

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MOUHCINE AKKI

COMMANDE DE L'INTER-DISTANCE DANS UN CONVOI DE VÉHICULES
AUTONOMES PAR L'IMPOSITION D'IMPÉDANCES VIRTUELLES
D'INTERACTION

AVRIL 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Remerciements

Je remercie le Bon Dieu qui m'a donné la force pour réaliser ce travail.

J'aimerais remercier ici toutes les personnes qui ont pris part à ce travail aussi bien au niveau scientifique qu'au plan humain, ils ont contribué pour une grande part à l'aboutissement de ce mémoire.

Plus particulièrement, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à Mr Pierre Sicard, Directeur du comité d'étude de cycle supérieurs en génie électrique à l'Université du Québec à Trois-Rivières et Directeur du projet de recherche, pour ses conseils, ses critiques et son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

Ainsi, je tiens vivement à remercier tous les professeurs de département de génie électrique et génie informatique, plus particulièrement le professeur Adel Omar Dahmane et le professeur Ahmed Chériti.

Je remercie également tous les membres de ma communauté, en particulier Mr Fouad Mokhtari, étudiant en doctorat au département de génie électrique et génie informatique et Youssef Achouri, étudiant en Maîtrise au département de génie électrique et génie informatique, pour leurs conseils et leur soutien moral.

Finalement, je tiens à remercier les membres de ma famille pour leur soutien et leur appui moral. Je leur serai reconnaissant toute ma vie.

Résumé

Plusieurs algorithmes et technologies ont été proposés afin de maintenir les inter-distances entre les véhicules dans les convois pour les systèmes de transport intelligents. Les stratégies centralisées (commande H_∞ par exemple) sont peu attrayantes puisqu'elles demandent un échange important d'informations entre les véhicules. La conception des commandes décentralisées tient peu compte des interactions entre les différents sous-systèmes. Nous recherchons ainsi une solution qui permettra d'établir une structure de commande à la fois efficace et intuitive.

L'objectif principal de notre travail est de concevoir une stratégie de commande bien adaptée pour contrôler ces inter-distances, notamment pour contrôler les distances longitudinales de chaque véhicule, en se basant sur un algorithme qui implémente une impédance virtuelle (une chaîne de ressorts-amortisseurs) pour imposer les effets d'interactions désirés entre chaque paire de véhicules adjacents. Cette loi de commande doit prendre en considération les incertitudes de certains paramètres du modèle du système et les perturbations dues aux forces externes qui agissent sur les véhicules, tel que les rafales de vent, ainsi que celles engendrées par les variations de la courbure de la route. Afin d'améliorer la stabilité du système de convoi de véhicules, deux structures de commande sont évaluées : la structure maître-esclave et la structure cascade couplée croisée et non croisée.

La stratégie et la commande développées sont validées en simulation en utilisant Matlab-Simulink et expérimentalement avec trois véhicules électriques.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	x
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Système d'autoroute intelligente	1
1.2 Techniques de contrôle des inter-distances dans les systèmes de convois	2
1.3 Problématique	4
1.4 Objectifs	5
1.5 Méthodologie	6
1.6 Organisation du mémoire	7
Chapitre 2 - Modélisation longitudinale du système de convoi des véhicules	9
2.1 Introduction	9
2.2 Modélisation dynamique de traction du véhicule électrique	9
2.2.1 Structure complet du véhicule par la REM	9

2.2.2	Structure maximale de commande du véhicule	14
2.2.2.1	Inversion indirecte des éléments d'accumulation	15
2.2.2.2	Inversion directe des éléments de conversion	18
2.2.3	Structure simplifiée	18
2.3	Revue des approches du modèle de l'inter-distance.....	20
2.3.1	Modèle de distance de sécurité	20
2.3.2	Modèles basés sur stimulus-réponse	22
2.3.3	Modèles basés sur psycho-espacement	24
2.3.4	Modèles basés sur le périmètre de sécurité et de confort.....	24
2.4	Conclusion	29
Chapitre 3 - Stratégies de commande.....		32
3.1	Introduction	32
3.2	Modélisation de la structure de commande	32
3.2.1	Contrôleur de vitesse.....	32
3.2.2	Contrôleur de l'inter-distance	35
3.3	Stratégies de commande appliquées au système de convoi.....	38
3.3.1	Stratégie de commande locale	39
3.3.2	Stratégie de commande globale	41
3.3.3	Stratégie de commande mixte	43

3.4	Système de contrôle de l'inter-distance pour un convoi des véhicules basé sur un modèle classique d'interaction par ressort-amortisseur	44
3.5	Système de contrôle de l'inter-distance pour un convoi des véhicules basé sur un modèle classique d'interaction par ressort-amortisseur incluant le terme de distance de sécurité.....	50
3.6	Système de contrôle avec coefficients fixes et variables.....	52
3.6.1	Structure de contrôle de l'inter-distance avec coefficient fixe	52
3.6.2	Structure de contrôle de l'inter-distance avec coefficient variable.....	53
3.7	Conclusion.....	55
Chapitre 4 - Simulation des stratégies de commande		57
4.1	Introduction	57
4.2	Stratégies de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance.....	57
4.3	Stratégies de commande globale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance.....	63
4.4	Stratégies de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance	67
4.5	Stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance incluant le terme de distance de sécurité	70
4.6	Stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance avec des coefficients variables de ressort amortisseur	73

4.7 Conclusion.....	75
Chapitre 5 - Réalisation et validation expérimentale du convoi	77
5.1 Introduction	77
5.2 Architecture du banc d'essais expérimental	77
5.2.1 Structure de commande de l'inter-distance pour un système du convoi de trois véhicules.....	80
5.2.2 Modèle discret de commande de l'inter-distance du système de convoi ..	84
5.2.3 Conversion de données des capteurs et calcul de la boucle de commande de l'inter-distance par un Microcontrôleur	86
5.3 Conclusion.....	92
Chapitre 6 - Conclusion générale.....	93
Bibliographie.....	96
Annexe A – Structure du contrôleur de vitesse PID et du courant de l'induit du moteur de véhicule électrique	102
Annexe B – Paramètres de simulation	107
Annexe C – Développement des calculs pour trouver le vecteur de déplacement et l'erreur de l'inter-distance	110
Annexe D – Modèle de contrôle latéral du petit véhicule.....	115
Annexe E – Présentation de l'équipement du Robot Kit de Vex	119

Annexe F – Algorithme de programmation (en langage C) du système de contrôle pour un véhicule électrique dans le cadre d'un système de convoi	136
--	-----

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Contraintes de sécurité	26
Tableau B-1	Paramètres des véhicules de convoi	107
Tableau B-2	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.1); 1er cas : même vitesse de consigne pour tous les contrôleurs PID	107
Tableau B-3	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.1); 2ième cas : attribution de la vitesse de consigne en cascade pour tous les contrôleurs de vitesse PID	107
Tableau B-4	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande globale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.2)	108
Tableau B-5	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.3)	108

Tableau B-6	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance incluant le terme de distance de sécurité (voir chapitre 4.5.4) ...	108
Tableau B-7	Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle de l'inter-distance avec des coefficients variables du ressort amortisseur (voir chapitre 4.5.5)	109
Tableau E-1	Caractéristiques du moteur cc	120
Tableau E-2	Caractéristiques du capteur ultrasonique	123
Tableau E-3	Description des entrées/sorties du microcontrôleur	134
Tableau E-4	Caractéristiques du module microcontrôleur	135

Liste des figures

Figure 2-1 Structure proposée d'un véhicule électrique	10
Figure 2-2 REM du véhicule électrique	11
Figure 2-3 SMC du véhicule électrique	15
Figure 2-4 Angle visuel du conducteur suiveur	24
Figure 2-5 Système d'inter-distance	25
Figure 3-1 Structure de PID idéal	34
Figure 3-2 Contrôleur PID filtré	35
Figure 3-3 Modèle ressorts amortisseurs virtuels	36
Figure 3-4 Modèle de contrôle de l'inter-distance de sécurité.....	37
Figure 3-5 Stratégies de commande	39
Figure 3-6 Stratégie de commande locale sur 4 véhicules	40
Figure 3-7 Stratégie de commande locale sur 10 véhicules	41
Figure 3-8 Stratégie de commande globale sur 4 véhicules.....	42
Figure 3-9 Stratégie de commande globale sur 10 véhicules.....	42
Figure 3-10 Stratégie de commande mixte sur 4 véhicules	43

Figure 3-11 Stratégie de commande mixte sur 10 véhicules	44
Figure 3-12 Modèle de contrôle de l'inter-distance par un ressort amortisseur classique..	45
Figure 3-13 Modèle du contrôleur de l'inter-distance avec variation des coefficients du ressort amortisseur	55
Figure 4-1 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale	58
Figure 4-2 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale.....	59
Figure 4-3 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade	60
Figure 4-4 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade.....	60
Figure 4-5 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade avec variation des paramètres de PID et de l'inter- distance	61
Figure 4-6 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade avec variation des paramètres de PID et de l'inter-distance.....	62
Figure 4-7 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande globale.....	63
Figure 4-8 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande globale	64

Figure 4-9 Comportement transitoire de vitesse des véhicules dans la stratégie de commande locale	65
Figure 4-10 Comportement transitoire de vitesse des véhicules dans la stratégie de commande globale	66
Figure 4-11 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte.....	68
Figure 4-12 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande mixte	68
Figure 4-13 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte après ajustement du paramètre de l'intégrateur du contrôleur PID.....	69
Figure 4-14 Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande mixte après ajustement de l'intégrateur du contrôleur PID	70
Figure 4-15 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant le terme de distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance.....	71
Figure 4-16 Erreur de l'inter-distance des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant le terme de distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance..	72
Figure 4-17 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance.....	72
Figure 4-18 Erreur de l'inter-distance des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance	73

Figure 4-19 Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité avec une gestion du contrôleur de l'inter-distance	74
Figure 4-20 Erreur des inter-distances des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité avec une gestion du contrôleur de l'inter-distance	74
Figure 5-1 Convoi de trois véhicules	79
Figure 5-2 Schéma bloc de la structure d'asservissement de l'inter-distance entre deux véhicules électriques (maître-esclave)	80
Figure 5-3 Inter-distance entre deux véhicules (maître-esclave)	83
Figure 5-4 Vitesse du véhicule esclave	83
Figure 5-5 Schéma bloc de la structure discrète d'asservissement de l'inter-distance entre deux véhicules électriques (maître-esclave)	84
Figure 5-6 Réponse avec le modèle discret de l'inter-distance entre deux véhicules consécutifs (maître-esclave)	85
Figure 5-7 Réponse avec le modèle discret de la vitesse de véhicule esclave	86
Figure 5-8 Correspondance entre distance en décimal et en <i>cm</i>	88
Figure 5-9 Inter-distance mesurée entre deux véhicules (maître-esclave)	91
Figure A-1 Schéma bloc d'asservissement de la vitesse du véhicule électrique	102
Figure A-2 Schéma bloc d'asservissement du courant d'induit d'un moteur électrique	105
Figure D-1 Modèle latéral du véhicule	116
Figure D-2 Boucle du contrôleur latéral du véhicule	117

Figure E-1 Véhicule électrique équipé par les composants du Robot kit Vex.....	119
Figure E-2 Moteur cc	120
Figure E-3 Bloc module moteur.....	121
Figure E-4 Capteur ultrasonique	123
Figure E-5 Technique de mesure de la distance d'obstacle	124
Figure E-6 Bloc du module ultrasonique	126
Figure E-7 Capteur pare-choc	127
Figure E-8 Capteur infrarouge suiveur de la ligne.....	128
Figure E-9 Bloc du module <i>TRAKING LINE</i>	129
Figure E-10 Capteur optique de vitesse	130
Figure E-11 Schéma bloc de fonctionnement de l'encodeur	131
Figure E-12 Bloc du module de l'encodeur	132
Figure E-13 Boîtier qui représente le Microcontrôleur et ses entrées/sorties	133

Chapitre 1 — Introduction :

1.1 Système d'autoroute intelligente

La sécurité routière a toujours été une grande préoccupation de tous les gouvernements à travers le monde. Le nombre d'accidents sur les routes et les congestions des autoroutes des grandes villes mondiales, causés par le nombre important de véhicules de transport et autres, ne cessent d'augmenter. De là, est née l'idée de développer les systèmes d'autoroutes intelligentes afin de diminuer l'insécurité sur les routes. Le développement des nouvelles technologies a beaucoup aidé pour rendre ces autoroutes de plus en plus intelligentes. De nos jours plusieurs technologies de différents domaines tels que l'informatique, les télécommunications, l'automatisation et les systèmes de mesures sont utilisées pour développer l'infrastructure des autoroutes, par exemple un système de Gestion Technique Centralisé (GTC) qui transmet à l'ordinateur central du poste de contrôle autoroutier les informations en temps réel sur les conditions de circulation. Plusieurs recherches scientifiques sont faites sur le domaine de l'automatisation des véhicules circulant sur autoroute. L'idée est de faire communiquer tous les véhicules qui prennent une autoroute entre eux en formant ainsi un convoi contrôlé par plusieurs techniques qui seront détaillées dans les chapitres qui suivent.

L'automatique est omniprésente dans les véhicules d'aujourd'hui même si ce terme n'apparaît pas toujours de manière explicite et que l'on parle plus souvent de fonctions électroniques, et qui ont atteint 30 % de la valeur d'une voiture. Ces fonctions ont investi aussi bien les systèmes qui assurent le bon fonctionnement du véhicule et son intégrité. À ce titre, les systèmes de contrôle du véhicule ont fait des avancées significatives ces vingt

dernières années. Ils assurent de manière efficace la tenue de route, la stabilité, la manœuvrabilité et le freinage du véhicule. Les organes de contrôle utilisés actuellement sont enrichis de moyens de perception de l'environnement, de localisation ou de communication. Leur utilisation peut être élargie à des applications d'assistance active au conducteur non seulement en situation limite, mais aussi en prévention d'un danger grâce à une perception anticipée de celui-ci. La fiabilité des moyens de perception et de commande ainsi que l'introduction de la coopération entre l'infrastructure et les véhicules, permettrait de voir évoluer l'aide apportée au conducteur vers l'automatisation de certaines tâches de conduite.

