GPS
C max	22.0 cm	26.8 cm	20.1 cm	20.4 cm	37.9 cm
C min	-20.2 cm	-25.4 cm	-22.2 cm	-21.1 cm	-14.3 cm
E max	29.1 cm	35.4 cm	30.0 cm	29.2 cm	13.9 cm
E min	-16.5 cm	-19.7 cm	-16.5 cm	-16.1 cm	-16.3 cm

TAB. 4.6 – Erreurs extrêmes en courbe

dans des conditions critiques : le soleil était bas. De ce fait, les images étaient seillées (voir Fig. 4.25) et les performances de localisation moindres. Par conséquent, les performances de la régulation sont inférieures (la plage d'erreurs est plus large : 52.2 cm pour la portion C et 55.1 cm pour la portion E, contre environ 42 cm pour les autres essais par vision).

Enfin, lors du virage C, la trajectoire est très proche de bâtiments, ce qui engendre

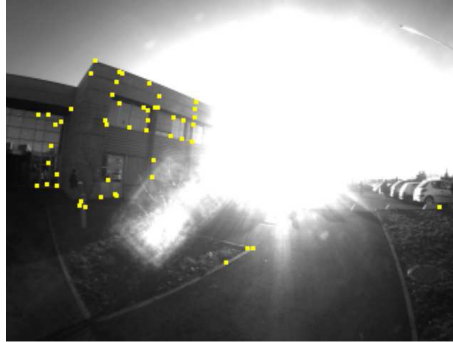


FIG. 4.25 – Exemple d’une acquisition vidéo surexposée

une dégradation des mesures GPS. Par conséquent, la régulation est altérée (erreur maximale de 37.9 cm).

Si ces quelques détails sont mis de côté, il est à constater comme attendu que pour une précision de localisation similaire, les performances de la régulation sont du même ordre. Les performances de la loi de commande latérale sont donc bien indépendantes de la technologie du capteur choisi pour le retour d’état.

4.2.1.5 Synthèse

Les performances latérales ont été évaluées et montrent une précision de quelques centimètres en ligne droite et de l’ordre du décimètre en virage, indépendamment de la vitesse de fonctionnement et du capteur utilisé. Enfin, les distances d’établissement observées correspondent bien à celles fixées par les gains.

4.2.2 Performances longitudinales

4.2.2.1 Convoi à 2 véhicules

Dans cette section, des expérimentations de conduite en convoi avec 2 véhicules sont reportées. Les performances longitudinales sont tout d’abord testées en conditions standards (le leader ne présente pas de brusques accélérations et les conditions initiales sont telles que l’écart longitudinal est proche de la consigne). Puis, l’accrochage d’un véhicule derrière le leader est étudié, via deux expérimentations. Enfin, le comportement du suiveur est analysé lorsque le leader stoppe brutalement.

Il est à remarquer que le terme σ n’a ici pas d’influence puisque le convoi n’est composé que de 2 véhicules.

En conditions standards

Les gains de la loi de commande latérale sont définis comme précédemment pour imposer une distance d’établissement de 15 m . Les paramètres de la loi longitudinale

ont pour leur part été réglés comme suit : l'inter-distance curviligne de consigne est $d = 8.0 \text{ m}$. Le gain longitudinal maximal est $k_{max} = 0.6$. Enfin, les paramètres liés au confort et à la sécurité sont $a_{conf} = 1.0 \text{ m/s}^2$ (donnée fournie d'après les études faites dans [123]), $v_{max} = 3.0 \text{ m/s}$ et la distance de sécurité $d_s = 3.0 \text{ m}$.

Dans l'expérimentation, les conditions initiales sont fixées pour que les deux véhicules soient proches des consignes désirées. La représentation de l'écart longitudinal entre les véhicules est donnée sur la figure 4.26, et les vitesses sont fournies sur la figure 4.27.

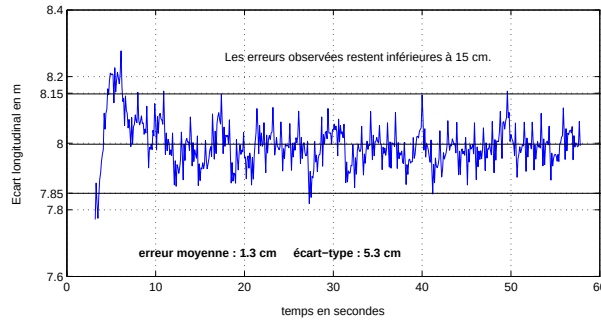


FIG. 4.26 – Ecart longitudinal

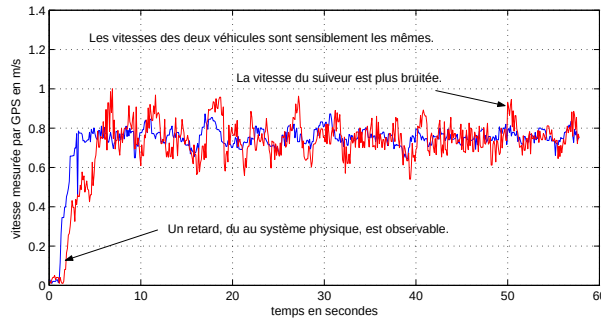


FIG. 4.27 – Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS

Les performances longitudinales, observées sur la figure Fig.4.26, sont satisfaisantes : erreur maximale de 15 cm , valeur moyenne quasi-nulle 1.3 cm et écart-type de 5.3 cm .

Cependant, il faut relever que les vitesses mesurées par capteur GPS (figure Fig. 4.27) montrent que la vitesse du suiveur est nettement plus bruitée que celle du leader. Ce résultat était assez naturel : en effet, le calcul de la vitesse longitudinale est fonction de plusieurs variables, dont la vitesse du leader (mais aussi la courbure du chemin de référence, les écarts latéraux), et si ces données sont bruitées, la commande à appliquer le sera également. Pour corriger ce problème, il faudrait éliminer les bruits sur les variables d'entrée de la commande longitudinale. Les travaux de recherche en reconstruction et fusion de données offrent une voie pour résoudre ces difficultés. Au LASMEA, l'équipe PERSYST (SYSTème de PERception), contribue activement dans

le domaine (par exemple, un filtre de Kalman évolué est présenté dans [64], l'article [57] traite de la localisation collective d'un groupe de robots mobiles). L'implantation de leurs travaux permettrait très certainement de réduire le bruit sur la vitesse du suiveur.

Départ avec une erreur longitudinale importante

Les deux essais suivants concernent principalement l'accrochage de véhicules. Mais ils permettent également de vérifier qu'une fois le véhicule accroché au leader, les performances longitudinales restent similaires à celles présentées précédemment.

Dans le premier essai, les véhicules sont disposés avec un écart longitudinal initial très grand (18 m). L'écart longitudinal, les vitesses et le gain longitudinal peuvent être observés respectivement sur les figures Fig. 4.28, Fig. 4.29 et Fig. 4.30.

Fort logiquement, l'écart longitudinal tend vers la consigne désirée. Néanmoins, une augmentation de l'erreur peut être observée en début d'expérimentation. Celle-ci s'explique par le fait que le leader du convoi a déjà atteint sa vitesse maximale de fonctionnement, lorsque le suiveur démarre. De ce fait, jusqu'à ce que le suiveur atteigne la vitesse du leader (et la dépasse, comme l'écart inter-véhicules est supérieure à la consigne), l'erreur longitudinale augmente.

De plus, la convergence n'est pas trop rapide : grâce aux limitations en accélération et en vitesse, le véhicule suiveur reste dans les plages de fonctionnement définies. L'évolution des vitesses sur la figure 4.29, en parallèle avec le gain adaptatif sur la figure 4.30, indique clairement que le gain s'adapte à la distance entre Cycabs pour limiter la commande en vitesse. En effet, le gain, initialement faible, atteint sa valeur maximale k_{max} lorsque la consigne de régulation est presque atteinte.

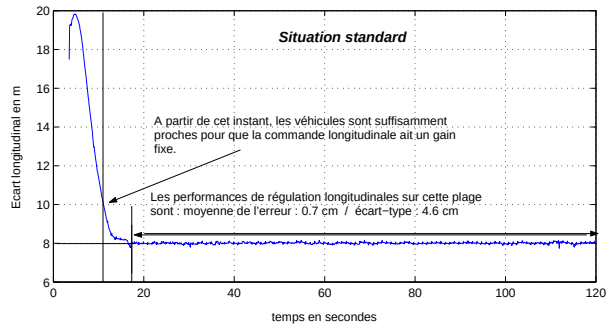


FIG. 4.28 – Ecart longitudinal

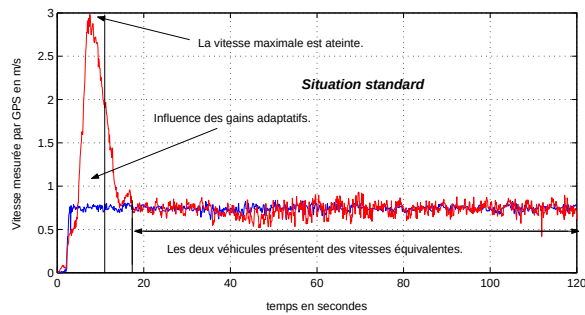


FIG. 4.29 – Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS

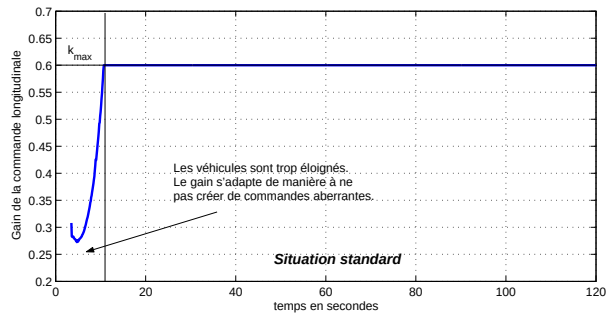


FIG. 4.30 – Gain adaptatif

La deuxième expérimentation prouve également le confort de l'accrochage. Le véhicule suiveur est placé quelques mètres à côté du chemin de référence devant le leader (afin d'éviter une collision). Ainsi, il est logique d'observer initialement un écart longitudinal négatif (puisque le leader est derrière le suiveur).

De même que précédemment, l'écart inter-véhicule tend progressivement et confortablement vers la consigne (Fig. 4.31). Enfin, le gain longitudinal, illustré par la figure 4.32, s'adapte également en fonction de l'erreur longitudinale.

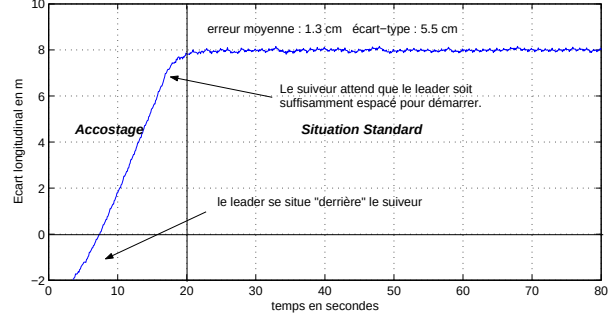


FIG. 4.31 – Ecart longitudinal

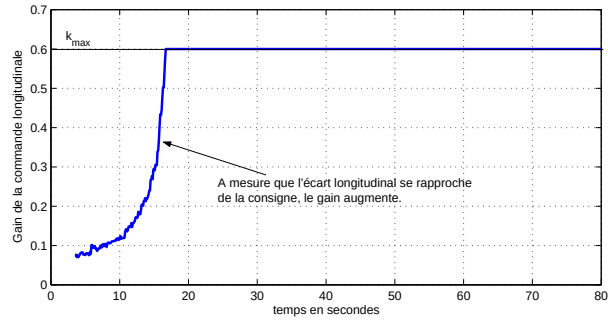


FIG. 4.32 – Gain adaptatif

Gestion de l'arrêt brutal du leader

Le comportement du suiveur, en cas de brusque arrêt du leader, est maintenant analysé. Pour ces expérimentations, le convoi est d'abord placé dans les conditions standards : l'écart longitudinal est correctement régulé. Les deux véhicules ont alors la même vitesse, et la distance les séparant est celle attendue. Le leader stoppe alors brutalement (décélération de l'ordre de 10 m/s^2), et la réaction du véhicule suiveur est analysée. En théorie, celui-ci ne doit pas être à une distance inférieure à d_s du leader et si possible, son accélération ne doit pas dépasser la plage de fonctionnement fixée par a_{conf} . Afin de tester ces performances, la distance de sécurité est choisie plus importante $d_s = 6.50 \text{ m}$, de manière à augmenter artificiellement les risques de collision. Enfin, le retard t_h utilisé pour le calcul de d_{arret} (équation (3.1)) est volontairement surestimé (pour éviter d'éventuels retards inattendus), et est fixé à $t_h = 0.5 \text{ s}$.

Pour la première expérimentation, une vitesse de 1.4 m/s est appliquée sur le leader. A $t = 30.5 \text{ s}$, le leader est stoppé brutalement. A ce moment, la prédiction de la distance d'arrêt est $d_{arret} = 1.68 \text{ m}$, d'après la formule (3.1). Comme l'écart inter-véhicules courant est de 8.0 m et d_s est fixé à 6.50 m , des risques de collision sont

susceptibles de survenir. Une décélération d'urgence $-a_{urg}$ est alors calculée à partir de (3.3) : $-a_{urg} = -1.225 \text{ m/s}^2$. Grâce à celle-ci (évolution de la vitesse visible sur la figure 4.34), l'écart longitudinal observé sur la figure 4.33 reste bien supérieur à d_s .

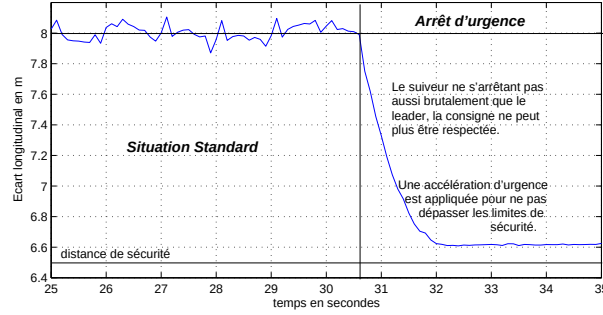


FIG. 4.33 – Ecart longitudinal

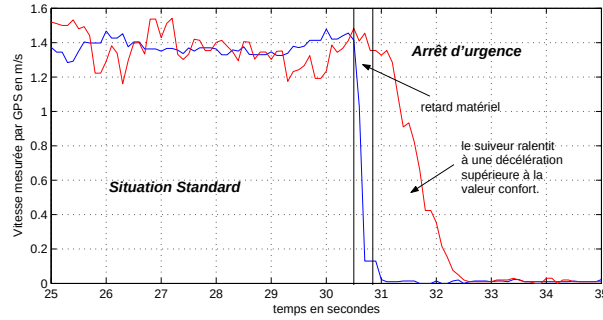


FIG. 4.34 – Vitesses des véhicules du convoi mesurées par GPS

Durant la phase d'arrêt du suiveur, l'allure de l'évolution de l'erreur longitudinale est parabolique (Fig. 4.33), ce qui signifie que la vitesse évolue linéairement (Fig. 4.34), donc l'accélération appliquée est constante, comme attendu.

Enfin, l'observation de la figure 4.34 permet d'évaluer le retard physique réel. Celui-ci vaut approximativement 400 ms . Or, comme le retard a été évalué à $t_h = 500 \text{ ms}$, le véhicule suiveur ne s'arrête pas à 6.50 m , mais à 6.62 m , comme l'indique la figure 4.33 (soit une différence égale approximativement à la distance parcourue par le véhicule suiveur en 100 ms). Néanmoins, la sécurité est assurée car cet écart est supérieur à d_s .

La sécurité (écart supérieur à la distance de sécurité d_s) est privilégiée au détriment du confort (décélération appliquée inférieure à $-a_{conf}$) et des performances de régulation (écart à l'arrêt inférieur à d).

Dans la seconde expérimentation, la vitesse du véhicule de tête est réduite à 0.8 m/s , de sorte que le test de sécurité ne prédit cette fois aucun risque de collision. Lorsque le

véhicule de tête stoppe brutalement à $t = 135.5 \text{ s}$, la distance d'arrêt est $d_{\text{arrêt}} = 0.72 \text{ m}$. Le suiveur peut donc s'arrêter avec une décélération confort de $-a_{\text{conf}}$.

La figure 4.35 confirme cette décélération constante (évolution parabolique). De plus, la phase d'arrêt dure 0.8 s , soit le temps nécessaire pour que le Cycab, initialement à 0.8 m/s , atteigne une vitesse nulle avec une accélération de -1.0 m/s^2 . Le retard t_h étant légèrement plus important que celui réellement observé, l'écart final est de 7.33 m , alors que la prédiction était de 7.28 m . Le confort a été privilégié devant les performances de régulation longitudinale.

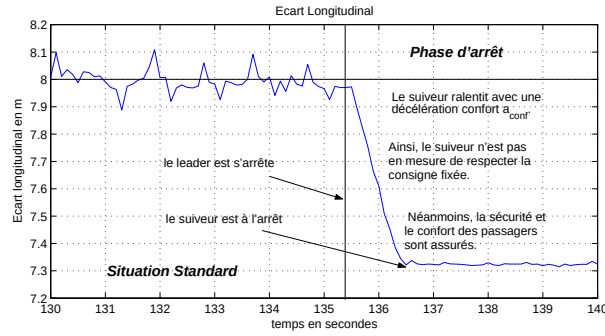


FIG. 4.35 – Ecart longitudinal

4.2.2.2 Convoi à 3 véhicules

Dans les expérimentations précédentes, qui ne comportaient que 2 véhicules, la loi de commande globale était en fait réduite à une commande de proche-en-proche (puisque le véhicule précédent était aussi le véhicule leader). Pour mettre en œuvre l'intégralité de la loi de commande globale, des expérimentations de conduite en convoi à 3 véhicules ont été réalisées.

Pour cela, sept scénarii ont été dressés. Les cinq premiers visent à valider la formation du convoi. Les deux derniers éprouvent les performances du convoi en situations anormales : une panne est simulée par l'arrêt brutal d'un élément au sein du convoi. Durant ces expérimentations, les paramètres de la commande longitudinale sont une consigne d'inter-distance $d = 5.0 \text{ m}$, une distance de sécurité $d_s = 3.0 \text{ m}$ et enfin une dynamique de commutation a égale à 4. Les paramètres de la commande latérale demeurent inchangées. Le chemin de référence reste identique durant les 7 expérimentation. Il est représenté sur la figure 4.36.

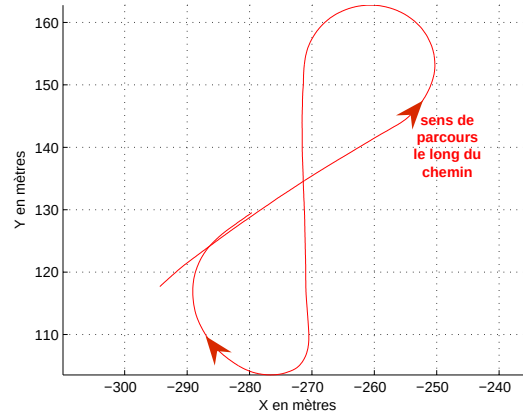


FIG. 4.36 – Chemin de référence

Scénario A : Départ convoi formé

Ce scénario de base représente les conditions initiales idéales pour le convoi : d'une part, l'inter-distance entre les trois Cycabs est initialement très proche de la consigne longitudinale (l'état initial du convoi le long du chemin de référence est donné sur la figure 4.37), et d'autre part le véhicule de tête fonctionne à vitesse constante tout au long de l'expérimentation. La commande longitudinale est ainsi éprouvée dans les meilleures conditions.

L'observation des performances longitudinales sur la figure 4.38 témoigne du bon comportement de la régulation inter-véhicules. L'écart-type sur les erreurs longitudinales est du même ordre que celui sur les capteurs (voir tableau Tab. 4.7).

De plus, les erreurs longitudinales entre les véhicules 1 et 2 et entre les véhicules 2 et 3 sont de même grandeur : comme attendu, il n'y a pas d'accumulation d'erreurs. En effet, la régulation étant correctement assurée (écarts longitudinaux proches de la consigne), les risques de collision sont écartés. De ce fait, la commande globale est référencée sur le leader. L'observation du paramètre σ constamment égal à 1 (Fig. 4.40) confirme ce comportement. Ceci est très encourageant pour les expérimentations sur de plus longs convois. Enfin, les commandes en vitesse sont logiquement similaires sur tous les véhicules (Fig. 4.39).

écarts entre	erreur moyenne en cm	écart-type en cm
les véhicules 1 et 2	1.4 cm	2.4 cm
les véhicules 2 et 3	0.2 cm	2.3 cm
les véhicules 1 et 3	1.8 cm	2.5 cm

TAB. 4.7 – Performances longitudinales - Scénario A

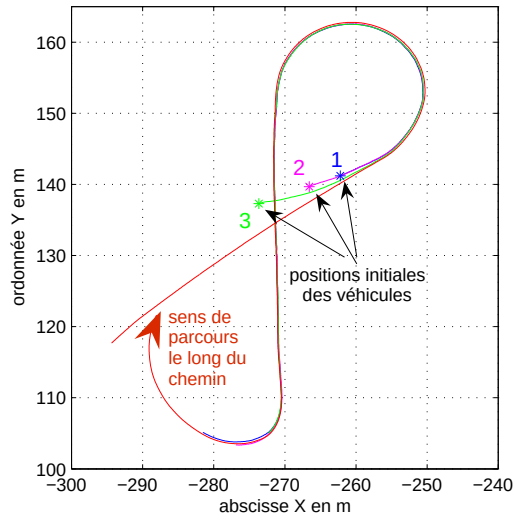


FIG. 4.37 – Configuration initiale - Scénario A

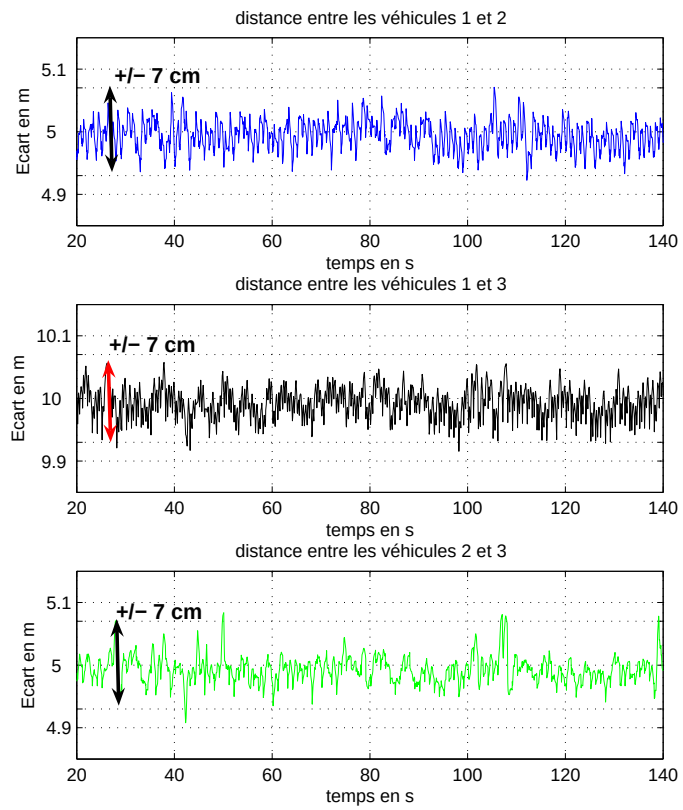


FIG. 4.38 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario A

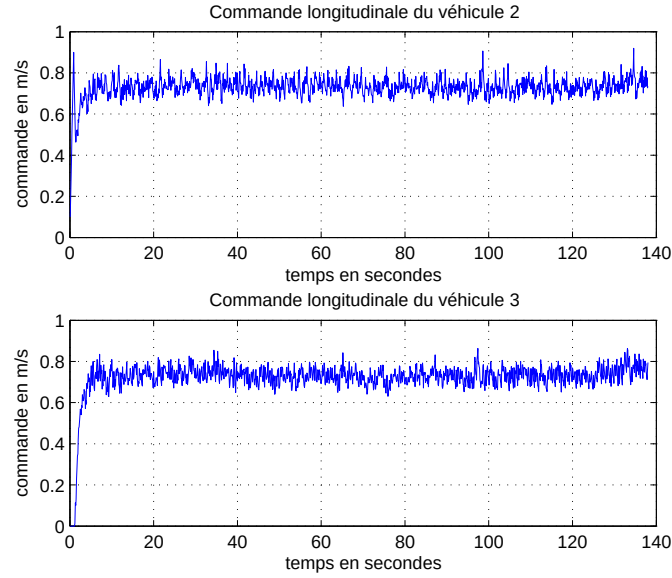
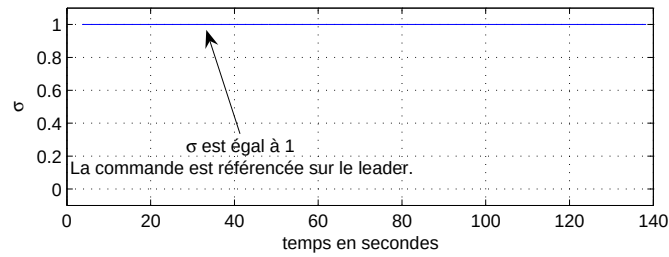


FIG. 4.39 – Commandes longitudinales appliquées aux véhicules - Scénario A

FIG. 4.40 – Evolution de σ - Scénario A

Scénario B : Grand écart initial entre les véhicules

Dans ce scénario, les véhicules formant le convoi sont correctement ordonnés, mais présentent un écart initial inter-véhicules relativement important comparé à la consigne. La vitesse du leader, comme précédemment, reste constante. L'objectif du scénario est ici de vérifier la bonne formation du convoi tout en limitant les fortes accélérations et vitesses.