1.2 Techniques de contrôle des inter-distances dans les systèmes de convois

Ce mémoire vise à démontrer la faisabilité d'utiliser une technique de contrôle d'inter- distance dans les systèmes de convois, basée sur une implémentation de ressorts et amortisseurs virtuels qui représentent les effets d'interaction désirés entre les véhicules. La recherche bibliographique montre que les stratégies de commande utilisées pour le contrôle des inter-distances sont basées sur des lois de la physique et sur des algorithmes plus avancés utilisant par exemple la logique floue. Ce type de commande avancée, dans la plupart des cas, emploie la connaissance et l'expérience d'un opérateur humain et parmi ces importantes applications, G.D. Lee [Lee01] présente une stratégie de contrôle longitudinal pour un convoi de véhicules, basé sur un algorithme FSMC (*fuzzy-sliding mode control*) qui propose deux types de contrôleur distincts : un contrôleur de la vitesse et l'accélération

et un contrôleur de l'inter-distance. La synthèse de ces contrôleurs fonctionne en deux modes d'opération (mode suivi de vitesse, et mode suivi d'accélération). Le résultat obtenu par cette technique de contrôle, est une garantie de la stabilité du système dans plusieurs conditions, même lorsque chaque véhicule a différentes performances. Dans [Sug85], le contrôleur avec logique floue conçu est basé sur les actions d'opérateurs humains pour naviguer et stationner une voiture dans une zone quelconque avec une faible vitesse. Dans [Bau95], les chercheurs représentent un système de commande, en employant le modèle dynamique non linéaire du véhicule. Ce système de commande, utilise la technique de linéarisation par rétroaction et la logique floue. L'analyse de sa stabilité, a été discutée en utilisant l'approche de Lyapunov et la technique convexe d'optimisation basée sur les inégalités matricielles linéaires (LMI). Toutes ces études de modélisation basées sur la logique floue, présentent de bonnes performances, mais restent complexes au niveau de l'application.

Plusieurs travaux ont déjà été mis en œuvre pour développer la commande longitudinale du convoi basé sur la technique de linéarisation par rétroaction. L'idée générale de cette approche est de transformer un système dynamique non linéaire à un système linéaire puis le stabiliser par un correcteur classique linéaire. Cette structure de commande a été utilisée avec succès dans les systèmes de convoi afin d'améliorer la stabilité et la performance du système, face à des perturbations inattendues agissant sur les véhicules. Parmi les travaux les plus récents qui emploient cette méthode de contrôle, on trouve Shahab Sheikholeslam [Shei93] qui propose une loi de commande qui utilise la linéarisation par rétroaction basée sur un modèle dynamique non linéaire qui ne tient pas en considération les informations fournies par le véhicule en tête du convoi (vitesse et accélération), et cela pour examiner le cas de la perte de communication entre le véhicule

maître (en tête de convoi) et les véhicules qui le suivent. La performance de cette méthode a été comparée avec celle qui exige la communication avec le véhicule maître [Shei92] [Shei90], et le résultat obtenu montre que la performance est dégradée mais reste tout de même acceptable. Cependant, Diana Yanakiev [Yan01] traite la problématique de présence d'un retard significatif au niveau des injecteurs de carburant et du système de freinage des voitures automatisées. Ce retard a un effet cumulatif pendant qu'il se propage en amont.

L'objectif principal de notre travail est de concevoir un algorithme de commande pour contrôler les inter-distances entre les véhicules d'un convoi, en utilisant une impédance virtuelle [Yeon05] (une chaîne de ressorts-amortisseurs) pour imposer les effets d'interactions désirés entre chaque paire de véhicules adjacents.

La loi de commande doit prendre en considération la perturbation due à la variation brusque du comportement des véhicules (freinage maximal) et les forces externes qui agissent sur le véhicule tel que le frottement avec le sol.

1.3 Problématique

Dans le système de convoi, on remarque un manque de respect d'inter-distance entre les véhicules ; ceci s'explique par le fait que le véhicule est assujéti à différentes perturbations pendant que le véhicule roule sur une voie descendante ou qu'il monte une côte. En effet, on peut remarquer l'existence de variations de certains paramètres (masse, vitesse, adhérence roue-sol), alors que les perturbations sont dues aux forces externes qui agissent sur le véhicule tel que les rafales de vent ainsi que celles engendrées par les variations de la courbure de la route.

Les stratégies centralisées (commande H_∞ par exemple) sont peu attrayantes puisqu'elles demandent un échange important d'informations entre les véhicules. La conception des commandes décentralisées tient peu compte des interactions entre les différents sous-systèmes. Nous recherchons ainsi une solution qui permettra d'établir une structure de commande à la fois efficace et intuitive.

1.4 Objectifs

L'objectif principal de ce travail de recherche est de développer un algorithme de contrôle de l'inter-distance dans un convoi des petits véhicules.

Cet objectif peut être décomposé en sous objectifs :

- étudier le modèle dynamique du véhicule électrique ;
- concevoir un contrôleur local de la vitesse PID (proportionnel-intégral-dérivatif) de chaque véhicule de convoi ;
- concevoir un modèle de contrôle de l'inter-distance entre les véhicules en se basant sur un modèle de ressort-amortisseur et intégrer un terme de sécurité pour rendre le système de contrôle intelligent face à des variations brusques du comportement des véhicules (freinage d'urgence) ;
- étudier deux structures de commande pour améliorer la stabilité du système de convoi de véhicules : structure maître-esclave qui consiste que la vitesse du véhicule en tête de convoi représente la vitesse de consigne pour tous les autres véhicules en

arrière ; et structure cascade couplée qui considère la vitesse du véhicule en avant comme vitesse de consigne pour le véhicule en arrière. Dans la dernière structure il y a deux types, structure cascade couplée croisée et non croisée : dans la structure croisée, le véhicule en avant est influencé par la variation de vitesse du véhicule en arrière, ce qui n'est pas le cas dans la structure non croisée.

- réaliser un banc expérimental constitué d'une chaîne de véhicules (trois petits véhicules) qui doivent se déplacer en convoi de façon autonome. Le projet consiste à concevoir un programme sur le logiciel EasyC (programmation en langage C++) afin de réaliser la gestion et la commande du convoi.

1.5 Méthodologie

La première étape de notre travail est la recherche bibliographique. Elle permet de cerner précisément la problématique et les grands volets de notre travail. Ces volets concernent les techniques de commande de l'inter-distance dans les systèmes de convoi des véhicules. De cette recherche bibliographique, nous tirons les volumes et les articles de référence permettant l'aboutissement de notre travail de recherche.

Dans la seconde étape, nous étudions différentes approches pour définir un modèle de distance de sécurité, en représentant un exemple de conception d'inter-distance basé sur des lois physique de contact mécanique. Le modèle est conçu de telle façon d'inclure des spécifications de sécurité et de confort.

L'étape suivante consiste à modéliser la dynamique d'un véhicule par la loi de Newton. L'effet d'interaction entre deux véhicules consécutifs sera modélisé par un ressort

amortisseur virtuel. Par la suite on ajoutera un système de contrôle local PID (proportionnel-intégral-dérivatif) pour contrôler la vitesse de chaque véhicule, et un contrôleur de l'inter-distance. Dans le cas où on travaille sur un convoi, le nombre de véhicules sera composé d'au moins quatre véhicules. Différents scénarios de commande seront appliqués pour l'étude de la stabilité de convoi.

La dernière étape de notre travail est une réalisation pratique sur un convoi de trois petits véhicules. Les véhicules doivent se déplacer de façon autonome en utilisant un logiciel EasyC pour la programmation. Le bon fonctionnement des capteurs, de la commande et de la communication permettra de donner le comportement désiré aux véhicules.

1.6 Organisation du mémoire

Le chapitre 2 sera consacré à décrire le modèle d'un véhicule électrique par la méthode de la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Chen08] et à la description de différentes approches théoriques pour la modélisation des inter-distances de sécurité. Ainsi nous présenterons un modèle de l'inter-distance basé sur l'utilisation de l'amortisseur. Cette méthode de modélisation va nous permettre de comprendre le fonctionnement du système de gestion de l'inter-distance qui impose des spécifications de confort et de sécurité.

Le troisième chapitre portera sur la modélisation du système de convoi par la méthode de l'imposition des impédances entre les véhicules. Ainsi nous appliquons

différentes stratégies de commande (globale, locale et mixte) afin d'évaluer la stabilité et d'examiner la plus robuste pour contrôler l'inter-distance entre les véhicules du convoi.

Au chapitre 4, on expose les résultats de simulation des différentes structures décrites au chapitre 3, ainsi que l'effet d'ajouter un terme de sécurité au contrôleur de l'inter-distance pour rendre ce système de contrôle plus robuste face à des perturbations brusques du comportement des véhicules (freinage d'urgence).

Dans le chapitre 5, on va présenter les résultats de démonstrations sur de petits véhicules électriques. En se basant sur des capteurs, on extraira les informations concernant la vitesse et la direction de chaque véhicule. La communication des informations entre véhicules permettra l'implémentation et la validation d'une loi de commande locale.

Nous présentons la conclusion générale et les perspectives du travail au chapitre 6.

Chapitre 2 — Modélisation longitudinale du système de convoi des véhicules

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on présentera le modèle d'un véhicule électrique. Ce modèle sera composé d'une machine électrique à courant continu avec une batterie modélisée par une source de tension continue.

La modélisation électrique de la voiture est développée par l'application de la REM (Représentation Énergétique Macroscopique) dans [Chen08]. Elle est en effet basée sur le principe d'action et réaction. À partir des règles d'inversion de la REM, on peut déduire la structure de commande, ce qu'on appelle Structure Maximale de Commande (SMC).

Nous abordons dans ce chapitre aussi différentes approches pour la modélisation de l'inter-distance entre deux véhicules adjacents, et en particulier les modèles de l'inter-distance de sécurité. Enfin, nous présenterons un travail au sujet de la conception d'un mode de définition de l'inter-distance qui prend en compte des spécifications de confort et de sécurité.

2.2 Modélisation dynamique de traction du véhicule électrique

2.2.1 Structure complète du véhicule par la REM

Les hypothèses principales sont les suivantes :

- Interrupteurs idéaux

- Machine à courant continu (MCC) non saturée
- Inertie de la MCC, des arbres et des roues négligée
- Contact roue/sol sans pertes

Concernant l'architecture du véhicule, elle sera composée d'une machine électrique à courant continu à excitation séparée. Afin de simplifier le système, la batterie est modélisée par une simple source de tension continue (figure 2.1).

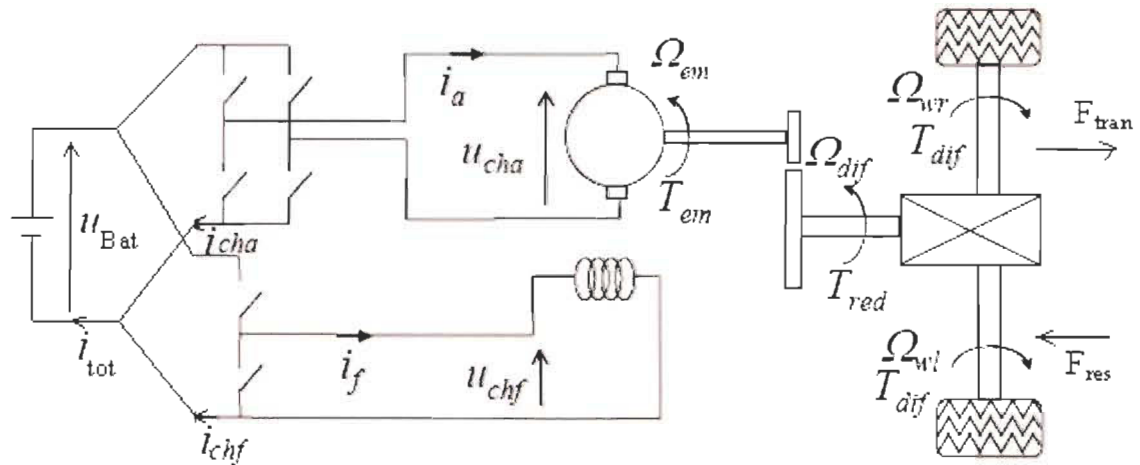


Figure 2.1 : Structure proposée d'un véhicule électrique [Chen08]

Le résultat de modélisation de la voiture électrique réalisée à l'aide de la REM est illustré à la figure 2.2. Notons que cette modélisation a été présentée dans [Chen08].

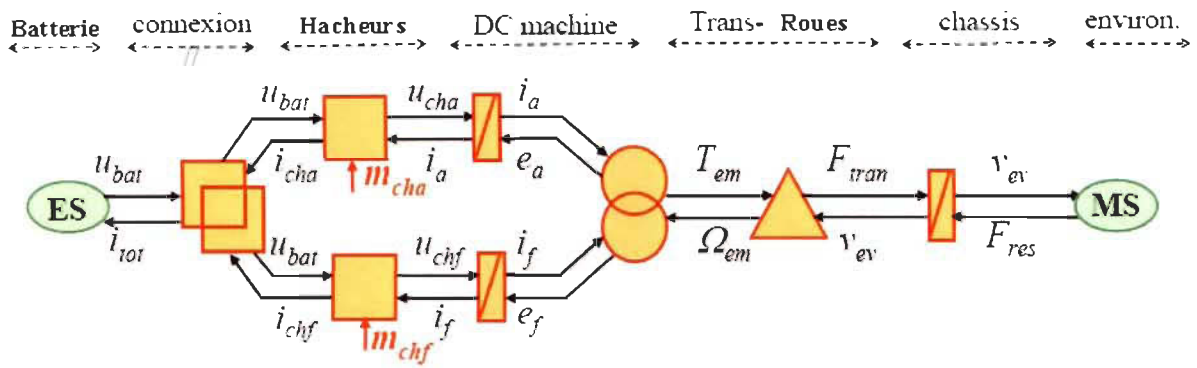
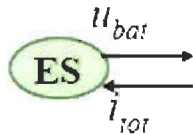


Figure 2.2 : REM du véhicule électrique [Chen08].