La convergence des écarts inter-véhicules vers la consigne d est correctement assurée, comme le montre la figure 4.41. Les plages d'accélération et de vitesse fixées pour les véhicules, à savoir une accélération inférieure à 1 m/s^2 ($a_i < 1 \text{ m/s}^2$) et une vitesse v_i telle que $0 \leq v_i \leq 4 \text{ m/s}$, sont respectées, comme montré sur la figure 4.42.

Enfin, comme l'écart entre les véhicules 2 et 3 reste supérieur ou égal à la consigne

d , la sécurité est toujours assurée, et la commande globale est référencée sur le leader ($\sigma = 1$, Fig. 4.43).

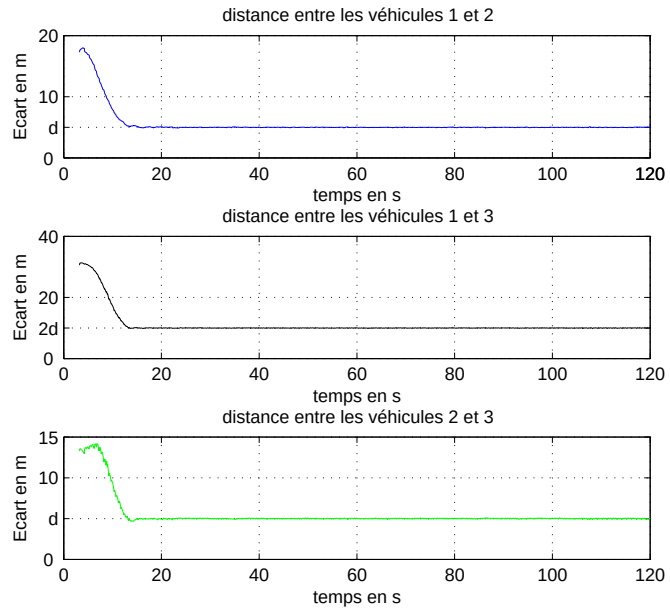


FIG. 4.41 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario B

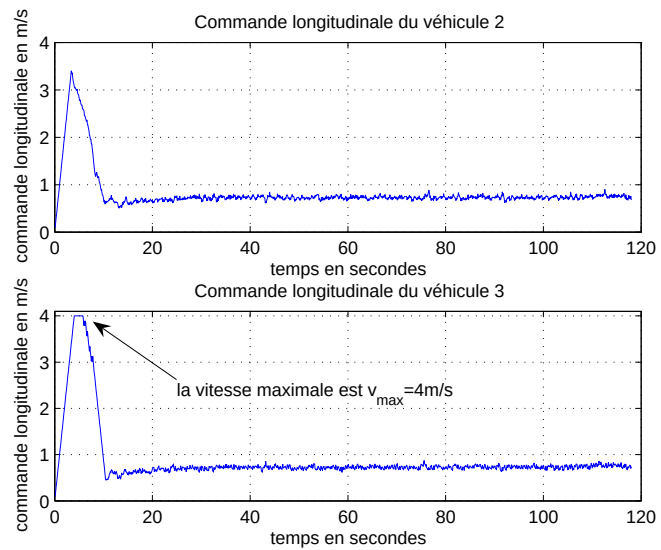
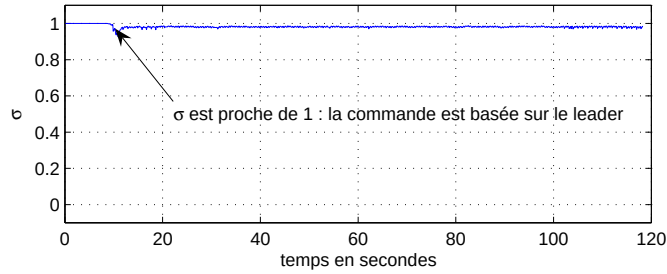


FIG. 4.42 – Commandes longitudinales appliquées - Scénario B

FIG. 4.43 – Evolution de σ - Scénario B

Scénario C : Faible écart initial entre les véhicules

Les véhicules sont cette fois initialement trop rapprochés. Une telle configuration se rencontre notamment lors du redémarrage après un arrêt brutal du leader. Ce scénario permet de valider la sécurité du convoi via la commutation progressive de la commande globale depuis une commande proche-en-proche vers une commande référencée leader.

Comme les véhicules 2 et 3 sont initialement trop proches l'un de l'autre, la commande du troisième Cycab est initialement une commande locale : le véhicule 3 s'asservit sur le véhicule 2. Le troisième véhicule attend donc que le deuxième soit suffisamment éloigné pour démarrer (Fig. 4.45). Lorsque l'inter-distance entre les deux derniers véhicules augmente pour atteindre la consigne désirée (Fig. 4.44), l'asservissement est progressivement réalisé en se référençant par rapport au leader. L'observation de σ sur la figure 4.46 confirme ce comportement.

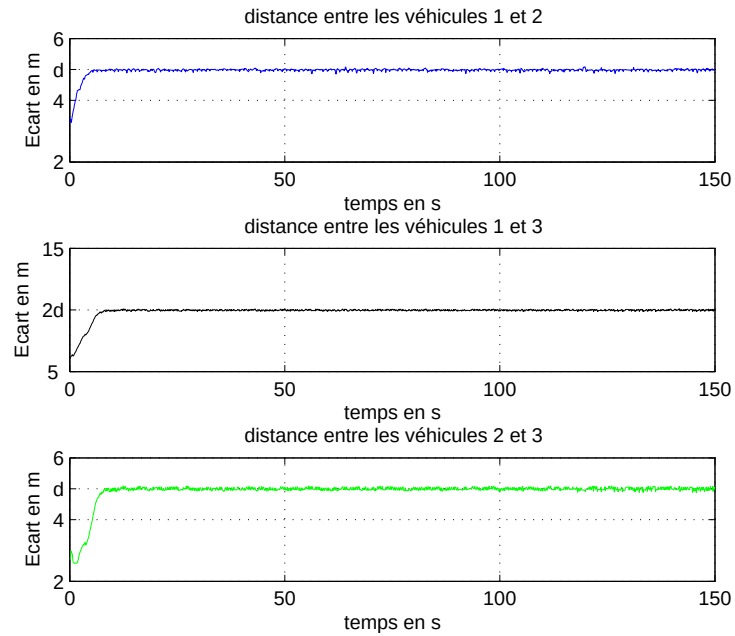


FIG. 4.44 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario C

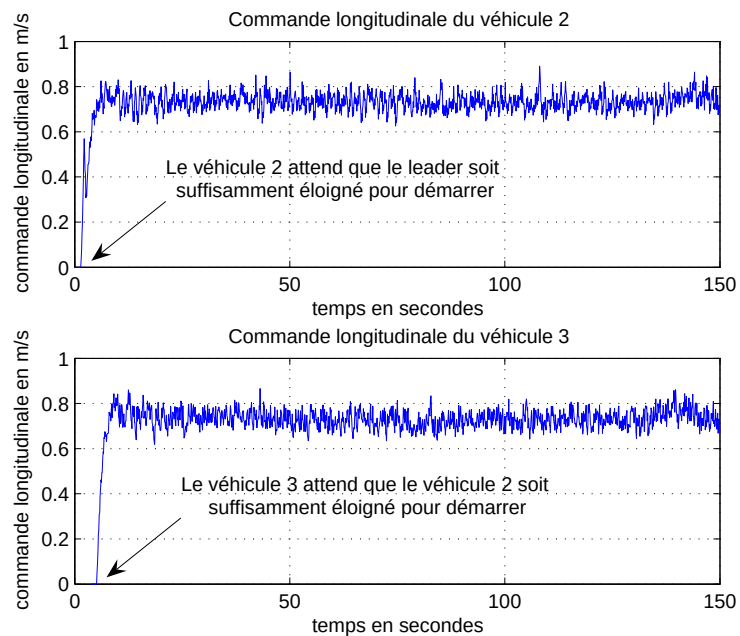
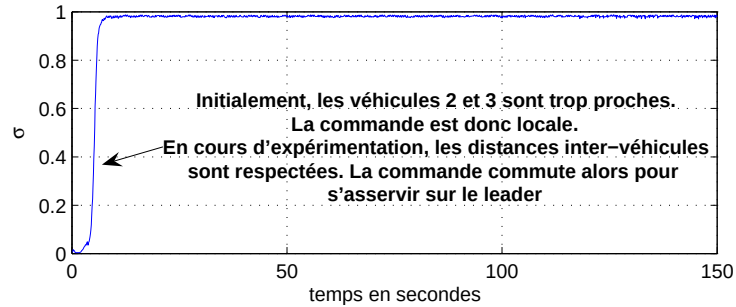


FIG. 4.45 – Commandes longitudinales appliquées - Scénario C

FIG. 4.46 – Evolution de σ - Scénario C

Scénario D : Convoi initialisé en ordre inversé

Dans cette configuration initiale, les Cycabs sont situés dans l'ordre opposé à leur position dans le convoi. Ainsi, le leader est initialement en queue de peloton, puis le deuxième Cycab est placé, enfin le troisième Cycab est disposé en "tête" de peloton. C'est pourquoi, les erreurs longitudinales observées initialement sur la figure 4.47 sont négatives. Ce type de scénario peut se rencontrer dans le cadre d'applications de ramassage de véhicules : un véhicule, conduit manuellement, passe dans le voisinage de véhicules parkés. Au fur et à mesure, ceux-ci viennent se fixer en queue de peloton. L'objectif de ce scénario consiste à valider les performances longitudinales du convoi avec des erreurs inter-véhicules initiales négatives. Il est à noter que tous les véhicules, à l'exception du leader, doivent observer à l'instant initial une erreur latérale assez grande pour pouvoir laisser passer les Cycabs précédents sur le chemin de référence sans risquer de les percuter.

Au démarrage, le leader avance le long du chemin de référence. Tant que le leader reste positionné derrière le deuxième Cycab, celui-ci demeure à l'arrêt (Fig. 4.48), puis il s'asservit sur le véhicule de tête. L'écart longitudinal entre les deuxième et troisième véhicules étant négatif, la commande longitudinale imposée au troisième Cycab est locale (régulation de l'écart longitudinal avec le deuxième Cycab) : le troisième Cycab attend donc que le deuxième véhicule passe à proximité pour s'accrocher au convoi. La loi de commande globale régissant le dernier Cycab commute alors progressivement pour passer d'une commande locale à une commande référencée leader. La figure 4.49 montre la commutation de la commande longitudinale via le paramètre σ .

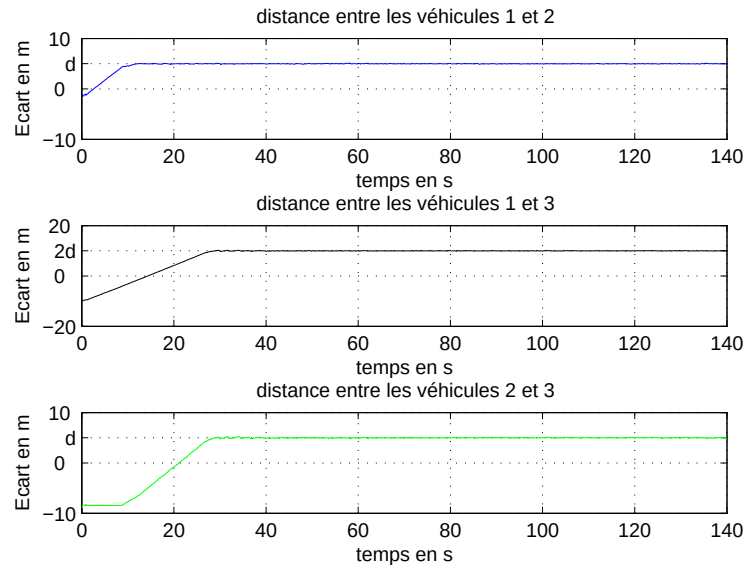


FIG. 4.47 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario D

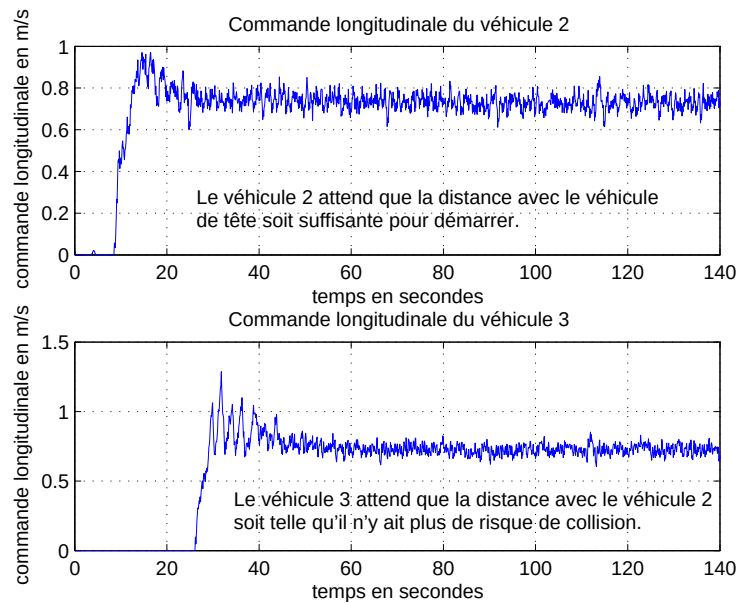
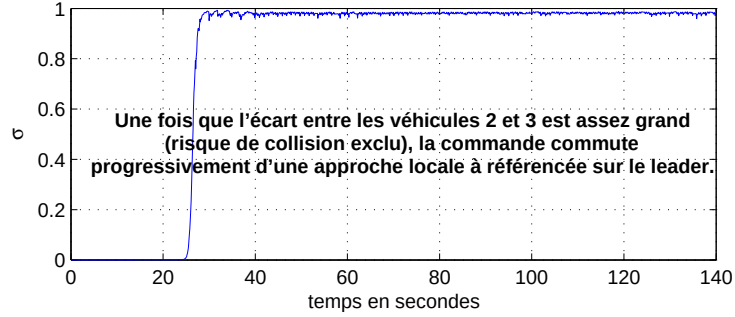


FIG. 4.48 – Commandes longitudinales appliquées - Scénario D

FIG. 4.49 – Evolution de σ - Scénario D

Scénario E : Insertion du deuxième Cycab

Au cours de ce scénario, le véhicule devant être placé en deuxième position est situé en avant le long du chemin de référence (avec un écart latéral suffisant pour éviter d'être heurté, Fig. 4.50). Le leader est disposé derrière le Cycab censé occuper la queue du convoi. C'est pourquoi, les écarts longitudinaux entre les véhicules 1 et 2 et entre 1 et 3, observables sur la figure 4.51, sont négatifs. Une fois que le leader dépasse le Cycab 3, ce dernier intègre le convoi. Comme la distance entre les deuxième et troisième véhicules est supérieure à la consigne, la commande globale du véhicule 3 est référencée sur le leader : il est vérifié en effet sur la figure 4.52 que σ est alors égal à 1. Une distance de deux fois la consigne longitudinale, c'est-à-dire 10 m, s'établit entre le véhicule 3 et le leader, comme montré sur la figure 4.51. Une fois que le convoi passe à proximité du véhicule devant prendre la deuxième position au sein du convoi, celui-ci démarre (voir Fig. 4.53) et s'asservit à 5 m du leader. L'écart de 10 m séparant les véhicules 1 et 3 reste pour sa part constant.

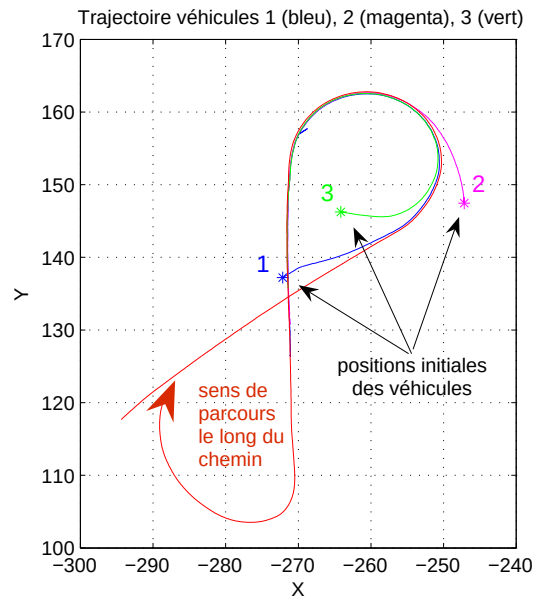


FIG. 4.50 – Configuration initiale - Scénario E

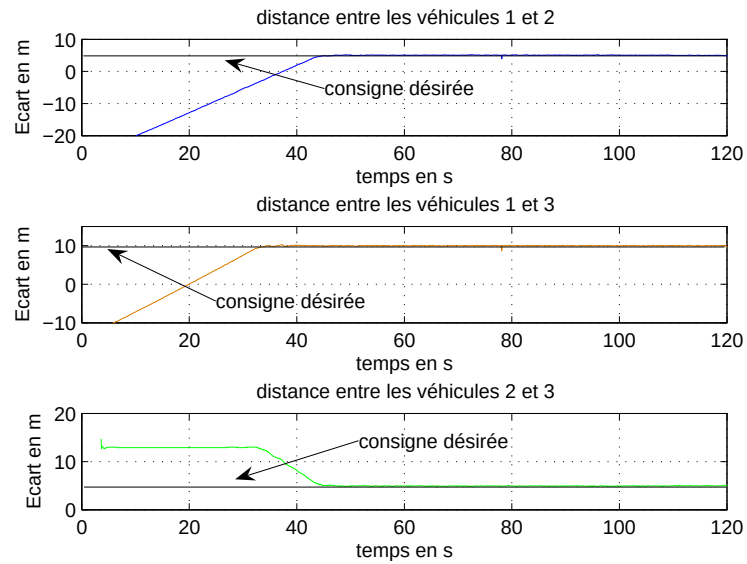


FIG. 4.51 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario E

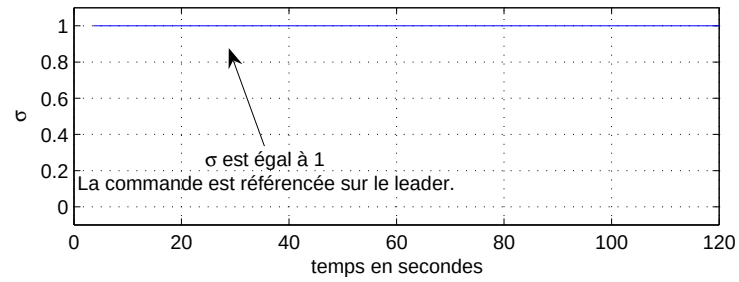
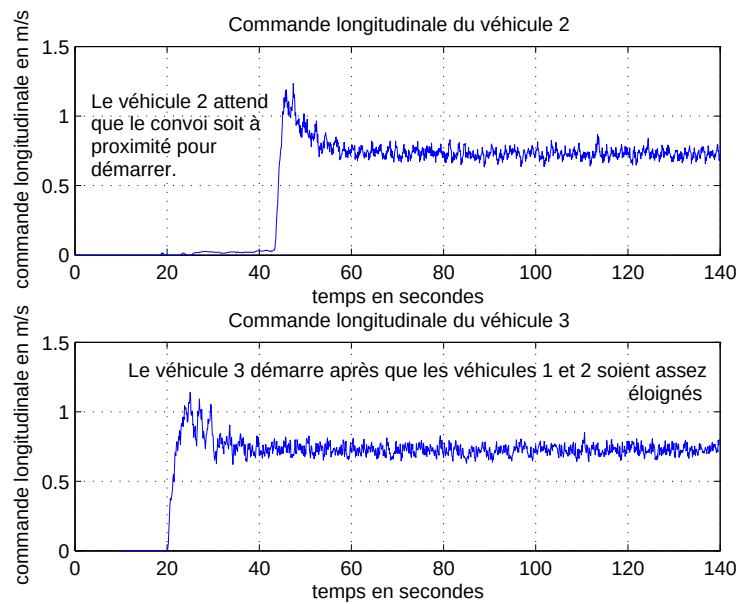
FIG. 4.52 – Evolution de σ - Scénario E

FIG. 4.53 – Commandes longitudinales appliquées - Scénario E

Scénario F : Arrêt brusque du leader

Dans ce scénario, l'état initial n'a aucune importance : le convoi est tout d'abord placé en conditions standards (inter-distances respectées et commande globale référencée sur le leader, Fig. 4.55), puis le leader stoppe brutalement. Un tel arrêt du leader peut survenir en cas de danger, par exemple, lors de la détection d'obstacles imprévisibles. Le confort et la sécurité des passagers sont alors évalués.

Après l'arrêt du leader, les Cycabs commencent une procédure d'arrêt différée (ce retard est dû aux différents délais matériels, voir Fig. 4.56). Un test de sécurité est réalisé pour chacun des deux véhicules. Pour cette expérimentation, ces derniers s'avèrent positifs : il n'y a pas de risque de collision. Les courbes de la figure 4.54 viennent corroborer ces tests. Les véhicules 2 et 3 décélèrent donc avec une décélération $-a_{conf} = -1 \text{ m/s}^2$ (Fig. 4.56). L'observation plus détaillée de la figure 4.54 laisse apparaître un écart longitudinal entre les véhicules 2 et 3 inférieur à la consigne d (4.92 m contre 5 m), alors qu'ils décélèrent de la même façon. Cette différence s'explique toujours par les délais de communication plus importants entre les véhicules 1 et 3 qu'entre les véhicules 2 et 3.

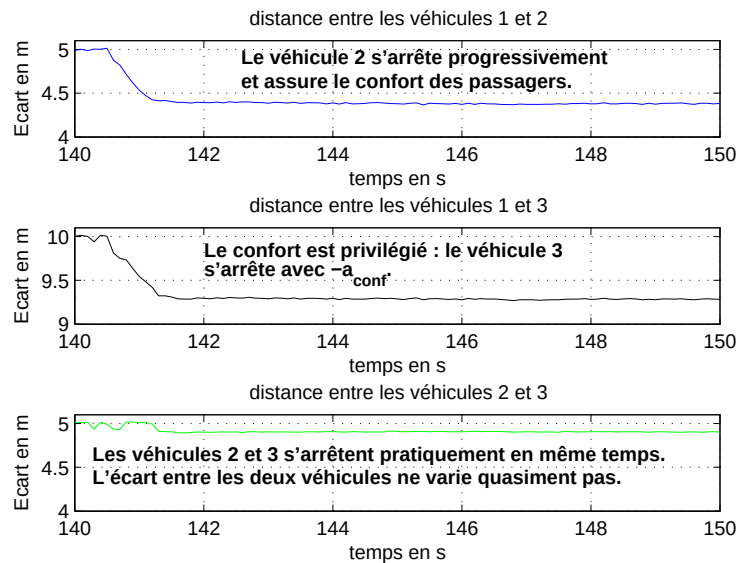


FIG. 4.54 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario F

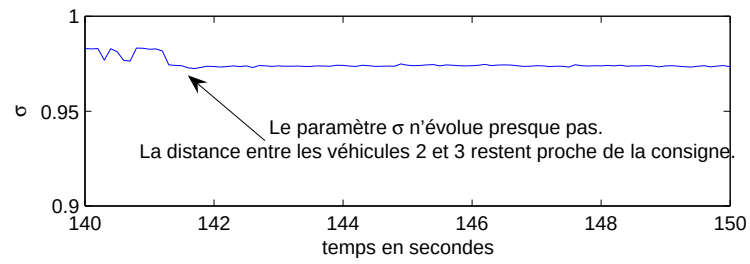
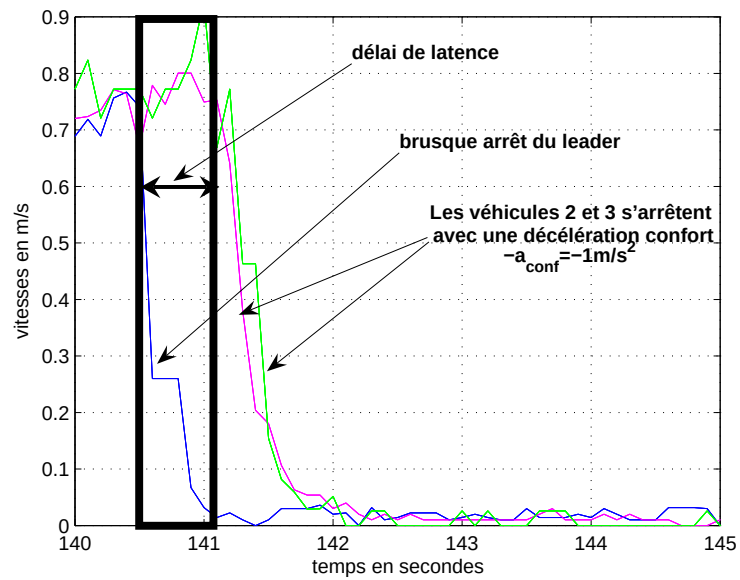
FIG. 4.55 – Evolution de σ - Scénario F

FIG. 4.56 – Vitesses mesurées par GPS - Scénario F

Scénario G : Arrêt brusque du deuxième Cycab

Ce scénario est très similaire au précédent. Simplement, c'est cette fois le second Cycab, et non le leader, qui stoppe brutalement, alors que le convoi était formé. Dans la pratique, une telle situation survient généralement en cas de panne subite ou bien en cas de détection d'obstacles mobiles.