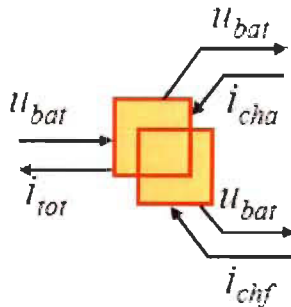
Étudions maintenant plus en détail chacun des éléments du véhicule électrique contenant : une source de tension continue, hacheur, moteur courant continu, et une section de conversion du couple de moteur en déplacement linéaire.

➤ Source de tension continue



La batterie est représentée par une source de tension électrique continue. Celle-ci produit une tension en sortie d'action (U_{bat}) et reçoit un courant en entrée de réaction (i_{tot}).

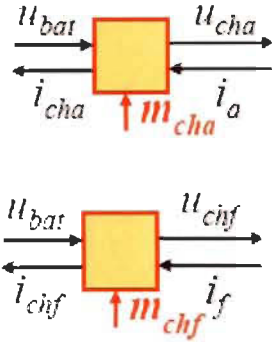
➤ Couplément de connexion



Les deux circuits qui constituent le moteur (induit et inducteur) sont excités de façon parallèle par une tension commune (U_{bat})

$$\begin{cases} \text{tension commune } U_{bat} \\ i_{tot} = i_{cha} + i_{chf} \end{cases} \quad (2.1)$$

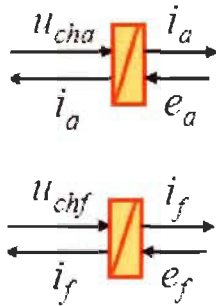
➤ Hacheurs de tension



Les hacheurs abaisseurs de tension sont représentés par un élément de conversion électrique. Ces hacheurs fournissent une tension réglable (U_{cha}) pour l'induit du moteur et (U_{chf}) pour l'inducteur du moteur. Ces tensions sont dépendantes respectivement d'un rapport cyclique (m_{cha}) et (m_{chf}) et d'une tension d'alimentation (U_{bat}).

$$\begin{cases} u_{cha} = m_{cha} \cdot u_{bat} \\ u_{chf} = m_{chf} \cdot u_{bat} \\ i_{cha} = m_{cha} \cdot i_a \\ i_{chf} = m_{cha} \cdot i_f \end{cases} \quad (2.2)$$

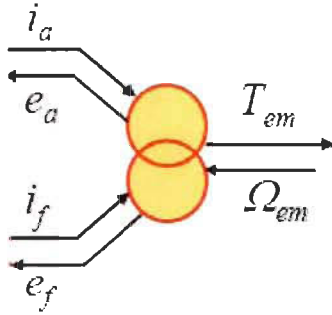
➤ Induit et inducteur du moteur



L'induit et l'inducteur du moteur sont représentés par deux circuits électriques composés respectivement en série par une résistance (R_a), (R_f), une inductance (L_a), (L_f) et une force contre-électromotrice (e_a), (e_f).

$$\begin{aligned} u_{cha} - e_a &= R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \\ u_{chf} - e_f &= R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \\ e_f &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

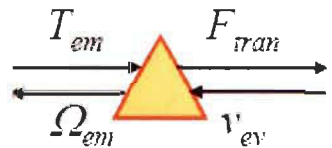
➤ Couplage électromécanique du moteur cc



Cet élément de couplage permet d'effectuer la liaison entre l'élément de l'induit (i_a, Ω_{em}) et celle de l'inducteur (i_f). il permet aussi d'obtenir un couple électromécanique à partir du courant de l'induit et de l'inducteur.

$$\begin{cases} T_{em} = k \cdot i_f \cdot i_a \\ e_a = k \cdot i_f \cdot \Omega_{em} \\ e_f = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

➤ Conversion mécanique

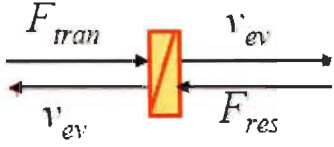


Cette section permet de convertir le couple du moteur cc en force de transmission, puis donne la liaison entre la vitesse angulaire du moteur et la vitesse de déplacement linéaire.

k_{red} et R_{roue} représentent respectivement constante réducteur mécanique et rayon de roue du véhicule.

$$\begin{cases} F_{tran} = \frac{k_{red}}{R_{roue}} \cdot T_{em} \\ \Omega_{em} = \frac{k_{red}}{R_{roue}} \cdot v_{ev} \end{cases} \quad (2.5)$$

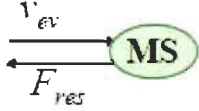
➤ Châssis



La section du châssis est représentée par un élément d'accumulation dont la variable d'état est la vitesse du véhicule électrique v_{ev} .

$$M \frac{d}{dt} v_{ev} = F_{tran} - F_{res} \quad (2.6)$$

➤ Environnement



L'environnement qui agit sur le véhicule est représenté par une source mécanique où la vitesse du véhicule représente l'entrée de l'action. Puis la sortie de réaction est une force de résistance comprenant la force de l'aérodynamique et celle d'une pente (S_{front} représente la section du front du véhicule et C_x représente la constante d'aérodynamique)

$$\begin{cases} F_{res} \approx F_{air} + F_{pente} \\ F_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_{front} C_x v_{ev}^2 \\ F_{pente} = Mg \sin(\alpha) \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.2 Structure maximale de commande du véhicule (SMC)

Cette section de la modélisation du véhicule électrique consiste à réaliser sa structure de commande. Pour la réalisation de cette dernière, nous avons utilisé la Structure Maximale de la Commande (SMC) [Chen08]. Cette méthode est obtenue par le principe d'inversion appliqué aux deux types de blocs de la REM. Il y a inversion directe pour les

éléments de conversion et une inversion indirecte pour les éléments d'accumulation. La réalisation de la SMC demande un maximum de capteurs et d'opérations.

Le résultat de modélisation de la structure de commande est illustré à la figure 2.3.

Notons que le courant d'excitation du circuit de l'inducteur est considéré constant ($i_f = \text{cst}$)

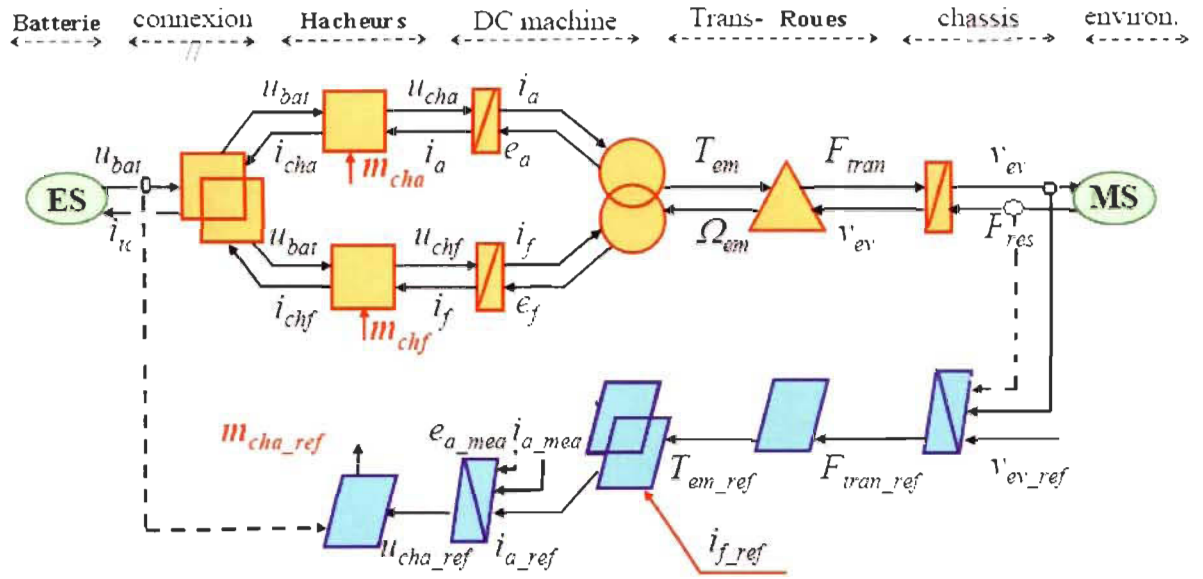


Figure 2.3 : SMC du véhicule électrique [Chen08].

On décrit en détail chacun des éléments représentant la commande du véhicule électrique.

2.2.2.1 Inversion indirecte des éléments d'accumulation

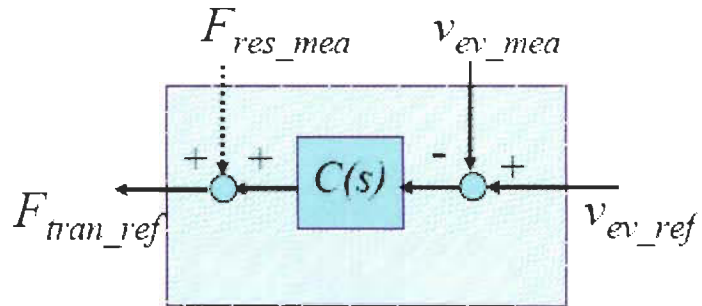
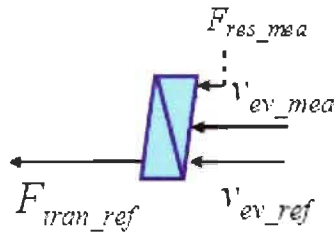
Cette partie de conversion consiste d'abord à asservir les éléments d'accumulation par des contrôleurs PID pour la vitesse, et PI pour le courant d'induit du moteur avant d'appliquer le principe d'inversion de la REM.

➤ Contrôleur de vitesse

La structure de commande maximale pour un élément d'accumulation (vitesse du véhicule électrique V_{ev_ref}) sera réalisée en utilisant un contrôleur de vitesse PID. La définition et l'ajustement de ce contrôleur seront présentés dans l'annexe A.

Donc la force de transmission de référence sera définie par l'équation suivante

$$F_{tran_ref} = Cont[V_{ev_ref} - V_{ev_mea}] + F_{res_mea} \quad (2.8)$$

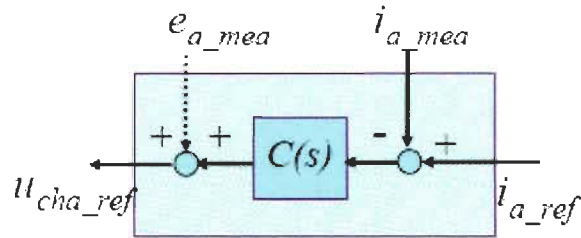
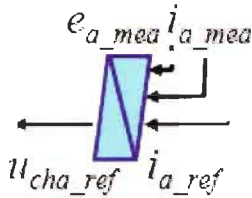


➤ Contrôleur du courant de l'induit du moteur.

Le courant d'induit est un élément d'accumulation, c'est pourquoi l'utilisation d'un bloc d'asservissement est nécessaire pour réaliser l'inverse de la REM. Le contrôleur utilisé est de type IP ou PID. La définition et l'ajustement de ce contrôleur sont présentés dans l'annexe A.

Donc la tension de référence de la charge sera définie par l'équation suivante

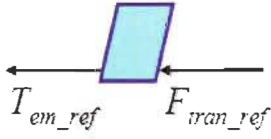
$$U_{cha_ref} = Cont[i_{a_ref} - i_{a_mea}] + e_{a_mea} \quad (2.9)$$



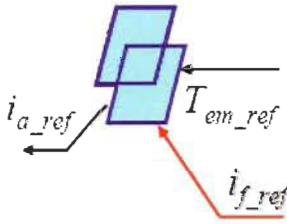
Remarque : la force électromotrice du moteur n'est pas mesurable et sa valeur peut être estimée ou négligée selon l'exigence de la performance demandée par le système.

2.2.2.2 Inversion directe des éléments de conversion

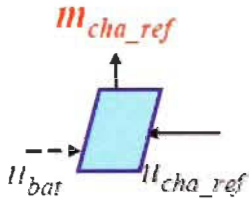
Le contrôleur est conçu de façon simple et directe à partir de l'inversion de la REM.



$$T_{em_ref} = \frac{R_{roue}}{k_{red}} \cdot F_{tran_ref} \quad (2.10)$$



$$i_{a_ref} = \frac{T_{em_ref}}{k i_{f_ref}} \quad (2.11)$$



$$m_{cha_ref} = \frac{u_{cha_ref}}{u_{bat}} \quad (2.12)$$

2.2.3 Structure simplifiée

Dans cette section nous proposons une structure simplifiée de modélisation de véhicule, en négligeant la constante du temps requise pour établir la force de transmission (constante de temps de la boucle de contrôle du couple électromagnétique).

L'étude dans les travaux [Hou96] [Mar07] prend en considération la compensation du temps de réaction du conducteur. C'est le temps compris entre le moment où le conducteur perçoit un obstacle et celui où il commence à réagir (freinage par exemple).

Cette durée est variable et est égale en moyenne à une à deux secondes pour un conducteur en bonne santé.

Pour simplifier la structure de commande du convoi, on néglige le modèle électrique de la voiture et on le considère comme un retard pour établir la force de traction. Ce retard sera négligé devant le temps de réaction du conducteur qui est pris en considération dans la conception de l'inter-distance de sécurité, dans le cas où il y a une voiture non automatisée ou semi-automatisée dans le convoi.

Selon le modèle électrique proposé par la REM, on détermine la force de traction du véhicule :

$$F_{tram} = \frac{K_{red} k \cdot i_f}{R_{roue} R_a} \left(\frac{m_{cha} u_{bat} - e_a}{1 + \frac{L_a}{R_a} s} \right) \quad (2.13)$$

L'équation (2.13) présente le modèle électrique comme un système de premier ordre avec une constante du temps $\tau = \frac{L_a}{R_a}$ (retard). Donc le modèle électrique est négligeable puisque sa constante du temps est très petite devant le temps de réaction du conducteur et devant la constante mécanique du véhicule.

On applique la loi de Newton pour établir la structure simplifiée du modèle dynamique du véhicule.

$$M \frac{d}{dt} v_{ev} = F_{tran} - F_{res} + F_{ressort / amortisor} \quad (2.14)$$

Dans l'équation, la force de traction sera représentée par une force de contrôleur PID de la vitesse du véhicule.

2.3 Revue des approches du modèle de l'inter-distance

La modélisation de l'inter-distance a été employée dans les premiers travaux particulièrement pour analyser des problèmes reliés à la dynamique routière [Hoo01]. Nous commencerons à présenter des modèles qui prennent en compte la distance de sécurité. Ces derniers sont conçus selon des lois et des règles basées sur des équations mathématiques et le comportement du conducteur. Finalement nous présenterons des modèles basés sur le Stimulus et le Psycho-espacement.

2.3.1 Modèle de distance de sécurité

La distance de sécurité est la distance qu'un conducteur doit conserver entre son véhicule et celui qui le précède. Selon [Chan58], cette distance correspond à une dynamique d'un véhicule simple par rapport à son prédécesseur : **“une bonne règle pour suivre un autre véhicule à une distance sûre est de permettre au moins la longueur d'une voiture entre vous et le véhicule de devant pour tous les dix miles par heure (16.1 km/h) de vitesse à laquelle vous êtes en train de rouler ”** ce qui veut dire :

$$d_s = L_f \left(1 + \frac{1}{16.1} v_f \right) \quad (2.15)$$

où L_f dénote la longueur du véhicule suiveur. On perçoit que la distance de sécurité augmente linéairement avec la vitesse du véhicule suiveur v_f , cette stratégie de modélisation prend en compte le temps de réaction du conducteur.

Brackstone et McDonald [Bra00] ont développé une approche formulée par Kometani et Sasaki (1959) ; cette approche propose une distance de sécurité obtenue par la manipulation de l'équation newtonienne du mouvement dans laquelle une collision serait produite si le conducteur du véhicule de devant posait un acte de réaction imprévisible. La formule est donnée comme suit :

$$d_s(t - \tau) = \alpha v_f^2(t - \tau) + \beta_2 v_f^2(t) + \beta_1 v_f(t) + \beta_0 \quad (2.16)$$

où $\alpha, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ sont des constantes, avec v_f et v_i les vitesses du véhicule suivi et suiveur respectivement et où τ est le temps de réaction du conducteur.

Cette formule était bien développée par Gipps (1981), et elle est employée dans des simulations de circulation routière. De même dans [Chien92] Chien et Ioannou ont proposé une règle de distance de sécurité, comme suit :

$$d_s = \alpha_1(v_f^2 - v_i^2) + \alpha_2 v_f + \alpha_3 \quad (2.17)$$

où $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sont des constantes de conception. On constate dans cette approche que le temps de réaction du conducteur est possiblement annulé en utilisant l'automatisation et de bons capteurs, ce qui réduit de manière significative l'inter-distance sans affecter la sécurité.

Ces modèles produisent des résultats souhaitables au point de vue conception, mais lorsque on examine un cas particulier dans la pratique au cours d'un freinage d'urgence, on constate que les véhicules peuvent présenter des différences importantes de vitesse de façon transitoire. Alors pendant ce genre de manœuvre, l'inter-distance tend à diminuer, contrairement à ces modèles qui indiquent que la distance à respecter doit être augmentée. Ce qui veut dire que la distance de sécurité présentée dans ces modèles est toujours violée pendant un freinage d'urgence.

2.3.2 Modèles basés sur stimulus-réponse

Le principe est basé sur l'équation suivante :

$$réponse = sensibilité \times stimulus \quad (2.18)$$

La logique de ce type de modélisation de l'inter-distance est basée sur le stimulus d'un conducteur. Ce qui veut dire, la réponse concerne l'accélération ou le freinage du véhicule. Ce dernier est déclenché selon la sensibilité visuelle du conducteur d'un manque d'espace entre lui et le véhicule de devant.

On cite quelques modèles de l'inter-distance basés sur le principe de stimulus-réponse. Dans [Chan58], Chandler et al. ont développé un modèle linéaire d'inter-distance exprimé mathématiquement par :

$$a_f = \gamma(v_l(t - \tau) - v_f(t - \tau)) \quad (2.19)$$

où γ est un facteur de sensibilité.

D'autres chercheurs [Gaz59] [Gaz61] ont développé l'approche de Chandler en proposant un nouveau facteur non linéaire de sensibilité.

$$a_f = \frac{cv_f^p(t)}{\Delta x^q(t - \tau)}(v_l(t - \tau) - v_f(t - \tau)) \quad (2.20)$$

où Δx correspond à un espace évalué à un instant $t - \tau$. P et q sont des paramètres de conception.

Cette approche demande aux chercheurs de travailler sur la tentative qui permettra de définir la meilleure combinaison des constantes P et q pour le terme de sensibilité. Ces valeurs de P et q sont liées au changement de l'état du trafic. Ces modèles sont employés

moins fréquemment en raison du grand nombre de résultats contradictoires qui dépendent du choix de P et q .

Dans [Bra00], un modèle linéaire est proposé. Il inclut des termes additionnels pour l'adaptation de l'accélération une fois que le véhicule à l'avant freine. Le modèle est représenté par la formule suivante :

$$a_f = C_1 \Delta v(t - \tau) + C_2 (\Delta x(t - \tau) - D_{des}(t)) \quad (2.21)$$

où $\Delta v = v_f(t - \tau) - v_f(t - \tau)$ représente la vitesse relative, et $D_{des}(t)$ est une distance désirée donnée par :

$$D_{des}(t) = \alpha_1 + \alpha_2 v_f(t - \tau) + \alpha_3 a_f(t - \tau) \quad (2.22)$$

Xing (1985) a proposé un modèle plus complexe, qui contient quatre termes principaux :

$$a_f(t) = \alpha \frac{\Delta v(t - \tau)}{\Delta x^l(t - \tau)} + \beta \frac{\Delta x(t - \tau_2) - D_{des}(v_f(t - \tau_2))}{\Delta x^m(t - \tau_2)} - \gamma \sin \theta + \lambda(v_{des} - v_f) \quad (2.23)$$

$$\text{où } D_{des}(v) = \alpha_0 + \alpha_1 v_f + \alpha_2 v_f^2 + \alpha_3 v_f^3 \quad (2.24)$$

Le premier terme est lié à la conduite "standard", le deuxième correspond à une accélération pendant un embouteillage (on prend en considération un temps de réaction τ_2 , généralement différent de τ), le troisième est pour l'effet de gradient (qui peut être ignoré), et le quatrième terme pour une utilisation dans un régime de circulation libre.

α, β, γ et λ sont des paramètres de conception et V_{des} correspond à la vitesse désirée.

2.3.3 Modèle basé sur psycho-espacement

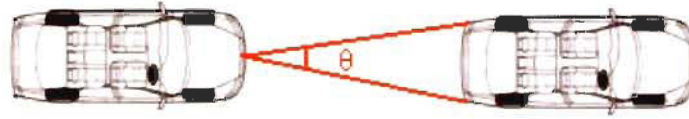


Figure 2.4 : Angle visuel du conducteur suiveur

L'idée de cette approche de modélisation est que les conducteurs pourraient percevoir qu'ils s'approchent du véhicule de devant grâce au changement de l'angle visuel de celui-ci. Fancher [Fan01] a développé un modèle d'accélération du véhicule suiveur, tel que cette accélération est proportionnelle à la perception du conducteur sur le taux de changement de l'angle visuel θ :

$$a_f(t) = \beta \dot{\theta} \quad (2.25)$$

2.3.4 Modèles basés sur le périmètre de sécurité et de confort

Ce type de modélisation de l'inter-distance est développé dans [Mar07]. Il est défini sur un concept d'utilisation "ressorts-amortisseurs virtuels", où le véhicule se comporte comme s'il y avait des ressorts imaginaires et des amortisseurs agissant avec le véhicule maître. La structure de conception inclut des spécifications de sécurité et de confort de façon simple.

Le système d'étude est décrit par la figure 2.5. Les véhicules maître-esclaves sont présentés comme des points sans masse, avec des coordonnées longitudinales $x_2(t)$ et $x_1^r(t)$ et des accélérations w et u respectivement.

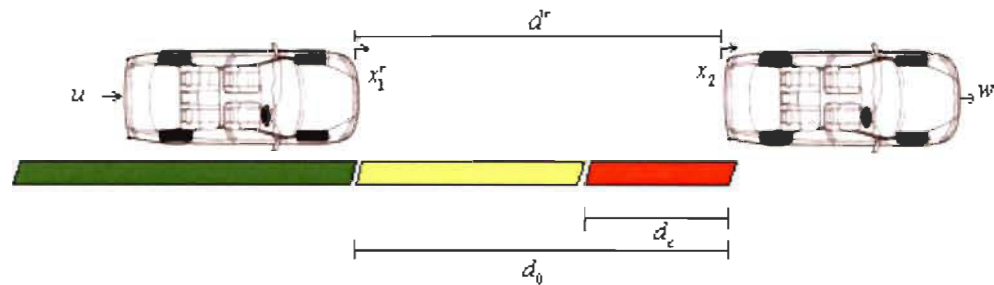


Figure 2.5 : Système d'inter-distance [Mar07]

Cette figure caractérise trois niveaux de sécurité :

- La zone verte $d^r > d_0$ présente la région la plus sécuritaire à la présence d'un obstacle. d_0 c'est l'inter-distance nominale de sécurité.
- La zone jaune $d_0 \geq d^r > d_c$. Avec $d_0 - d_c$ qui représente l'inter-distance à respecter pour éviter une collision pendant un freinage infini de la part du véhicule maître.
- La zone rouge $d^r \leq d_c$ est la zone qui représente la plus grande possibilité d'avoir une collision. d_c est l'inter-distance critique minimale à imposer.

Les informations concernant la vitesse et l'accélération du véhicule maître sont estimées à partir des capteurs appropriés. L'étude du système a imposé des contraintes de sécurité. Ces contraintes ont été utilisées en tant que limites sur les états des véhicules esclaves et ses dérivés du temps. Le tableau 2.1 résume ces contraintes.

Tableau 2.1 : Contraintes de sécurité

Condition pour éviter une collision $d'' \geq d_c$
Capacité de freinage maximale $\ddot{x}_1''(t) \geq -B_{\max}$
Vitesse maximale initiale à l'instant de franchir la zone jaune $\dot{x}_1''(t) \leq V_{\max}$
Condition de confort concernant le Jerk maximum $\ddot{x}_1'''(t) \leq J_{\max}$

On commence l'étude de l'inter-distance en définissant les grandeurs physiques suivantes.

Soit la dynamique du véhicule de référence qui est définie par l'équation suivante :

$$\ddot{x}_1'' = u \quad (2.26)$$

Ainsi la dynamique de l'inter-distance est écrite comme suit :

$$\ddot{d}'' = \ddot{x}_2 - u \quad (2.27)$$

Nous définissons l'erreur de l'inter-distance par rapport à la grandeur nominale d_0 (constante de conception) par :

$$\tilde{d} = d_0 - d'' \quad (2.28)$$

La dynamique de cette grandeur d'erreur est donnée par :

$$\ddot{\tilde{d}} = u - \ddot{x}_2 \quad (2.29)$$

La structure proposée pour u est une fonction non linéaire qui représente un modèle de ressort amortisseur de la forme générale :

$$u = -c|\dot{\tilde{d}}|\tilde{d} - k\tilde{d}, \text{ avec } \tilde{d} \geq 0. \quad (2.30)$$

où $\tilde{d} \geq 0$ représente la condition correspondant au véhicule dans la zone jaune (ou rouge).

L'utilisation du ressort présente un inconvénient. Le ressort est non dissipatif et si l'amortisseur est trop faible, il peut produire un effet oscillant qui peut même introduire des vitesses négatives lorsque le système est presque à l'arrêt. Ceci peut être corrigé par un bon ajustement de l'amortisseur. Cependant dans [Mar07], le ressort est retiré et le modèle devient comme suit :

$$u = -c|\dot{\tilde{d}}|\tilde{d}, \quad \forall \tilde{d} \geq 0 \quad (2.31)$$

Donc la dynamique de l'erreur est représentée par l'équation suivante :

$$\ddot{\tilde{d}} = -c|\dot{\tilde{d}}|\tilde{d} - \ddot{x}_2 \quad (2.32)$$

L'intérêt de cette structure de l'inter-distance est de déterminer les valeurs des paramètres de conception c et d_0 , tout en respectant les contraintes imposées dans le tableau 2.1, ceci afin d'empêcher le véhicule d'atteindre la région critique d_c , dans le cas d'un freinage brusque du véhicule maître.