Quelle que soit la configuration du convoi, le véhicule de tête continue son chemin à vitesse constante. C'est pourquoi, sur les courbes de la figure 4.57, les écarts entre le leader et chacun des deux autres Cycabs ne cessent de croître après l'arrêt du véhicule 2. Comme initialement la commande du véhicule 3 était référencée sur le leader, la distance entre les deuxième et troisième véhicules diminue constamment. La commande du troisième Cycab commute alors progressivement pour une approche locale (Fig. 4.58). Lorsque la distance entre les véhicules 2 et 3 est égale à la distance de sécurité $d_s = 3\text{ m}$, la commande est locale et le véhicule 3 s'arrête (Fig. 4.59).

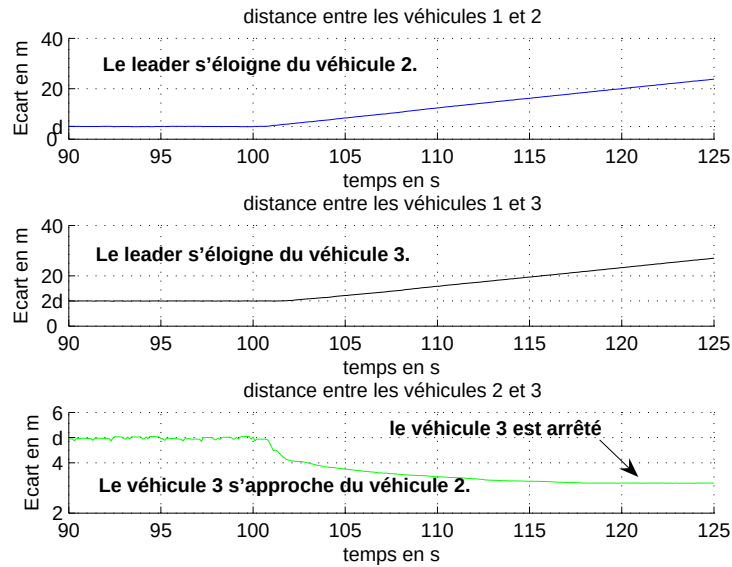


FIG. 4.57 – Evolution de l'écart longitudinal entre les véhicules - Scénario G

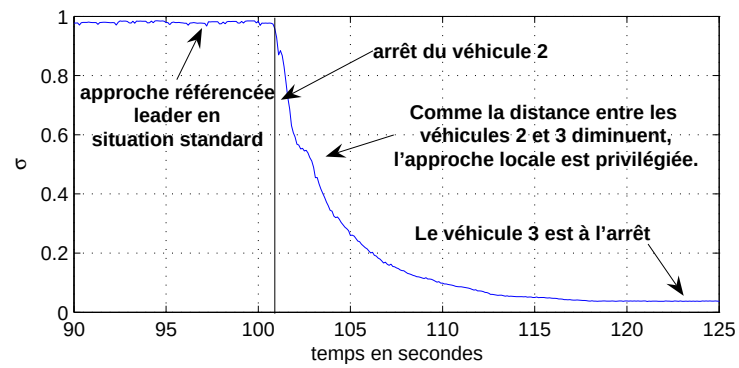
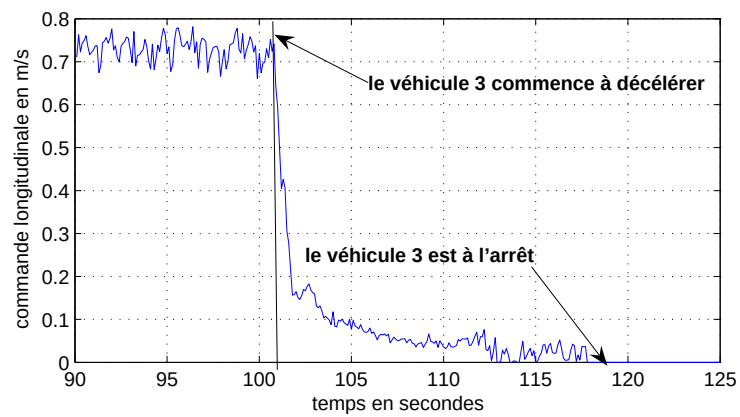
FIG. 4.58 – Evolution de σ - Scénario G

FIG. 4.59 – Commandes longitudinales appliquées - Scénario G

4.3 Bilan

Ce chapitre présente la validation expérimentale des performances des lois de commande pour la conduite en convoi, développées aux Chapitres II et III. Auparavant, le contexte expérimental, et les choix associés, ont été discutés. Le véhicule expérimental est une voiture électrique adaptée à la conduite en milieu urbain, couramment utilisée dans plusieurs laboratoires français. Cependant, les applications traitant du fonctionnement en convoi autonome sont peu nombreuses. De ce fait, aucune architecture dédiée à la conduite en convoi n'existait en l'état. Il a donc fallu développer une architecture spécifique, ce qui constitue une des contributions du chapitre.

Cette architecture présente cependant encore quelques limites. Ainsi, elle est en parfaite adéquation avec les commandes développées dans ce mémoire pour le convoi autonome, mais il n'en serait plus de même dans le cas où les commandes des robots nécessiteraient l'état d'autres véhicules que ceux utilisés actuellement (états du leader et du véhicule immédiatement devant). Une possibilité, commentée dans ce chapitre, serait de se tourner vers une centralisation des données : une unité centrale collecterait toutes les données émises par les différents membres du convoi, les traiterait et transmettrait au convoi les commandes à appliquer, comme illustré par le schéma Fig. 4.60.

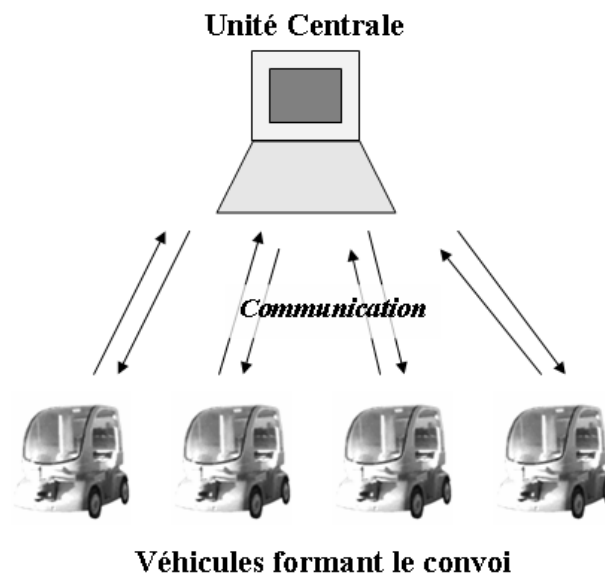


FIG. 4.60 – Architecture centralisée susceptible d'être adoptée

Ensuite, une fois la mise en œuvre réalisée, les expérimentations ont pu avoir lieu, et les résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre.

En premier lieu, les performances de la commande latérale ont été analysées. Pour cela, les expérimentations ont été conduites avec un seul véhicule.

En deuxième lieu, les performances longitudinales ont été considérées. Pour réaliser

les tests, la commande longitudinale a été implantée sur des convois de deux et trois Cycabs.

L'analyse de l'ensemble de ces expérimentations est bien conforme à l'ensemble des attentes :

- Grâce aux techniques de linéarisation exacte employées, la convergence des véhicules sur le chemin de référence est assurée, et ce quelles que soient les erreurs latérales initiales.
- De même, la régulation longitudinale est fidèle aux consignes données.
- Le confort et la sécurité du convoi sont également assurés, via le monitoring.
- Enfin, les performances latérales et longitudinales sont bien indépendantes les unes des autres.

Néanmoins, de légères différences entre les positions réelles et désirées subsistent. Ces erreurs peuvent s'expliquer par quelques phénomènes qui se cumulent. Ainsi, le retour d'état effectué par les capteurs demeure imparfait : il n'est pas possible d'éliminer l'ensemble des erreurs de mesure. Un autre phénomène concerne le comportement physique des actionneurs de la voiture. Ceux-ci ne sont pas en état de répondre instantanément : les délais de latence et la dynamique propre de l'actionneur ne permettent pas de tenir compte instantanément de brusques variations de consigne (par exemple : discontinuité de la courbure du chemin de référence, brusque accélération du véhicule précédent, etc.).

Dans le but de remédier à la première difficulté, une approche pourrait consister à équiper le convoi de systèmes de perception supplémentaires. Ensuite, la fusion des données reçues permettrait de localiser plus précisément les véhicules à une fréquence plus élevée. Concernant la seconde difficulté, le chemin de référence étant déjà connu par l'ensemble du peloton, une commande prédictive est dès lors envisageable pour améliorer les performances en suivi de chemin.

Conclusion

Au travers de ce manuscrit, il a été présenté une approche adressant la mise en œuvre d'un convoi autonome de véhicules urbains électriques. Pour concrétiser un tel système, une commande a d'abord été développée pour des conditions de fonctionnement standard. Ensuite, les performances de cette dernière ont été éprouvées par des simulations, puis par des expérimentations sur véhicules réels. Au cours de ces essais, le fonctionnement attendu a été perturbé par des situations critiques, négligées durant l'étude théorique. De nouveaux développements sont alors venus se greffer à la commande afin d'intégrer et corriger les comportements particuliers observés lors de situations critiques. Ainsi, la commande s'est successivement étoffée pour finalement s'adapter à différentes situations réelles susceptibles d'être rencontrées en pratique.

Dans cette conclusion, il est successivement rappelé les différentes contributions de la thèse, puis les résultats obtenus. Enfin, les limites et perspectives entrevues sont énoncées.

Apports personnels

D'un point de vue théorique, la stratégie de commande adoptée se démarque des approches couramment rencontrées en plusieurs points.

Même si la modélisation cinématique tricycle utilisée est l'une des plus communes dans la littérature, les commandes du convoi (latérale et longitudinale) sont quant à elles plus originales. Le modèle des véhicules étant non-linéaire, des difficultés se posent pour la synthèse des lois de commande. Afin de construire un contrôleur offrant les meilleures performances, il est nécessaire de se tourner vers les techniques de commande non-linéaire. En effet, les commandes basées sur le linéarisé tangent ne procurent des performances acceptables qu'à proximité de la configuration désirée. En dehors de ce voisinage, la modélisation du véhicule est erronée, les performances de régulation ne sont alors plus garanties.

Des techniques de commandes non-linéaires ont donc été envisagées. L'expérience acquise par le laboratoire a conduit à proposer des techniques de linéarisation exacte pour traiter ce problème. Cette approche consiste à transformer de manière exacte un modèle non-linéaire en un modèle linéaire, dans lequel la synthèse d'un contrôleur peut s'appuyer sur les outils classiques de l'automatique linéaire. De cette façon, le réglage de la loi est plus explicite.