On utilise les conditions initiales à $t = 0$ (lorsque le véhicule de référence franchit la région jaune) pour résoudre analytiquement l'équation (2.32) :

$$\tilde{d} = -\frac{c}{2}\tilde{d}(t)^2 - \dot{x}_2(t) + \beta \quad (2.33)$$

En utilisant les conditions initiales pour déterminer β :

$$\beta = \dot{\tilde{d}}(0) + \frac{c}{2} \tilde{d}(0)^2 + \dot{x}_2(0) = \dot{x}_1'(0) \quad (2.34)$$

Les valeurs admissibles du paramètre c , sont déterminées en utilisant le calcul de l'accélération.

$$\ddot{x}_1' = -c \left| \tilde{d} \right| \left(-\frac{c}{2} \tilde{d}(t)^2 - \dot{x}_2(t) + \beta \right) \quad (2.35)$$

Il est possible d'obtenir un extremum de la fonction (2.35)

$$\frac{\partial \ddot{x}_1'}{\partial \tilde{d}} = -c \left| \tilde{d} \right| (-c \tilde{d}) - c \left(-\frac{c}{2} \tilde{d}(t)^2 - \dot{x}_2(t) + \beta \right) \text{signe}(\tilde{d}) \quad (2.36)$$

Alors l'accélération maximale est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial \ddot{x}_1'}{\partial \tilde{d}} = 0 \quad (2.37)$$

Ce qui donne l'équation suivante :

$$\tilde{d} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\beta - \dot{x}_2}{c}} \quad (2.38)$$

En substituant (2.38) dans (2.35) :

$$\ddot{x}_1' = -\frac{2}{3} (\beta - \dot{x}_2) \sqrt{\frac{2}{3} c (\beta - \dot{x}_2)} \quad (2.39)$$

Donc on déduit la valeur maximale de freinage par :

$$\ddot{x}_1'(t) \geq -\frac{2}{3} \dot{x}_1'(0) \sqrt{\frac{2}{3} c \dot{x}_1'(0)} \geq -B_{\max} \quad (2.40)$$

Cette dernière équation porte une inégalité, en fournissant une limite supérieure pour c :

$$c \leq \frac{27}{8} \frac{B_{\max}^2}{\dot{x}_1'(0)^3} \quad (2.41)$$

Par la même méthode de calcul, on cherche la limite inférieure pour c . Pour cela on calcule l'intégrale de l'équation (2.31) :

$$\dot{x}_1'(t) = -\frac{c}{2}\tilde{d}(t)^2 + \dot{x}_1'(0) \quad (2.42)$$

L'équation (2.42) expose une relation explicite entre la vitesse du véhicule de référence et la distance de pénétration $\tilde{d}$ (2.28).

Alors on peut trouver un c à condition que $\dot{x}_1'(0) \leq V_{\max}$, tel que la distance critique d_c ne soit pas franchie.

$$\tilde{d}(t) = \sqrt{\frac{2(\dot{x}_1'(0) - \dot{x}_1'(t))}{c}} \quad (2.43)$$

On peut déduire la distance maximale de pénétration en considérant que le véhicule de référence commence à décélérer lorsqu'il franchit la zone jaune, alors :

$$\tilde{d}_{\max}(t) = \sqrt{\frac{2\dot{x}_1'(0)}{c}} \leq d_0 - d_c \quad (2.44)$$

Donc on déduit la limite inférieure de c :

$$c \geq \frac{2\dot{x}_1'(0)}{(d_0 - d_c)^2} \quad (2.45)$$

A partir des deux inégalités (2.41) et (2.45) on déduit la distance de sécurité d_0 en fonction des limites imposées $V_{\max}$, d_c , et $B_{\max}$:

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{16}{27} \frac{V_{\max}^2}{B_{\max}}} + d_c \quad (2.46)$$

2.4 Conclusion

Plusieurs stratégies de commande longitudinales sont basées sur la distance de sécurité obtenue à partir des équations newtoniennes de mouvement. Principalement, ces

inter-distances ne sont pas considérées comme sûres, puisque de point de vue pratique, ces distances sont violées dans le cas d'un freinage d'urgence.

Nous avons présenté à la section 2.3.4 un nouveau modèle de l'inter-distance basé sur des lois de physique (force ressort-amortisseur). Le modèle du ressort est enlevé en raison que ce dernier présente un inconvénient, il est non dissipatif, on peut l'éviter par conception en imposant une dynamique appropriée. Cependant avec le modèle de l'amortisseur, l'architecture du contrôle de l'inter-distance a démontré son efficacité d'empêcher le véhicule d'atteindre la région critique d_c . L'intérêt de cette structure d'inter-distance est de déterminer les valeurs des paramètres de conception c et d_0 qui correspondent à des spécifications de sécurité et de confort limites (vitesse maximale, capacité de freinage maximale et la distance critique).

L'élément de l'amortisseur a notamment été choisi pour bâtir une architecture de contrôle adéquate afin d'effectuer la gestion de l'inter-distance (gérer la distance de sécurité dans la zone jaune et éviter que le véhicule ne franchisse la zone critique).

Si on considère seulement le terme de l'amortisseur dans la structure de l'inter-distance, le système de contrôle sera incapable de régler la gestion de distance de sécurité lorsque le véhicule est soumis à des perturbations externes (par exemple : le véhicule descend une côte). En prenant cet exemple, la distance de sécurité risque d'être violée. Cela nécessitera d'inclure une force effective représentée par un ressort. Ce dernier appliquera deux forces opposées, une envers le véhicule maître (dans ce cas : le ressort poussera le véhicule maître qui accélérera) et l'autre force envers le véhicule esclave (le ressort poussera le véhicule esclave qui décélérera).

La proposition du modèle de ressort-amortisseur dans la structure du contrôle de l'inter-distance sera développée au cours du prochain chapitre, soit la modification de la structure de l'inter-distance et la méthode de gestion des contrôleurs durant une perturbation externe (freinage brusque).

Chapitre 3 —Stratégies de commande

3.1 Introduction

Le contrôle d'un convoi de véhicules par imposition d'impédances, consiste à utiliser une série de ressorts-amortisseurs entre chaque paire de véhicules adjacents. Afin d'assurer la sécurité entre les véhicules du convoi, il est nécessaire de régler la distance entre les véhicules à une valeur pré assignée. En raison de ce fait, les ressorts-amortisseurs sont utilisés pour représenter les forces d'interactions entre les véhicules du convoi.

Différentes structures de commande seront étudiées dans le système de convoi. Ces dernières sont : structures de commande globale, locale et mixte. Leur étude permettra d'un côté d'évaluer la structure la plus robuste au niveau de la stabilité, et d'un autre côté d'améliorer l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules du convoi.

Nous exposons les modifications apportées à la structure de commande de l'inter-distance en proposant une variation des coefficients du contrôleur de l'inter-distance pour adapter un comportement adéquat du système de convoi dans les situations limites (accélération maximale et/ou freinage d'urgence).

3.2 Modélisation de la structure de commande

3.2.1 Contrôleur de vitesse

Dans cette partie nous voulons concevoir un contrôleur local de vitesse PID pour chaque véhicule du convoi. Le rôle de ce contrôleur est de corriger l'erreur de vitesse du

véhicule lorsque ce dernier est soumis à des perturbations internes (changement de masse...) et/ou externes (effet de l'aérodynamique...).

Le contrôleur PID permet trois actions simultanées en fonction de l'erreur :

- Une action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain K_c
- Une action intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps τ_i
- Une action dérivée : l'erreur est dérivée suivant un temps τ_d

L'ajustement des paramètres du PID influence la réponse du système de la manière suivante pour un système de 2^e ordre typique :

- gain K_c : lorsque K_c augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.
- τ_i : lorsque $1/\tau_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement important. Le temps d'établissement s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle.
- τ_d : lorsque τ_d augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement du régime stationnaire est meilleur. Pas d'influence sur l'erreur statique.

Pour ajuster ces paramètres, il existe plusieurs méthodes. Les plus utilisées sont :

- la méthode du lieu de Nyquist inverse (utilise le diagramme de Nyquist) ;
- la technique des pôles et des zéros ;
- la méthode d'ajustement itérative convergente ;
- la méthode de Ziegler/Nichols ;

Plusieurs structures sont possibles pour combiner les trois effets sur l'erreur (série, parallèle ou mixte) ; on présente à la figure 3.1 une structure parallèle de PID idéal.

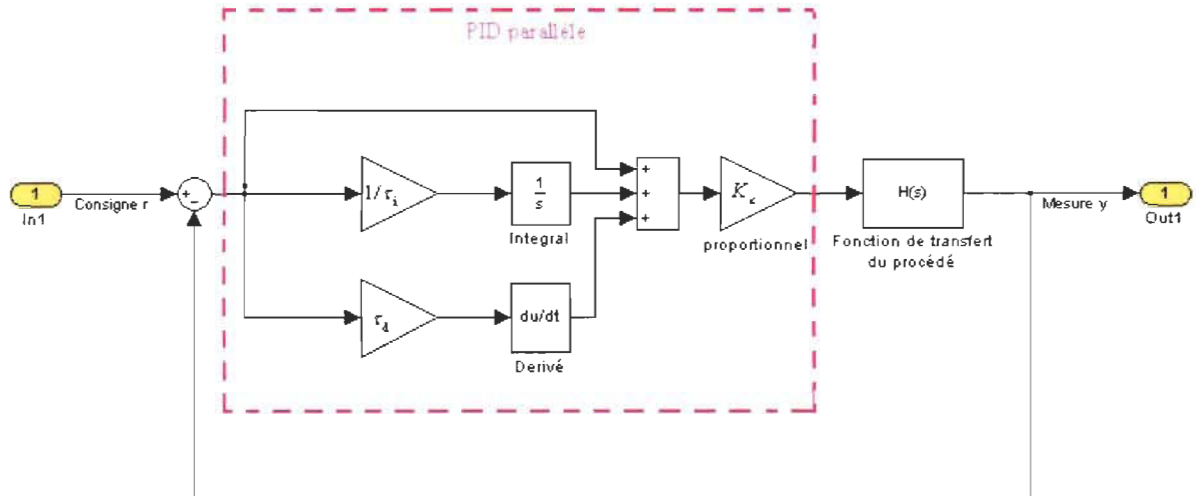


Figure 3.1 : Structure de PID idéal

Dans l'industrie, la synthèse d'un contrôleur PID parallèle idéal est irréalisable car au niveau de sa fonction de transfert, l'ordre du numérateur est supérieur à l'ordre du dénominateur. Alors, en pratique on ajoute toujours un paramètre sur l'action dérivée de manière à obtenir un ordre 2 au numérateur et au dénominateur.

On définit un contrôleur PID filtré en remplaçant l'action dérivé $\tau_d \cdot s$ par

$$\frac{\tau_d \cdot s}{1 + \alpha \cdot \tau_d \cdot s} \text{ avec } \alpha \ll 1 \text{ (Figure 3.2).}$$

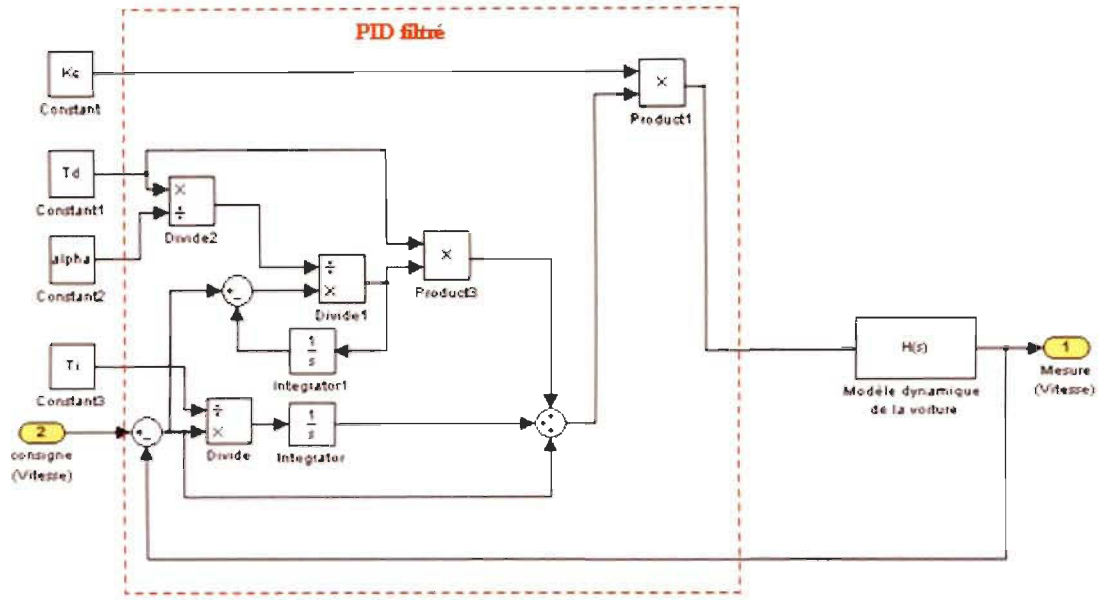


Figure 3.2 : Contrôleur PID filtré

La fonction de transfert du PID filtré avec la transformée de Laplace est donnée par l'équation suivante :

$$C(s) = K_c \frac{(\tau_d \tau_i + \alpha \tau_d \tau_i) \cdot s^2 + (\tau_i + \alpha \tau_d) \cdot s + 1}{\alpha \tau_d \tau_i \cdot s^2 + \tau_i s} \quad (3.1)$$

3.2.2 Contrôleur de l'inter-distance

La connexion entre deux véhicules est réalisée par un modèle d'interaction du type impédance contrôlée. Ce lien virtuel de connexion entre deux véhicules est créé par un système ressort de raideur K , amortisseur de coefficient C et une longueur à vide D_0 . Les forces exercées par ce système sont composées de : force ressort $F_{ressort}$ et une force d'amortisseur F_{amort} . La figure 3.3 montre trois véhicules formant un convoi. Chaque

véhicule est représenté par sa position $\vec{X}_i = [x_i, y_i]$. La masse du véhicule est notée par m_i .