Ainsi, la loi de commande latérale est basée sur une transformation linéaire exacte : la transformation chaînée. Une loi de commande virtuelle est alors générée sur la base de ce modèle linéaire exact. Ensuite, la transformation inverse permet de ré-exprimer la commande dans l'espace réel. Une propriété de la transformation chaînée, essentielle dans l'optique de la conduite en convoi, est qu'elle permet un découplage exact entre les commandes latérale et longitudinale. Ce découplage assure des performances latérales indépendantes de la vitesse de fonctionnement des véhicules. Celles-ci sont ainsi exprimées en fonction de la distance curviligne parcourue par le véhicule le long du chemin de référence. De cette manière, chaque véhicule s'asservit sur le chemin de référence indépendamment de sa vitesse d'avancement, et donc du comportement des autres membres du convoi. Plus de détails peuvent être trouvés dans [121].

Par conséquent, la vitesse reste un paramètre libre qui peut alors être dévolu à la commande longitudinale. La loi de commande longitudinale synthétisée, présentée dans [15], a pour objectif la régulation d'un écart constant entre les membres du convoi. Cette consigne longitudinale pouvait s'exprimer de différentes manières. Dans ces travaux, la consigne de régulation consiste à maintenir une distance inter-véhicules constante, non pas cartésienne, mais exprimée en fonction de la distance parcourue par les véhicules le long du chemin de référence. La distance cartésienne a en effet pour inconvénient de représenter la distance la plus courte entre véhicules, ce qui pose problème pour la régulation longitudinale sur des trajectoires courbes, tandis que le maintien d'un écart curviligne constant entre les véhicules assure un comportement cohérent, y compris lorsque le peloton s'asservit sur des chemins à forte courbure. C'est donc ce second objectif qui a été retenu.

Ensuite, une autre particularité de la commande longitudinale présentée ici est que chaque robot du convoi ne tient pas seulement compte du véhicule le précédant immédiatement : une consigne longitudinale, s'adaptant à la configuration du convoi, a été introduite de manière à considérer également l'état du véhicule de tête. Plus précisément, une fois le convoi formé, s'il ne rencontre aucune difficulté, alors chacun des membres du convoi s'asservit par rapport au véhicule de tête. L'écart curviligne entre chaque véhicule du convoi et le leader est ainsi explicitement contrôlé. De cette façon, les accumulations d'erreur, typiquement observées dans les accrochages immatériels de proche en proche, sont éliminées. Les performances longitudinales des véhicules de queue de peloton restent tout aussi satisfaisantes que celles de la tête du convoi. Cependant, afin de prendre en compte les risques de collision, l'écart avec le véhicule précédent est constamment observé. Lorsqu'un risque potentiel est détecté, une transition entre le guidage basé sur la tête du convoi et un guidage local réalisé sur le véhicule précédent est effectuée de manière souple et continue, assurant ainsi confort et sécurité. Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans [14].

Enfin, un module de supervision "Monitoring" a été proposé pour gérer les situations anormales. Cette unité de surveillance impose aux véhicules des accélérations / décélérations les plus confortables possibles pour les passagers, dans la limite que la sécurité est assurée. De plus, des manœuvres de base, permettant d'insérer ou de reti-

rer des véhicules dans le convoi, ont également été prises en charge par ce module et donnent un aperçu de l'ensemble des fonctionnalités susceptibles d'être intégrées.

Sur un plan plus pratique, une architecture informatique dédiée au convoi a été développée. Elle se base sur une structure décentralisée, où chacun des véhicules communique avec le véhicule le précédant, ainsi qu'avec le leader du convoi.

Résultats

Une grande partie des développements théoriques réalisés a pu être validée expérimentalement sur les Cycabs. Le système de localisation utilisé sur les véhicules était soit un capteur RTK-GPS, soit un système de vision. Les expérimentations menées sur un véhicule seul ou sur des convois formés de 2 ou 3 véhicules ont permis de valider les performances des lois de commande proposées.

Pour ce qui est de la loi de commande latérale, les expérimentations ont montré que la convergence vers le chemin de référence est assurée quelles que soient les configurations initiales (grâce à la linéarisation exacte). Il a été vérifié que la dynamique de convergence peut être réglée à volonté par les gains de la loi de commande. De plus, il a également été illustré que les performances latérales sont indépendantes de la vitesse d'avancement et de la technologie du capteur choisi pour le retour d'état.

Quant à la loi de commande longitudinale, les performances ont été validées, d'une part en conditions standards, et d'autre part en situations dangereuses. Les essais ont prouvé la bonne régulation des distances inter-véhicules en situations ordinaires. De plus, en cas de danger, la sécurité des passagers est privilégiée, au détriment du maintien de l'inter-distance, en assurant si possible le confort des passagers. Toujours, dans le but d'éprouver la loi de guidage longitudinal, des simulations sur des convois plus longs (convois à 10 véhicules) ont validé le bon comportement de la commande longitudinale globale.

Limites et perspectives

Evidemment, les travaux présentés ne constituent qu'une étape à la mise en œuvre définitive d'un convoi autonome de véhicules. En effet, l'analyse détaillée des expérimentations soulève quelques lacunes. Ainsi, plusieurs types de développements peuvent encore être effectués.

Il serait par exemple possible de compléter la commande longitudinale en y intégrant de nouvelles informations en provenance d'autres véhicules que le leader et le véhicule précédent. L'exploitation des informations transmises par l'ensemble des véhicules du convoi permettrait de fiabiliser encore plus le comportement général du convoi, et permettrait d'apporter un comportement adéquat dans certaines situations singulières.

Par exemple, si le scénario considéré est celui où tous les éléments formant le peloton sont éparpillés autour du chemin de référence dans un ordre arbitraire (situa-

tion qui peut se rencontrer à l'initialisation, lors de la formation du convoi), il est logique qu'avant de s'asservir sur le chemin, chaque robot mobile doive attendre que les véhicules devant le précéder au sein du convoi soient devant lui. Concrètement, le véhicule devant être placé en 5^{ème} position dans le convoi, doit s'assurer que les quatre premiers éléments du convoi soient effectivement placés en amont. Cependant, les communications actuelles avec le premier et le quatrième véhicule n'offrent aucune indication au cinquième véhicule sur la position des deuxième et troisième engins. Ces risques de télescopage doivent être analysés et traités, ce qui passe nécessairement par la prise en compte de l'intégralité de la configuration du convoi.

Même en dehors des situations exceptionnelles, la communication globale entre tous les membres du convoi peut également être d'une grande utilité pour la commande : la mise en place d'une communication globale permettrait d'accroître le confort et la sécurité dans le fonctionnement en convoi. En effet, dans le cas où un véhicule viendrait à s'arrêter brutalement, tous les véhicules pourraient réagir instantanément, alors qu'actuellement, chaque véhicule découvre le phénomène en cascade via le comportement du véhicule précédent. De plus, une commande prenant en compte l'ensemble des véhicules du convoi pourrait préparer plus efficacement les procédures d'insertion ou de désinsertion au sein du convoi.

Pour adresser cela, une modélisation de l'évolution du convoi dans son ensemble serait judicieuse. Cette représentation du peloton offrirait ensuite des facilités pour la synthèse de lois de commandes gérant l'interaction entre véhicules. Par exemple, il a été montré dans la littérature que les systèmes multi-corps rigides (i.e. un véhicule tractant plusieurs remorques) sont chaînables [103]. Cette propriété est très intéressante, car la synthèse de la loi de commande est ensuite facilitée. Or, les systèmes multi-corps sont très proches du convoi. Une possibilité consisterait à modéliser le convoi en cherchant à se rapprocher des modèles proposés pour les systèmes multi-corps. Il faudrait voir comment les liaisons entre véhicules, qui ne sont rigides, mais élastiques et commandées (au travers des vitesse et direction contrôlées par chaque véhicule), pourraient être décrites par des modèles qui resteraient semblables à ceux des systèmes multi-corps.

Une fois la modélisation accomplie, une loi de commande longitudinale tenant compte du comportement des différents éléments du convoi, pourrait alors être recherchée afin de respecter l'ensemble des objectifs que sont : la sécurité de tous les éléments du convoi, le confort des passagers et la régulation d'une distance adéquate entre les véhicules.

De la même manière, il serait intéressant que le module de supervision puisse aussi exploiter l'état de tous les véhicules du convoi. La connaissance de l'état de l'ensemble des véhicules formant le convoi permettrait de mettre en œuvre un système de supervision plus vaste, ceci toujours afin de préserver la sécurité du convoi tout en minimisant les désagréments subis par les passagers.

De plus, un tel développement sur la supervision du convoi autoriserait de nouvelles fonctionnalités. Actuellement, les commandes du peloton ne permettent que la formation du convoi, son fonctionnement standard, et l'insertion ou la désinsertion d'un véhicule. De nouvelles manœuvres, comme l'évitement d'obstacles, le parquage dans un

espace restreint, la fusion de deux convois en un seul, le changement de voies sur routes, etc., seraient les bienvenues et apporteraient une plus grande flexibilité, et surtout faciliteraient les opérations de maintenance pour les opérateurs qui exploiteraient des flottes de véhicules urbains. Le développement de telles opérations comporte deux difficultés principales :

- d’une part, la commande des véhicules autour de la vitesse nulle pose, sur un plan théorique, des difficultés importantes. Comme cela a été présenté à la section 1.3.2.3, les solutions théoriques actuellement proposées ne sont pas encore complètement satisfaisantes sur un plan pratique. Ainsi, des alternatives, ne traitant peut-être pas complètement le problème de la stabilisation sur un plan théorique, mais offrant globalement les comportements attendus en pratique, doivent être développées.
- d’autre part, les différentes transitions entre manœuvres doivent être les plus lisses possibles, aucune discontinuité de la commande ne doit avoir lieu lors de la commutation entre les lois de commande associées à chaque fonctionnalité. Pour réaliser au mieux ces tâches, l’apport de l’intelligence artificielle apparaît comme une possibilité à creuser.

Ensuite, en fonction des choix effectués (lois de commande, capteurs utilisés,...), l’architecture informatique à adopter devrait être rediscutée. Dans les travaux présentés, seuls deux types de communications étaient considérés (l’une de proche-en-proche et l’autre du leader vers l’ensemble des véhicules), ce qui avait conduit à se tourner vers une architecture décentralisée.

Cependant, les réflexions précédentes tendent à ce que le convoi dispose d’une communication globale entre tous ses éléments. Pour ce nouvel objectif, une architecture décentralisée apparaît inadaptée. D’autres types d’architecture doivent alors être envisagés : celles-ci peuvent être centralisées, voire mixtes (combinaison des approches centralisée et décentralisée). L’implantation de l’architecture la plus optimale (en fonction des choix réalisés) devrait être recherchée et validée sur des véhicules grandeur réelle.

Bibliographie

- [1] J. Ackermann, J. Guldner, W. Sienel, R. Steinhauser, and V. Utkin. Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 3(1) :132–143, March 1995.
- [2] J. Ackermann, W. Sienel, and T. Bunte. Automatic car steering using robust unilateral decoupling. In *International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety (AVCS 2004)*, Genoa (Italy), October 2004.
- [3] S. Adachi, T. Fujihira, and Y. Fujiwara. Automatic steering control system design utilizing a visual feedback approach. In *13th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2003)*, pages 1466–1471, Rotterdam (The Netherlands), August 2003.
- [4] L. Alexander and M. Donath. Differential GPS based control of a heavy vehicle. Final Report MN/RIC-2000-05, Department of Transportation, St. Paul, Minnesota (USA), January 1999.
- [5] J. E. Anderson. The design, operation and benefits of SkyWeb Express. Technical report, Taxi 2000 Corporation, Minneapolis, MI (USA), October 2004.
- [6] L. Andreone and M. Provera. Inter-vehicule communication and cooperative systems : local dynamic safety information distributed among the infrastructure and the vehicles as virtual sensors to enhance road safety. In *Special Session Inter-Vehicle Communication and Cooperative Systems 5th European ITS*, Hannover (Germany), June 2005.
- [7] T. Aono, K. Fujii, S. Hatsumoto, and T. Kamiya. Positioning of vehicle on undulating ground using GPS and dead reckoning. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '98)*, pages 3443–3448, Leuven (Belgium), May 1998.
- [8] M. Aso and T. Suzuki. Automated steering control for the Intelligent Multimode Transit System. In *Intelligent Vehicles Symposium 2000 (IV'2000)*, pages 590–595, Dearborn, MI (USA), October 2000.
- [9] H. S. Bae and J. C. Gerdes. Parameter estimation and command modification for longitudinal control of heavy vehicles. In *Proceedings of 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'2000)*, Ann Arbor Michigan (USA), August 2000.

- [10] H. S. Bae and J. C. Gerdes. Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS. In *Proceedings of IEEE, Intelligent Transportation System (ITS'2001)*, Oakland, CA (USA), August 2001.
- [11] L. C. Bento, U. Nunes, A. Mendes, and M. Parent. Path-tracking controller of a bi-steerable cybernetic car using fuzzy logic. In *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*, pages 1556–1561, Coimbra (Portugal), July 2003.
- [12] J. Bisson, F. Michaud, and D. Letourneau. Relative positioning of mobile robots using ultrasounds. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, pages 1783–1788, Las Vegas Nevada (USA), October 2003.
- [13] G. Blanc, Y. Mezouar, and P. Martinet. Indoor navigation of a wheeled mobile robot along visual routes. In *22nd Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '05)*, pages 3365–3370, Barcelona (Spain), April 2005.
- [14] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet. A global control strategy for urban vehicles platooning relying on nonlinear decoupling laws. In *22nd Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Edmonton (Canada), August 2005.
- [15] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet. Nonlinear control for urban vehicles platooning, relying upon a unique kinematic GPS. In *22nd Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '05)*, pages 4149–4154, Barcelona (Spain), April 2005.
- [16] R.W. Brockett. “*Asymptotic stability and feedback stabilization*”. In Brockett, Millmann & Sussmann, editor, *Differential geometric control theory*, pages 181–191. Birkäuser Boston, 1983.
- [17] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C. G. Lo Bianco, and A. Piazzzi. The ARGO autonomous vehicle’s vision and control systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 3(4) :409–441, 1999.
- [18] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C. G. Lo Bianco, and A. Piazzzi. Visual perception of obstacles and vehicles for platooning. *Proceedings of the 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems (IV'2000)*, 1(3) :164–176, 2000.
- [19] C. Bruns, B. Rech, and A. Lubke. Concept for improved allocation of communication resources in vehicular ad hoc networks. In *ITS 2005 : 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, Hannover (Germany), June 2005.
- [20] R. H. Byrne, C. T. Abdallah, and P. Dorato. Experimental results in robust lateral control of highway vehicles. *IEEE Control Systems*, pages 70–76, 1998.
- [21] M.E. Cannon, C. Basnayake, S. Crawford, S. Syed, and G. Lachapelle. Precise GPS sensor subsystem for vehicle platoon control. In *Conf. ION GPS/GNSS*, pages 213–224, Portland OR (USA), Sept. 2003.

- [22] C. Canudas de Wit and O.J. Sørдалen. “Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(11) :1791–1797, November 1992.
- [23] R. Carelli and Oliveira Freire E. Corridor navigation and wall-following stable control for sonar-based mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 45(3) :235–247, december 2003.
- [24] L. Cordesses. *Commande de robots : applications à l’asservissement visuel 3D et au guidage d’engins agricoles par GPS*. PhD thesis, LASMEA, Blaise Pascal University, Clermont-Ferrand (France), Juillet 2001.
- [25] Y. Cui and S.S. Ge. Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(1) :15–25, February 2003.
- [26] A. Dalgalarondo and D. Luzeaux. Rule-based incremental control within an active vision framework. In *4th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, volume 3, pages 1725–1729, Westin Stamford (Singapore), December 1996.
- [27] P. Daviet, S. Abdou, and M. Parent. Platooning for vehicles and automatic parking by scheduling robotic actions. In *Intern. Symposium on Robotics and Manufacturing (WAC’96)*, Montpellier (France), 1996.
- [28] P. Daviet and M. Parent. Platooning for small public urban vehicles. In *4th Intern. Symposium Experimental Robotics (ISER’95)*, pages 345–354, Stanford, CA (USA), July 1995.
- [29] A. De Luca, G. Oriolo, and C. Samson. Feedback control of a nonholonomic car-like robot. In *Robot Motion Planning and Control*, J.P. Laumond eds, volume 229 of *Lectures Notes in Control and Information Sciences*, pages 171–253, Springer-Verlag, 1998.
- [30] B. De Schutter, T. Bellemans, S. Logghe, J. Stada, B. De Moor, and B. Immers. Advanced traffic control on highways. *Journal A*, 40(4) :42–51, December 1999.
- [31] G. Elkaim, M. O’Connor, T. Bell, and B. Parkinson. System identification of a farm vehicle using Carrier-Phase Differential GPS. In *Proceeding of the Institute Of Navigation (ION-GPS)*, pages 485–494, Kansas City (USA), September 1996.
- [32] G. Elkaim, M. O’Connor, T. Bell, and B. Parkinson. System identification and robust control of a farm vehicle using Carrier-Phase Differential GPS. In *Proceeding of the Institute Of Navigation (ION-GPS)*, pages 1415–1426, Kansas City (USA), September 1997.
- [33] P. Evans. New energy sources for the car : how Toyota sees the future. *Energy News (Australian Institute of Energy)*, 18(2), June 2000.
- [34] J. A. Farrell, T. D. Givargis, and M. J. Barth. Real-time differential carrier phase GPS-aided INS. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(4) :709–721, July 2000.

- [35] P. Fraisse, D. Andreu, R. Zapata, J. P. Richard, and T. Divoux. Remote decentralized control strategy for cooperative mobile robots. In *8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARV'04*, pages 1011–1016, Kunming, China, December 2004.
- [36] P. Fraisse, R. Zapata, W. Zarrad, and D. Andreu. Remote secure decentralized control strategy for mobile robots. *Journal of Advanced Robotics*, 19(9) :1027–1040(14), 2005.
- [37] J. Frankel, L. Alvarez, R. Horowitz, and P. Li. Robust platoon for AVHS. PATH Technical Note 94-9, California PATH, University of California, Berkeley (USA), November 1994.
- [38] R. Garcia, T. De Pedro, J. E. Naranjo, J. Reviejo, and C. Gonzales. Frontal and lateral control for unmapped vehicles in urban tracks. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'2002)*, volume 2, pages 583–588, Versailles (France), May 2002.
- [39] A. Gil Pinto, P. Fraisse, and R. Zapata. A decentralized adaptative trajectory planning approach for a group of mobile robots. In *Towards Autonomous Robotic Systems TAROS'04*, pages 65–72, London, UK, September 2004.
- [40] D. Gillet and T. Chevroulet. BURST : Bright Urban System for Transportation. In *2nd Intern. Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration (WESIC'99)*, Newport (Wales), Sept. 1999.
- [41] A. Girault and S. Yovine. Stability analysis of a longitudinal control law for autonomous vehicles. In *IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'99)*, volume 4, pages 3728–3733, Phoenix AR (USA), December 1999.
- [42] D. Godbole and J. Lygeros. Longitudinal control of the lead car of a platoon. Technical Report Path technical memorandum 93-7, California PATH, University of California, Berkeley (USA), November 1993.
- [43] A. F. Gomez Skarmeta, H. Martinez Barber, M. Zamora Izquierdo, B. Ubeda Minaro, F. C. Gomez de Leon, and L. M. Toms Balibrea. Mimics : Exploiting satellite technology for an intelligent convoy. *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 4(17) :85–89, October 2002.
- [44] D. Gu and H. Hu. Neural predictive control for a car-like mobile robot. *International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 39(2-3), May 2002.
- [45] D. Gualino, M. Parent, and M. Uchanski. Autonomous lateral control of a vehicle using a linear CDD camera. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'98)*, volume 1, pages 69–73, Stuttgart (Germany), October 1998.
- [46] J. A. Haddon, D. N. Godbole, A. Deshpande, and J. Lygeros. Verification of hybrid systems : Monotonicity in the AHS control system. In *Hybrid Systems*, pages 161–172, 1995.
- [47] S. Hallé and B. Chaib-draa. Collaborative Driving System Using Teamwork for Platoon Formations. In *Proceedings of the AAMAS-04 Workshop on Agents in Traffic and Transportation*, pages 35–46, New York, USA, July 2004.

- [48] S. Hallé, B. Chaib-draa, and J. Laumonier. Car platoons simulated as a multi-agent system. In Jean-Pierre Müller and Martina-M. Seidel, editors, *Proceedings of the 4th Workshop on Agent-Based Simulation*. SCS, 2003.
- [49] S. Hallé, J. Laumonier, and B. Chaib-draa. A Decentralized Approach to Collaborative Driving Coordination. In *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'2004)*, October 2004.
- [50] K. Hedrick. Longitudinal control development for IVHS fully automated and semi-automated system : Phase III. Research Report UCB-ITS-PRR-97-20, PATH, Berkeley, CA (USA), 1997.
- [51] R. Horowitz and P. Varaiya. Control design of an automated highway system. *Proceedings of the IEEE : Special Issue on Hybrid Systems*, 88(7) :913–925, July 2000.
- [52] A.-C. Huang, G.-S. Chuang, and Y. J. Chen. Longitudinal control of a vehicle platoon with bounded parametric uncertainties. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 22(3) :365–374, 1999.
- [53] X. Huppé. Guidage et commande longitudinale d'un train de voitures adaptés aux conditions routières et climatiques Canadiennes. Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec, Canada), October 2004.
- [54] X. Huppé, J. De Lafontaine, M. Beauregard, and F. Michaud. Guidance and control of a platoon of vehicles adapted to changing environment conditions. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 4, pages 3091–3096, Hyatt Regency, Washington, D.C., (USA), October 2003.
- [55] A. Isidori. *Nonlinear control systems*. Springer-Verlag, London, third edition, 1995.
- [56] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi. A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot. In *Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on*, volume 3, pages 1236–1241, Osaka (Japan), November 1991.
- [57] N. Karam. Localisation collective d'un groupe de robots mobiles communicants. In *Journée de l'Ecole Doctorale SPI - Véhicules Intelligents*, pages 33–44, Aubière (France), June 2005.
- [58] M. E. Khatir and E. J. Davison. Decentralized control of large platoon of vehicles using non-identical controllers. In *American Control Conference*, pages 2769–2776, Boston, MA (USA), June 2004.
- [59] M. E. Khatir and E. J. Davison. A nearest neighbourhood decentralized controllers for controlling a platoon of vehicles. In *12th Mediterranean Conference (MED'04)*, pages 1072–1077, Kusadasi (Turkey), June 2004.
- [60] M. E. Khatir and E. J. Davison. Robust measures for large platoon of vehicles using non-identical controllers. In *5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'04)*, Lisboa (Portugal), July 2004.

- [61] T. Kosch. Technical concept and prerequisites of car-to-car communication. In *Special Session Inter-Vehicle Communication and Cooperative Systems 5th European ITS*, Hannover (Germany), June 2005.
- [62] J. Kosecka, R. Blasi, C. J. Taylor, and J. Malik. Vision-based lateral control of vehicles. In *Intelligent Transportation Systems*, Boston (USA), November 1997.
- [63] J. Kosecka, R. Blasi, C. J. Taylor, and J. Malik. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '98)*, pages 1903–1908, Louvain (Belgique), May 1998.
- [64] J. Laneurit, R. Chapuis, and F. Chausse. Accurate vehicle positioning on a numerical map. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 3(1) :15–31, March 2005.
- [65] F. Large, S. Sekhavat, C. Laugier, and E. Gauthier. Towards robust sensor-based maneuvers for a car-like vehicle. In *Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation (ICRA '2000)*, pages 2289–2294, San Francisco, CA (USA), 2000.
- [66] C. Laugier. Towards autonomous vehicles for future Intelligent Transportation Systems. In *Proc. 6th Conf. of Italian Association in Artificial Intelligence*, pages 251–258, Padova (Italy), Sept. 1998.
- [67] J.P. Laumond, editor. *La Robotique Mobile*. Hermes Science, Paris, Sept. 2001.
- [68] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Adaptive and predictive nonlinear control for sliding vehicle guidance : Application to trajectory tracking of farm vehicles relying on a single RTK GPS. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'04*, pages 455–460, Sendai (Japan), October 2004.
- [69] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Model predictive control of vehicle in presence of sliding : Application to farm vehicles path tracking. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '05*, pages 897–902, Barcelona (Spain), April 2005.
- [70] J. Lygeros, D. Godbole, and S. Sastry. A verified hybrid controller for automated vehicles. In *IEEE Conference on Decision and Control (CDC'1996)*, pages 2289–2294, Kobe (Japan), December 1996.
- [71] M³ Team. The M³ urban transportation system. FTA Project Report MA-26-7077, MagneMotion Inc., Acton, MA (USA), January 2003.
- [72] H. Makela, P. Kaarmila, and K. Koskinen. Convoy navigation. In *3rd IFAC Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'98)*, pages 31–36, Madrid (Spain), March 1998.
- [73] J. Malik, J. Kosecka, C. J. Taylor, and P. McLauchlan. Development of binocular stereopsis for vehicle lateral control, longitudinal control and obstacle detection. Research Report UCB-ITS-PRR-99-37, California PATH MOU-257, University of California, Berkeley CA (USA), September 1999.