L'inter-distance entre les véhicules est donnée par :

$$D = X_{i-1} - X_i$$

où X_{i-1} et X_i représentent respectivement la position du véhicule avant et arrière.

Les expressions des forces subies par le véhicule sont :

- Force ressort $F_{ressort}$:

$$F_{ressort} = -K(D - D_0) \quad (3.2)$$

- Force amortisseur F_{amort} :

$$F_{Amort} = -C \cdot \dot{D} \quad (3.3)$$

- Force de frottement avec la chaussée F_{frott}

$$F_{frott} = -C_1 \cdot \dot{X}_i \quad (3.4)$$

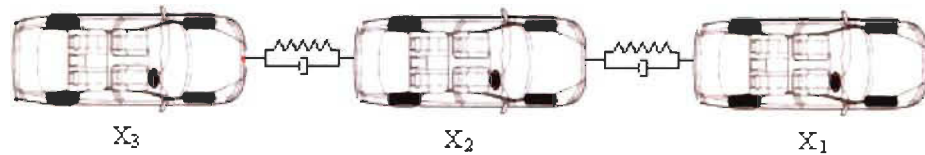


Figure 3.3 : Modèle ressorts amortisseurs virtuels

Sur Matlab/Simulink on modélise le ressort-amortisseur par le schéma bloc illustré sur la figure 3.4.

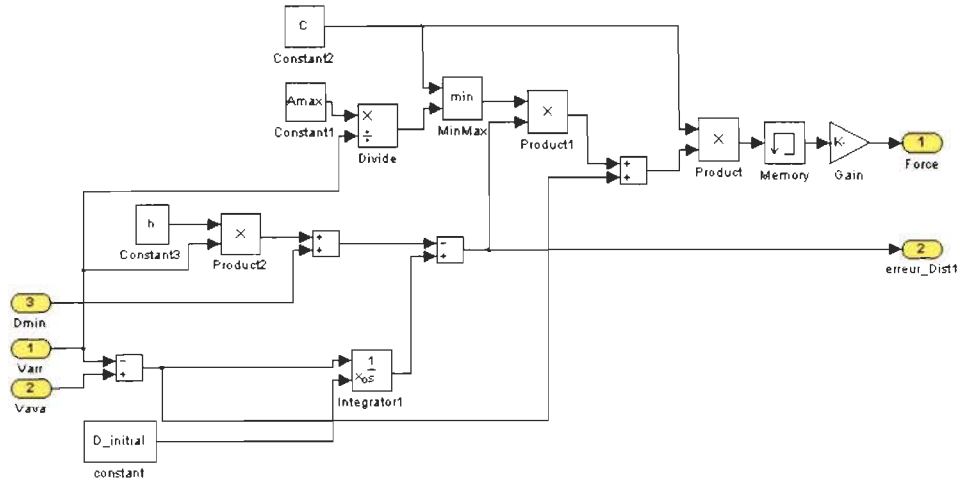


Figure 3.4 : Modèle de contrôle de l'inter-distance de sécurité

La stratégie de contrôle de l'inter-distance présentée dans cette section est basée sur un ressort variable. L'équation de ce modèle est développée plus en détail à la section 3.6.2. La logique de ce type de modélisation est basée sur le principe de Stimulus-réponse qui est décrit au chapitre 2. Il est à noter que ce modèle de contrôle de l'inter-distance a été développé par Daviet dans [Dav96].

On considère à l'instant t , la distance relative D entre deux véhicules consécutifs qui est donnée par l'équation suivante :

$$D = \int (V_{i-1} - V_i) dt + D_initial \quad (3.5)$$

où $D_initial$ représente la distance initiale entre les véhicules, soit à l'instant $t=0$. V_{i-1} et V_i représentent respectivement la vitesse du véhicule avant et arrière.

Il est à noter que ce modèle de l'inter-distance est développé pour le cas de véhicules se déplaçant en ligne droite, un derrière l'autre.

Dénotons D_0 , la distance de sécurité. Cette distance varie en fonction de la vitesse du véhicule suiveur V_j :

$$D_0 = h \cdot V_i + D_{\min} \quad (3.6)$$

où $D_{\min}$ représente la distance minimale de sécurité à respecter.

Maintenant que les forces sont connues, il suffit d'appliquer le principe fondamental de la dynamique pour connaître le comportement du véhicule par rapport aux interactions qu'il subit.

$$m_i \ddot{X}_i = F_{PID} + F_{i-1} - F_i - F_{frott} \quad (3.7)$$

avec F_{i-1} et F_i , respectivement la force avant et arrière de ressort amortisseur appliquée sur le véhicule.

Les paramètres du contrôleur seront déterminés à l'annexe C pour les stratégies de commande présentées à la section suivante.

3.3 Stratégies de commande appliquées au système de convoi

Les véhicules sont caractérisés par un comportement (soit en accélération, soit en décélération) et par des interactions (par exemple : interaction entre deux véhicules). La définition des stratégies de commande impose d'identifier les deux différents rôles des véhicules dans le système de convoi. Le véhicule a deux rôles : soit il est le véhicule de tête (maître), soit il est un véhicule suiveur (esclave). Le véhicule de tête interagit directement avec l'environnement (route) tandis que le véhicule suiveur interagit avec le véhicule

devant lui ainsi que son environnement. Selon la nature des interactions entre véhicules, on définit trois stratégies de commande (voir la figure 3.5).

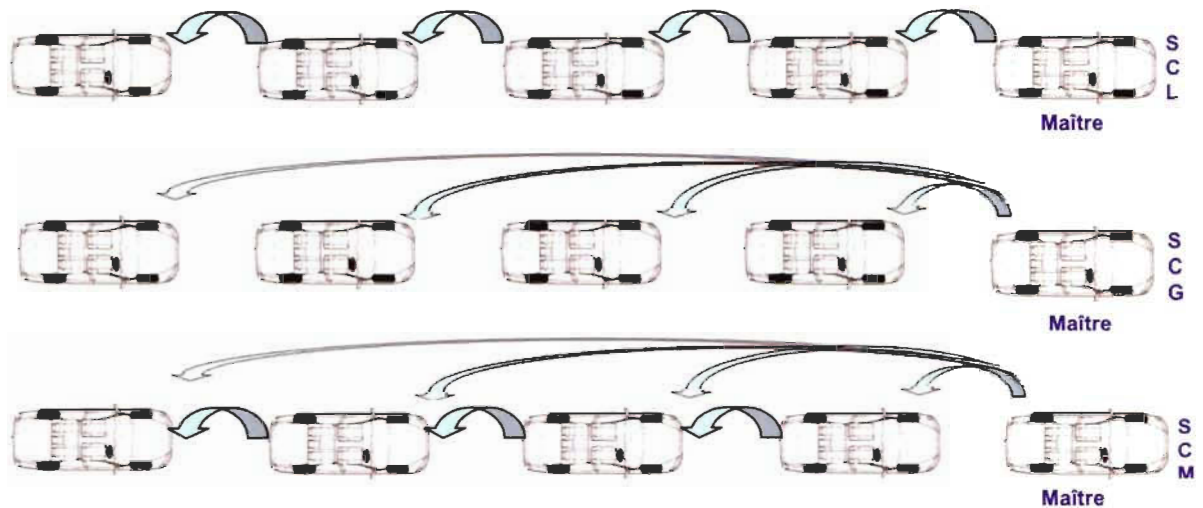


Figure 3.5 : Stratégies de commande

3.3.1 Stratégie de commande locale (SCL)

Cette stratégie de commande est basée sur un contexte local. Le convoi est commandé de proche en proche. En effet ce concept permet de contrôler l'inter-distance entre deux véhicules consécutifs. Chaque véhicule est contrôlé par un PID. On attribue une consigne de vitesse au véhicule en tête de convoi (maître). La vitesse de consigne des autres véhicules qui suivent dépendra toujours de la vitesse du véhicule précédant. Un véhicule réagit directement aux interactions avec le véhicule qui le précède.

La modélisation de stratégie de commande locale sera présentée sur Matlab/Simulink. On présentera tout d'abord le modèle de convoi de quatre véhicules, et par la suite un convoi de dix véhicules.

On montre dans la figure 3.6, les liens de la connexion des vitesses entre les véhicules. Le modèle dynamique du véhicule est présenté par la loi de Newton (3.7). Les effets d'interactions entre les véhicules seront présentés par les modèles des forces ressort-amortisseur (voir Fig. 3.7). Ces derniers présentent aussi les forces agissant en avant et en arrière sur le véhicule.

La figure 3.7 présente la structure de commande sur un convoi de dix véhicules. Pour éviter l'encombrement des connexions entre les véhicules, on utilise des blocks "From" et "Goto".

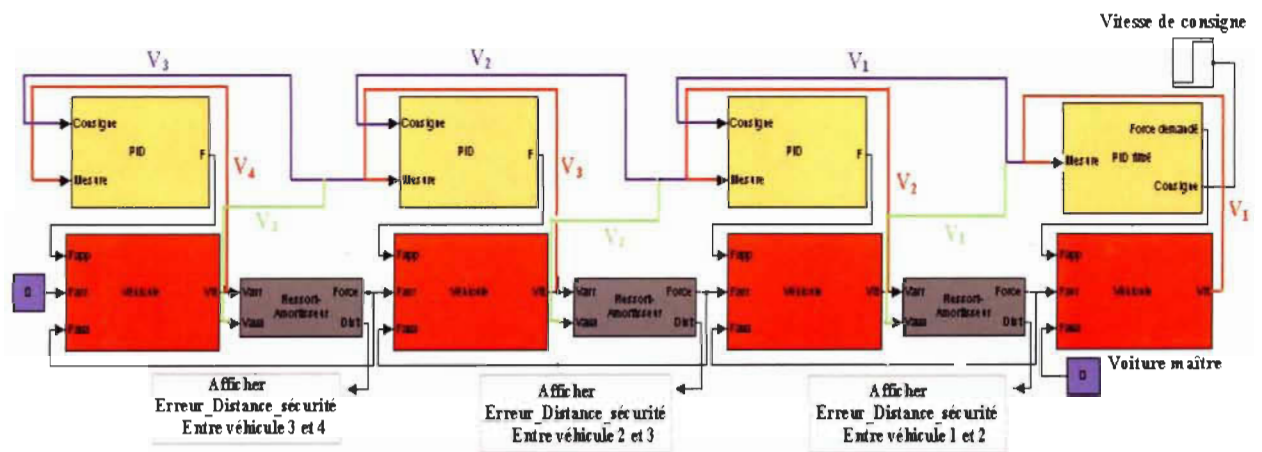


Figure 3.6 : Stratégie de commande locale sur 4 véhicules

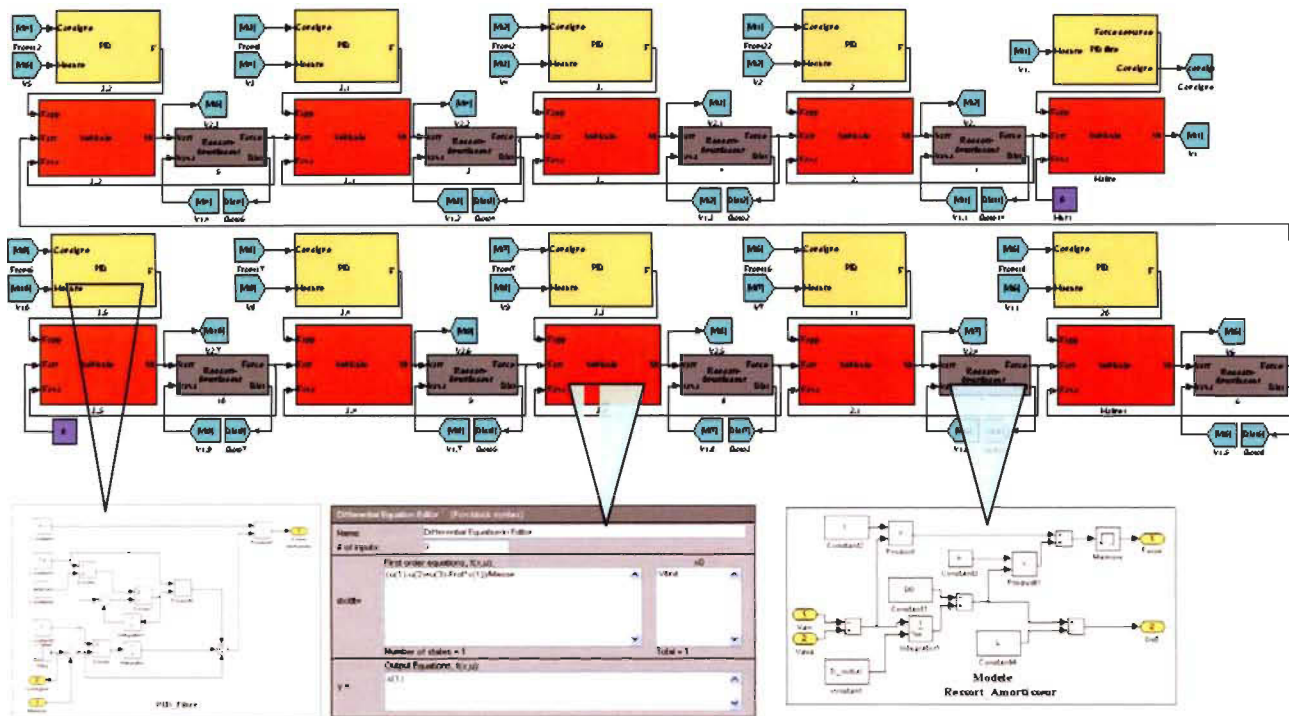


Figure 3.7 : Stratégie de commande locale sur 10 véhicules

3.3.2 Stratégie de commande globale (SCG)

Dans cette stratégie de commande, on attribue une consigne de vitesse au véhicule en tête de convoi (maître). La vitesse de consigne des autres véhicules qui suivent dépendra toujours de la vitesse du véhicule maître. Un véhicule réagit directement aux interactions avec le véhicule maître.

La représentation de la stratégie de commande globale sur un convoi de dix véhicules, sera modélisée sur Matlab/Simulink. On commencera par appliquer la stratégie de commande sur quatre véhicules. La vitesse de chaque véhicule sera contrôlée par un correcteur PID, tel que la vitesse du véhicule maître représente la consigne pour tous les véhicules esclaves.

Dans la figure 3.8, nous montrons la façon de modéliser cette structure de commande sur quatre véhicules et sur dix véhicules à la figure 3.9.

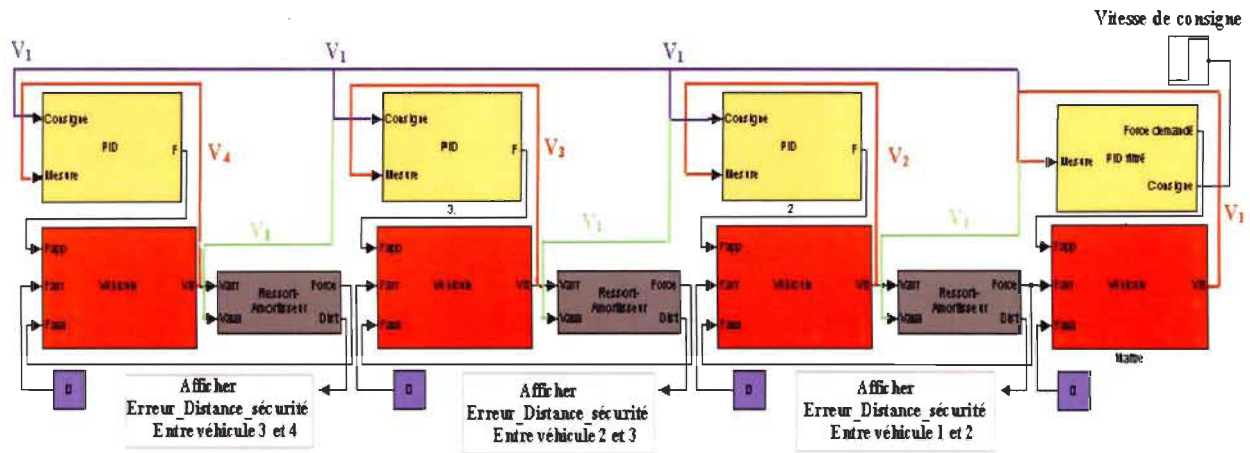


Figure 3.8 : Stratégie de commande globale sur 4 véhicules

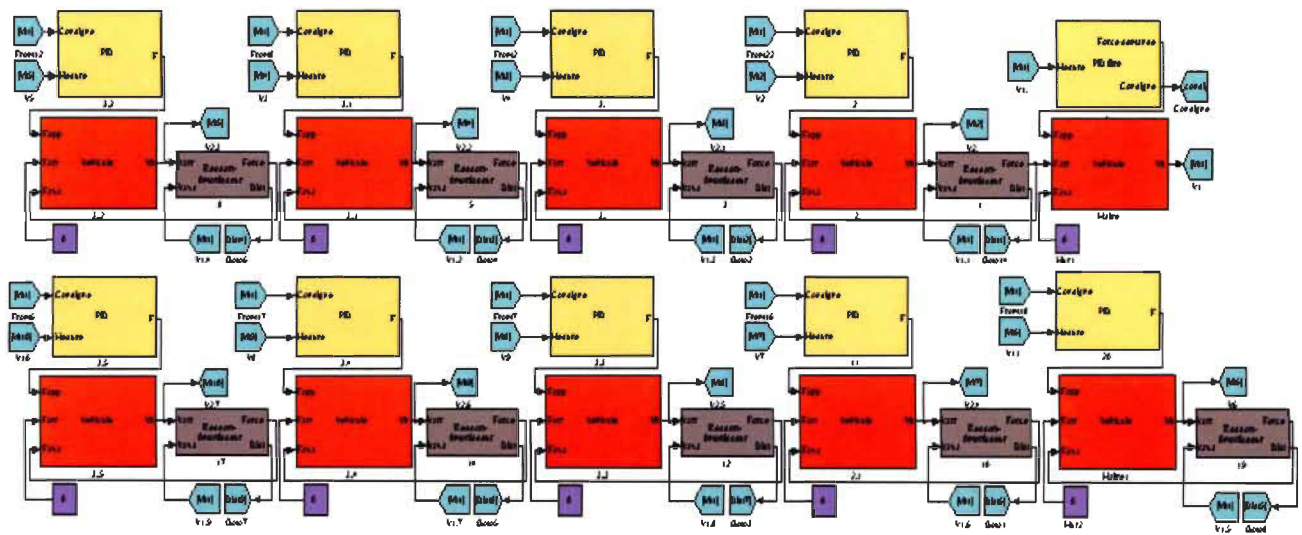


Figure 3.9 : Stratégie de commande globale sur 10 véhicules

3.3.3 Stratégie de commande mixte (SCM)

Dans cette stratégie de commande, on attribue une consigne de vitesse au véhicule en tête de convoi (maître). Le contrôle de la vitesse des autres véhicules qui suivent, dépendra toujours de la vitesse du véhicule maître (stratégie globale). Par contre le contrôle d'inter-distance se fait en suivant la stratégie locale. Soit l'effet d'interaction entre deux véhicules consécutifs est lié principalement à celui en avant.

La représentation de la stratégie de commande mixte sur un convoi de quatre et de dix véhicules, sera modélisée sur Matlab/Simulink.

Dans les figures 3.10 et 3.11, on montre la structure de commande sur quatre véhicules et sur dix véhicules.

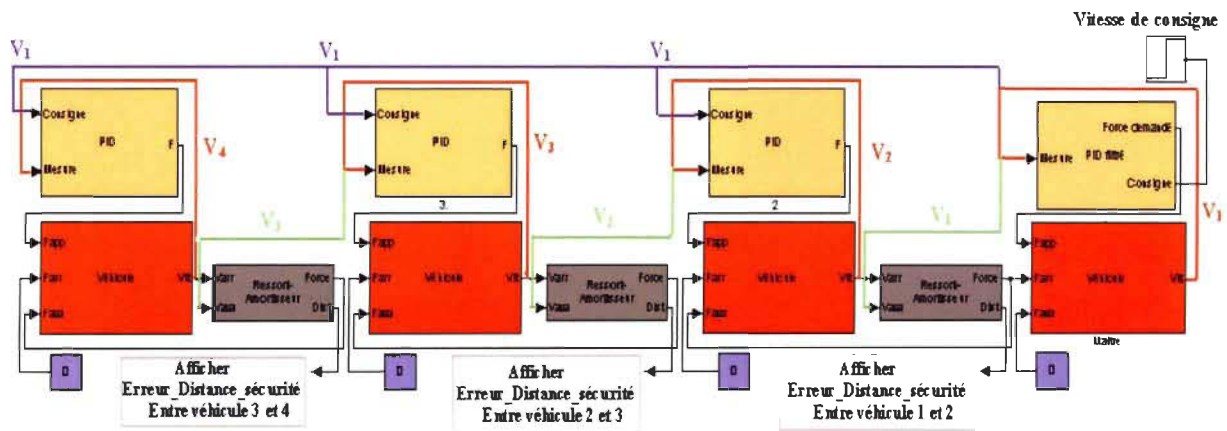


Figure 3.10 : Stratégie de commande mixte sur 4 véhicules

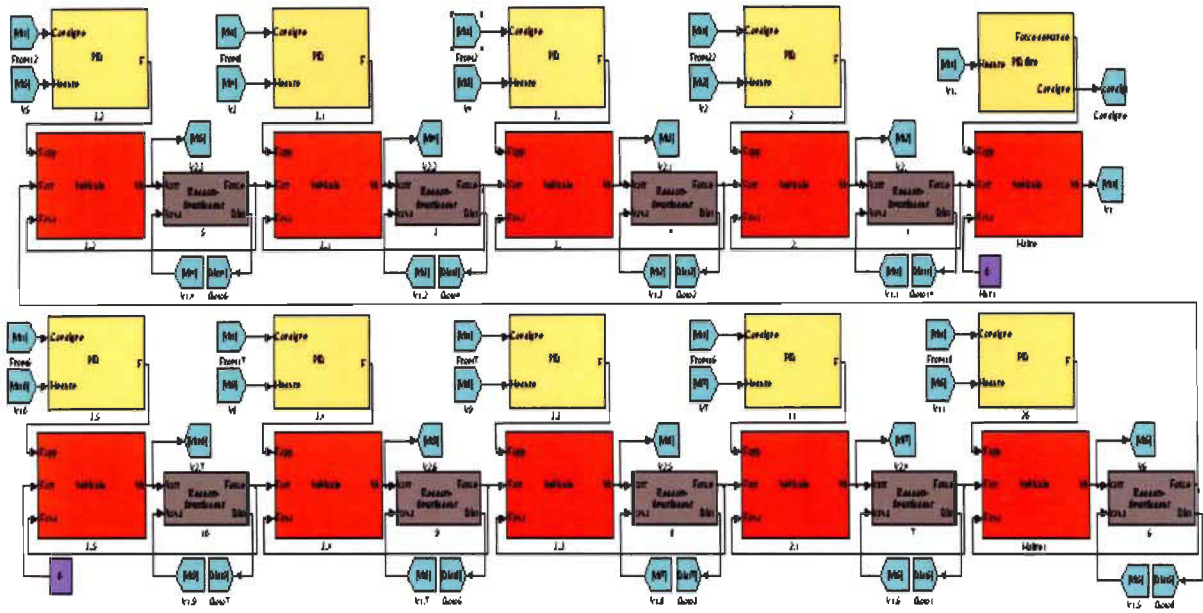


Figure 3.11 : Stratégie de commande mixte sur 10 véhicules

3.4 Système de contrôle de l'inter-distance pour un convoi des véhicules basé sur un modèle classique d'interaction par ressort-amortisseur

Le système de contrôle du convoi tel qu'illustré à la figure 3.12 comprend un contrôleur local de vitesse PID, et un contrôleur de l'inter-distance basé sur un modèle classique d'un ressort amortisseur.

Pour la simulation, nous avons commencé par un système de convoi de trois véhicules qui représente une structure d'un système de vibration de trois masses reliées par une chaîne de ressorts-amortisseurs. Pour analyser le comportement du système, nous avons établi un modèle mathématique qui se compose de trois équations différentielles :

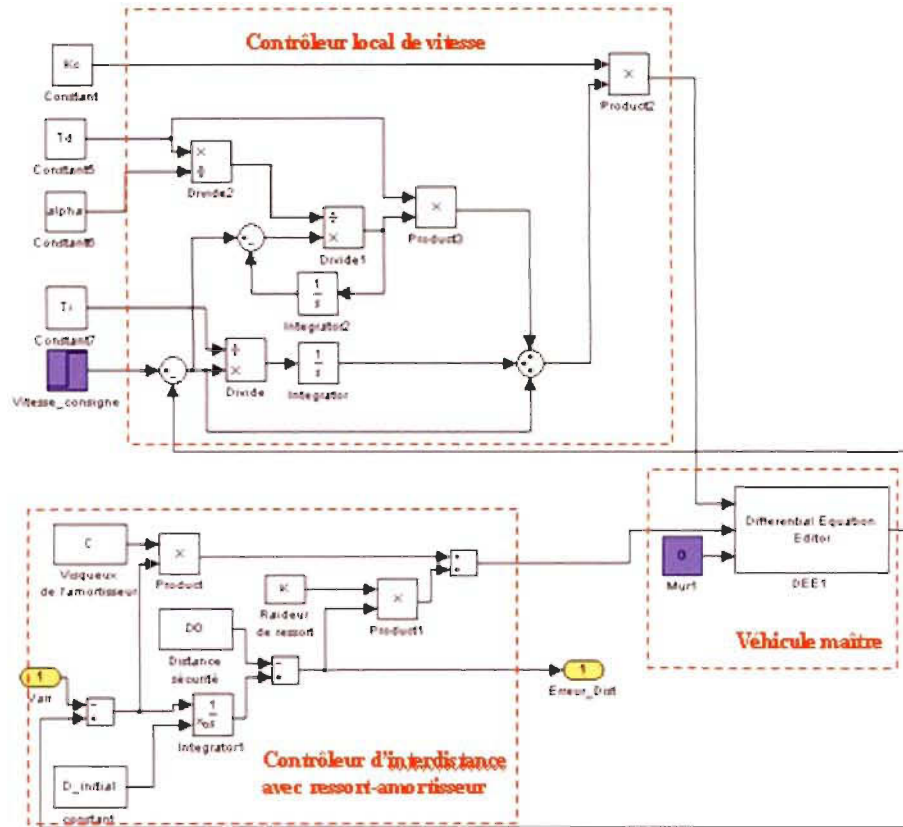


Figure 3.12 : Modèle de contrôle de l'inter-distance par un ressort amortisseur classique

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 &= F_1 - k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_{120} - c'_1 \dot{x}_1 \\
 m_2 \ddot{x}_2 &= F_2 + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_2 - x_3) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2 x_{230} - k_1 x_{120} - c'_1 \dot{x}_2 \\
 m_3 \ddot{x}_3 &= F_3 + k_2(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2 x_{230} - c'_3 \dot{x}_3
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

où $X_1 = (x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1)$, $X_2 = (x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2)$, $X_3 = (x_3, \dot{x}_3, \ddot{x}_3)$ et x_0 représentent la position, la vitesse et l'accélération pour chaque véhicule par rapport à un référentiel fixe et x_{120} et x_{230} représentent la distance au repos entre les véhicules 1 et 2, et 2 et 3, respectivement.