- [74] K. Matheus, R. Morich, I. Paulus, C. Menig, A. Lubke, B. Rech, and W. Specks. Car-to-Car communication - market introduction and success factors. In *Special Session Inter-Vehicle Communication and Cooperative Systems 5th European ITS*, Hannover (Germany), June 2005.
- [75] J. A. Meyer and D. Filliat. Map-based navigation in mobile robots - II a review of map-learning and path-planning strategies. *Journal of Cognitive Systems Research*, 4(4) :238–317, 2003.
- [76] S. Min Oh, S. Tariq, B. Walker, and F. Dellaert. Map-based priors for localization. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, Sendai (Japan), September 2004.
- [77] P. Morin. Stabilisation de systèmes non linéaires critiques et application à la commande de véhicules. Habilitation à Diriger des Recherches, Sophia-Antipolis - Nice (France), Octobre 2004.
- [78] P. Morin and C. Samson. Control of nonlinear chained systems. From the Routh-Hurwitz stability criterion to time-varying exponential stabilizers. In *IEEE Conference on Decision and Control CDC*, San Diego (USA), December 1997.
- [79] P. Morin and C. Samson. A characterization of the Lie Algebra Rank Condition by transverse periodic functions. Technical Report 3873, INRIA, Sophia-Antipolis (France), January 2000.
- [80] P. Morin and C. Samson. Practical stabilization of a class of nonlinear systems. In *IEEE Conf. on Decision and Control CDC*, pages 2989–2994, Sydney (Australia), 2000.
- [81] P. Morin and C. Samson. A characterization of the Lie Algebra Rank Condition by transverse periodic functions. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 4(40) :1227–1249, January 2001.
- [82] P. Morin and C. Samson. Commande de véhicules sur roues non holonomes, une synthèse. In *Actes des troisièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'01*, Giens, France, October 2001.
- [83] P. Morin and C. Samson. Commande par retour d'état de systèmes non-linéaires sans dérive. L'approche par fonctions transverse. In *Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA*, pages 746–765, Nantes (France), Juillet 2002.
- [84] J. E. Naranjo, C. Gonzales, J. Reviejo, R. Garcia, and T. De Pedro. Adaptive fuzzy control for inter-vehicle gap keeping. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 4, pages 132–142, September 2003.
- [85] T.S. No and K.-T. Chong. Longitudinal spacing control of vehicles in a platoon. *Transaction on Control, Automation and Systems Engineering (ICASE)*, 2(2) :92–97, June 2001.
- [86] T.S. No, K.-T. Chong, and D.-H. Roh. A Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 50(1) :116–124, January 2001.

- [87] M. O'Connor, T. Bell, G. Elkaim, and B. Parkinson. Automatic steering of farm vehicles using GPS. In *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis (USA), June 1996.
- [88] M. O'Connor, G. Elkaim, and B. Parkinson. Kinematic GPS for closed-loop control of farm and construction vehicles. In *Proceedings of the Institute of Navigation ION-GPS*, pages 1261–1268, Palm Springs (USA), September 1995.
- [89] M. Ohtomo, R. Kimura, S. Fukushima, and N. Fujii. Automatic following system utilizing vehicle-to-vehicle communication. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'98)*, volume 2, pages 381–384, Stuttgart (Germany), October 1998.
- [90] E. Ollivier and M. Parent. Odometric navigation with matching of landscape features. In *The 6th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2002)*, volume 2, pages 757–762, Singapore (Singapore), December 2002.
- [91] G. R. Opshaug and P. Enge. Robotic snow cat. In *Institute Of Navigation's GPS Conference ION*, pages 1016–1023, Salt Lake City, UT (USA), September 2000.
- [92] M. Parent, P. Daviet, J.-C. Denis, and T. M'Saada. Automatic driving in stop and go traffic. In *Intelligent Transportation Society of America (ITS America)*, pages 183–188, Washington (USA), March 1995.
- [93] M. Parent, G. Gallais, A. Alessandrini, and T. Chanard. Cybercars : review of first projects. In *Ninth International Conference on Automated People Movers*, Singapore (Singapore), September 2003.
- [94] L. E. Parker. Designing control laws for cooperative agent teams. In *Proceedings IEEE Intelligent Conference on Robotics and Automation (ICRA'93)*, pages 582–587, Atlanta, GA (USA), May 1993.
- [95] D. Reichardt, M. Miglietta, L. Moretti, P. Morsink, and W. Schulz. Cartalk 2000 - safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication. In *Proceedings of Intelligent Vehicles Conference (IV-2002)*, volume 2, pages 545–550, Versailles (France), June 2002.
- [96] K. Rintanen, H. Makela, K. Koskinen, J. Puputti, M. Sampo, and M. Ojala. Development of an autonomous navigation system for an outdoor vehicle. *Control Engineering Practice*, 4(4) :499–505, 1996.
- [97] E. J. Rossetter and J. C. Gerdes. A study of lateral vehicle control under a 'virtual' force framework. In *Proceedings of AVEC'02, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hiroshima (Japan), September 2002.
- [98] E. J. Rossetter, J. P. Switkes, and J. C. Gerdes. A gentle nudge towards safety : experimental validation of the potential field driver assistance system. In *Proceedings of the 2003 ACC American Control Conference*, volume 5, pages 3744–3749, Denver, Colorado (USA), June 2003.
- [99] E. Royer, J. Bom, M. Dhome, B. Thuilot, M. Lhuillier, and F. Marmoiton. Outdoor autonomous navigation using monocular vision. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2005*, Edmonton (Canada), August 2005.

- [100] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, and T. Chateau. Towards an alternative GPS sensor in dense urban environment from visual memory. In *British Machine Vision Conference*, volume 1, pages 197–206, Kingston (England), September 2004.
- [101] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, T. Chateau, and F. Marmoiton. Localisation par vision monoculaire en environnement urbain. In *ORASIS'05 - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Fournol (France), May 2005.
- [102] S. S. Saab and Z. M. Kassas. Map-based land vehicle navigation system with DGPS. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'02)*, volume 1, pages 209–214, Versailles (France), June 2002.
- [103] C. Samson. Control of chained systems : application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(1) :64–77, January 1995.
- [104] D. A. Schoenwald, J. T. Feddema, and F. J. Oppel. Decentralized control of a collective of autonomous robotic vehicles. In *Proceedings American Control Conference*, pages 2087–2092, Arlington, VA (USA), June 2001.
- [105] G. Segarra. Activities and applications of the Car 2 Car communication : The renault vision. In *Special Session Inter-Vehicle Communication and Cooperative Systems 5th European ITS*, Hannover (Germany), June 2005.
- [106] M. Segawaa, S. Nakanoa, O. Nishiharab, and H. Kumamoto. Vehicle stability control strategy for steer by wire system. *JSAE Review*, 22 :383–389, 2001.
- [107] Y. Seto and H. Inoue. Development of platoon driving in AHS. *JSAE Review*, 20(1) :93–99, 1999.
- [108] J. Seuss and J. Richert. Control structures for vehicle convoy control. In *International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'96)*, Aachen (Germany), June 1996.
- [109] S. Shaheen, K. Wipyewski, C. Rodier, L. Novick, M.A. Meyn, and J. Wright. Carlink II : a commuter carsharing pilot program final report. PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2004-23, Univ. of California, Berkeley (USA), August 2004.
- [110] J. Sika. DAVINCI : Integrated control within the context of automated vehicle guidance. Trail research school, Delft University, Delft (The Netherlands), November 2000.
- [111] J. Sika, J. Hilgert, J. P. Pauwelussen, T. Bertram, and M. Hiller. Test facility for lateral control of a scaled vehicle in an automated highway system. In *Mechatronics 2002 The 8th Mechatronics Forum International Conference*, University of Twente, Enschede (Netherlands), June 2002.
- [112] J. Sika and J. P. Pauwelussen. Entering an automated platoon. In *Proceedings of AVEC'02, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hiroshima (Japan), September 2002.
- [113] M. A. Sotelo, S. Alcade, J. Reviejo, J.E. Naranjo, R. Garcia, T. De Pedro, and C. Gonzales. Vehicle fuzzy driving based on dgps and vision. In *9th IFSA World*

- Congress and 20th NAFIPS International Conference*, volume 3, pages 1472–1477, Canada, July 2001.
- [114] S. S. Stankovic, M. J. Stanojevic, and D. D. Siljak. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(5) :816–832, September 2000.
 - [115] D. Swaroop and K. Hedrick. Constant spacing strategies for platooning in Automated Highway System. *ASME Journal of Dynamics System, Measurement and Control*, 121 :462–470, September 1999.
 - [116] J. Takezaki, N. Ueki, T. Minowa, and H. Kondoh. Support system for safe driving. *Hitachi Review*, 49(3) :107–114, 2000.
 - [117] Y. Tan and I. Kanellakopoulos. Longitudinal control of commercial heavy vehicles : Experimental implementation. Final Report for MOU 314 UCB-ITS-PRR-2002-25, California PATH, California PATH (USA), April 2000.
 - [118] C.J. Taylor, J. Kosecka, R. Blasi, and J. Malik. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving. *International Journal of Robotics Research*, 18(5) :442–454, May 1998.
 - [119] C. Thorpe, R. Aufrere, J. Carlson, D. Duggins, T. Fong, J. Gowdy, J. Kozar, R. MacLaughlin, C. McCabe, C. Mertz, A. Suppe, B. Wang, and T. Yata. Safe robot driving. In *Proceedings of the International Conference on Machine Automation (ICMA'2002)*, Hong-Kong (China), September 2002.
 - [120] S. Thrun. Robotic mapping : A survey. In G. Lakemeyer and B. Nebel, editors, *Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium*. Morgan Kaufmann, 2002.
 - [121] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton, 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.
 - [122] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet, and M. Berducat. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. *Auton. Robots*, 13(1) :53–71, 2002.
 - [123] TranSafety Inc. Simulated on-the-road emergencies used to test stopping sight distance assumptions. *Road Management and Engineering Journal*, July 1997.
 - [124] S. Tsugawa. Inter-vehicle communications and the applications to intelligent vehicles : An overview. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'02)*, volume 2, pages 564–569, Versailles (France), June 2002.
 - [125] S. Tsugawa, S. Kato, T. Matsui, and H. Naganawa. An architecture for cooperative driving of automated vehicles. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 422–427, Dearborn, MI (USA), October 2000.
 - [126] S. Tsugawa, H. Mori, and S. Kato. A lateral control algorithm for vision-based vehicles with a moving target in the field of view. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'98)*, volume 1, pages 41–45, Stuttgart (Germany), October 1998.

- [127] K. Tsukamoto, M. Fujii, M. Itami, and K. Itoh. A study on acquisition of vehicle location using integrated IVC and RVC systems. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'02)*, volume 2, pages 393–400, Versailles (France), June 2002.
- [128] P. Varaiya. Smart cars on smart roads : Problems of control. PATH Technical Memorandum 91-5, California PATH, University of California, Berkeley (USA), December 1991.
- [129] M. Vidyasagar. *Nonlinear systems analysis*. Prentice-Hall, Englewoods, second edition, 1993.
- [130] Yamaha golf cars. Utility, transportation and custom vehicles. Brochure LIT-13815-31-04, Yamaha Golf-Car Company, Newnan CA (USA), 2004.
- [131] D. Yanakiev, J. Eyre, and I. Kanellakopoulos. Longitudinal control of heavy duty vehicles : Experimental evaluation. Final Report for MOU 293 UCB-ITS-PRR-98-15, California PATH, California PATH (USA), 1998.
- [132] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos. Speed tracking and vehicle follower control design for heavy-duty vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 25 :251–276, 1996.
- [133] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos. Longitudinal control of automated CHVs with significant actuator delays. In *Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control (CDC'97)*, pages 4756–4763, San Diego, CA (USA), December 1997.
- [134] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos. Nonlinear spacing policies for automated heavy-duty vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47(Y) :1365–1377, November 1998.
- [135] X. Yang, J. Liu, F. Zhao, and N. H. Vaidya. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. In *1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous 2004), Networking and Services*, pages 114–223, Cambridge MA (USA), August 2004. IEEE Computer Society.
- [136] W. Zhang and R. E. Parsons. An intelligent roadway reference system for vehicle lateral guidance/control. In *Proc. American Control Conference*, pages 281–286, San Diego CA (USA), 1990.
- [137] 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*, 48(1) :319–328, January 1999.