F_1, F_2 et F_3 représentent les forces fournies par les contrôleurs locaux de vitesse PID pour chaque véhicule, et s'écrivent sous la forme :

$$\begin{aligned}
F_1 &= K_c(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1) + \frac{K_c}{\tau_i}(x_1^* - x_1) + K_c\tau_{Df}(\ddot{x}_1^* - \ddot{x}_1) \\
F_2 &= K_c(\dot{x}_2^* - \dot{x}_2) + \frac{K_c}{\tau_i}(x_2^* - x_2) + K_c\tau_{Df}(\ddot{x}_2^* - \ddot{x}_2) \\
F_3 &= K_c(\dot{x}_3^* - \dot{x}_3) + \frac{K_c}{\tau_i}(x_3^* - x_3) + K_c\tau_{Df}(\ddot{x}_3^* - \ddot{x}_3)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

où $\dot{x}_1^*, \dot{x}_2^*, \dot{x}_3^*, x_1^*, x_2^*, x_3^*, \ddot{x}_1^*, \ddot{x}_2^*$ et $\ddot{x}_3^*$ représentent successivement la vitesse, l'intégrale de vitesse et la dérivée de la vitesse de consigne pour les 3 véhicules.

Pour simplifier l'étude du système, on écrit les équations de mouvement sous forme matricielle, en incluant les expressions de F_1, F_2 et F_3 dans les équations (3.8)

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} m_1 + K_c\tau_{Df} & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + K_c\tau_{Df} & 0 \\ 0 & 0 & m_2 + K_c\tau_{Df} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + K_c + c' & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 + K_c + c' & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c' + K_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} k_1 + \frac{K_c}{\tau_i} & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 + \frac{K_c}{\tau_i} & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + \frac{K_c}{\tau_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} + k_1x_{120} \\ F_{20} - k_1x_{120} + k_2x_{230} \\ F_{30} - k_2x_{230} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

où F_{10}, F_{20} et F_{30} représentent la partie de la force du contrôleur PID qui dépend des consignes, et leur formule respective est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
F_{10} &= K_c\dot{x}_1^* + \frac{K_c}{\tau_i}x_1^* + K_c\tau_{Df}\ddot{x}_1^* \\
F_{20} &= K_c\dot{x}_2^* + \frac{K_c}{\tau_i}x_2^* + K_c\tau_{Df}\ddot{x}_2^* \\
F_{30} &= K_c\dot{x}_3^* + \frac{K_c}{\tau_i}x_3^* + K_c\tau_{Df}\ddot{x}_3^*
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Hypothèses :

On considère que les paramètres du ressort-amortisseur et du contrôleur de vitesse pour les trois véhicules sont les mêmes, ainsi que les inter-distances de repos.

$$\begin{aligned} k_1 &= k_2 = k \\ c_1 &= c_2 = c \\ x_{120} &= x_{230} = x_0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Et en régime permanent on a :

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \ddot{x}_2 = \ddot{x}_3 = \ddot{x}_1^* = \ddot{x}_2^* = \ddot{x}_3^* = 0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x}_f = cte \end{aligned} \quad (3.13)$$

avec $\dot{x}_f$, la vitesse finale en régime permanent.

Donc selon ces hypothèses, l'équation matricielle devient sous forme :

$$\begin{bmatrix} K_c + c' & 0 & 0 \\ 0 & K_c + c' & 0 \\ 0 & 0 & K_c + c' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{K_c}{\tau_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} + kx_0 \\ F_{20} \\ F_{30} - kx_0 \end{bmatrix} I_3 \quad (3.14)$$

Pour trouver l'expression du vecteur de déplacement $\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix}$, on doit chercher la matrice

$$\text{inverse de raideur } K^{-1} = \begin{bmatrix} k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{K_c}{\tau_i} \end{bmatrix}^{-1}.$$

Soit la matrice inverse K^{-1} :

$$K^{-1} = \frac{1}{\frac{K_c}{\tau_i} (k + \frac{K_c}{\tau_i}) (3k + \frac{K_c}{\tau_i})} \begin{bmatrix} (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & k^2 \\ k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{K_c}{\tau_i})^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) \\ k^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Il est à noter que le développement des calculs est présenté en annexe C.

Donc on déduit le vecteur de déplacement $\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{K_c}{\tau_i} x_1^* + kx_0 - c'\dot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_2^* - c'\dot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_3^* - kx_0 - c'\dot{x}_f \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Si on dérive l'équation (3.16), on trouve que :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1f} \\ \dot{x}_{2f} \\ \dot{x}_{3f} \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{K_c}{\tau_i} \dot{x}^* \\ \frac{K_c}{\tau_i} \dot{x}^* \\ \frac{K_c}{\tau_i} \dot{x}^* \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

où nous avons employé l'hypothèse que la vitesse de consigne finale de tous les véhicules est identique et égale à $\dot{x}^*$. Après développement de l'équation (3.17), on en déduit donc que la vitesse de chaque véhicule suit la vitesse de consigne (si le système est stable).

Notre objectif est de démontrer que l'erreur de position entre les véhicules de convoi égale à la position repos de ressort.

Selon les calculs présentés en annexe C, on a trouvé que l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules de convoi est égale à l'inter-distance de sécurité x_0 . Les expressions de ces inter-distances se définissent comme suit :

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= x_1 - x_2 = x_0 \\ \Delta p_2 &= x_2 - x_3 = x_0\end{aligned}\tag{3.18}$$

On détermine les coefficients du contrôleur de l'inter-distance, en se basant sur l'équation suivante :

$$A_2 = c\Delta V + k(\Delta X - d_{\min})\tag{3.19}$$

Avec $A_2, \Delta V = V_1 - V_2, \Delta X = X_1 - X_2$ sont respectivement l'accélération et l'erreur de vitesse et de position entre les deux véhicules adjacents 1 et 2.

On applique la transformée de Laplace pour déterminer la valeur des coefficients k et c sur l'équation (3.19), on trouve, pour $d_{\min} = 0$:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{c.s + k}{s^2 + c.s + k}\tag{3.20}$$

On approche l'équation (3.20) d'une fonction d'un filtre passe-bas :

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{1 + \frac{4}{c}s}{(1 + \frac{2}{c}s)^2}\tag{3.21}$$

en posant les valeurs suivantes pour les coefficients du contrôleur de l'inter-distance :

$$k = \left(\frac{c}{2} \right)^2 \quad (3.22)$$

3.5 Système de contrôle de l'inter-distance pour un convoi des véhicules basé sur un modèle classique d'interaction par ressort-amortisseur incluant le terme de distance de sécurité

La principale contrainte dans le système de convoi, est de maintenir une distance fixe entre les véhicules. On ne peut pas admettre une amplification de cette distance d'un véhicule à l'autre. Le risque d'un retard ou d'une perte de communication de la vitesse du premier véhicule dans le convoi, a poussé les auteurs dans [Dav96] de penser à ajouter un terme de distance de sécurité qui prendra en considération la vitesse du véhicule esclave.

Par la suite, on va modéliser le système de convoi sur trois véhicules présenté précédemment par l'équation (3.8), en incluant le terme de distance de sécurité hV_f dans le modèle. On évaluera l'influence du terme additionnel hV_f sur l'erreur de l'inter-distance de sécurité.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= F_1 - k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_{120} + h\dot{x}_2) - c'\dot{x}_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 &= F_2 + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_2 - x_3) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_{230} + h\dot{x}_3) - k_1(x_{120} + h\dot{x}_2) - c'\dot{x}_2 \\ m_3 \ddot{x}_3 &= F_3 + k_2(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2(x_{230} + h\dot{x}_3) - c'\dot{x}_3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Selon les hypothèses posées aux équations (3.12) et (3.13), on définit l'équation matricielle du système sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} K_c + c' - kh & 0 & 0 \\ 0 & K_c + c' & 0 \\ 0 & 0 & K_c + c' + kh \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{K_c}{\tau_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} + kx_0 \\ F_{20} \\ F_{30} - kx_0 \end{bmatrix} I_3 \quad (3.24)$$

On déduit le vecteur de déplacement $\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix}$ donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{K_c}{\tau_i} x_1^* + kx_0 - c'\dot{x}_f + kh\ddot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_2^* - c'\dot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_3^* - kx_0 - c'\dot{x}_f - kh\ddot{x}_f \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Pour déterminer les inter-distances entre les trois véhicules de convoi, on suit la même technique de calcul présentée en annexe C :

$$\begin{aligned} \Delta p_{1f} = x_{1f} - x_{2f} &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} (x_0 + h\dot{x}_f) + \frac{1}{1 + \frac{K_c}{\tau_i k}} (x_0 + h\dot{x}_f) = (x_0 + h\dot{x}_f) \\ \Delta p_{2f} = x_{2f} - x_{3f} &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} (x_0 + h\dot{x}_f) + \frac{1}{1 + \frac{K_c}{\tau_i k}} (x_0 + h\dot{x}_f) = (x_0 + h\dot{x}_f) \end{aligned} \quad (3.26)$$

3.6 Système de contrôle avec coefficients fixes et variables

3.6.1 Structure de contrôle de l'inter-distance avec coefficients fixes

L'effet principal du contrôleur effectif de l'inter-distance sur le système de convoi est de maintenir la distance entre deux véhicules la plus proche possible de l'inter-distance de sécurité ou désirée. Pour cela, le choix des coefficients de ce contrôleur (k raideur du ressort et c coefficient de frottement visqueux de l'amortisseur) va dépendre de l'analyse de la fonction de transfert de position présentée par la suite.

On utilise la force ressort-amortisseur comme une commande variable d'accélération (mise à l'échelle d'une force par une constante, soit la masse du véhicule), donnée par l'équation suivante :

$$A_{fc} = c\Delta V + k(\Delta X - hV_f - d_{min}) \quad (3.27)$$

Il est à noter que cette équation est présentée et proposée dans [Dav96].

$\Delta V = V_f - V_r$, $\Delta X = X_f - X_r$ sont des variations de vitesse et de la position entre deux véhicules consécutifs (deux véhicules avant et arrière).

On applique la transformée de Laplace à l'équation (3.27), pour déterminer la fonction de transfert de position, pour $d_{min}=0$.

$$(s^2 + (c + kh)s + k)X_f = (cs + k)X_r \quad (3.28)$$

Donc on déduit la fonction de transfert de position suivante :

$$\frac{X_f(s)}{X_r(s)} = \frac{cs + k}{s^2 + (c + kh)s + k} \quad (3.29)$$

Les coefficients c et k sont choisis de façon à rendre l'équation (3.29) comme un filtre passe bas d'une constante de temps h faible.

$$\frac{X_f(s)}{X_r(s)} = \frac{1}{1 + h \cdot s} \quad (3.30)$$

Pour cela on a choisi $c = \frac{1}{h}$ et $k = \frac{1}{h^2}$. Pour la condition (3.30), ces dernières valeurs représentent les valeurs optimales des coefficients ressort-amortisseur, dans le cas où la saturation d'accélération n'est pas prise en considération ($|A_f| < A_{\max} = 2m/s^2$).

3.6.2 Structure de contrôle de l'inter-distance avec coefficient variable

L'étude du critère de confort dans le système de convoi est nécessaire. Il s'avère important d'étudier le cas d'accélération et décélération maximales au niveau du contrôleur de l'inter-distance. L'objectif sera de définir une stratégie de variation des coefficients du contrôleur, de façon à adopter ce dernier à un comportement adéquat envers la situation du système de convoi (situation de freinage d'urgence par exemple). Il est à noter que le développement de ce modèle du contrôleur est présenté dans [Dav96].

On définit la distance minimale de freinage dans le cas de limitation d'accélération ($A_{\max} = 2m/s^2$) par la relation suivante :

$$D(V_0) = \frac{V_0^2}{2A_{\max}} \quad (3.31)$$

Ainsi on définit la zone de sécurité par l'équation suivante :

$$\Delta X \geq D(V_i) - D(V_f) \quad (3.32)$$

La valeur optimale de coefficient du contrôleur dans ce cas de saturation d'accélération, est donnée par la linéarisation de l'équation suivante :

$$\Delta X + D(V_f) - D(V_l) = 0 \quad (3.33)$$

Après la linéarisation (on applique le développement limité de la fonction $D(V_f)$ au voisinage de (V_l) on trouve :

$$\Delta X + \frac{\partial D(V_f)}{\partial V_l} \Delta V = 0 \quad (3.34)$$

Donc on en déduit la forme du contrôleur suivante :

$$\Delta V + \frac{A_{\max}}{V_f} \Delta X = 0 \quad (3.35)$$

La stratégie de variation de coefficient du contrôleur permet d'adapter un comportement de réaction adéquat du contrôleur suivant la situation d'urgence du système de convoi.

Le cas où la zone de sécurité est respectée (équation (3.32)), la valeur de coefficient du contrôleur de l'inter-distance prend deux valeurs possibles suivant le comportement de la vitesse du véhicule suivi (V_f). Cette valeur est exprimée par la relation suivante :

$$k = \min\left(\frac{1}{h}, \frac{A_{\max}}{V_f}\right) \quad (3.36)$$

Mais dans le cas où la zone de sécurité est violée ($\Delta X \leq D(V_l) - D(V_f)$), nous proposons que la valeur de coefficient du contrôleur de l'inter-distance doit être plus grande (ceci est une variante de l'algorithme de [Dav96]), pour éviter une collision probable entre les véhicules. Pour cela le choix du coefficient est exprimé par la relation suivante :

$$k = \max\left(\frac{1}{h}, \frac{A_{\max}}{V_l}\right) \quad (3.37)$$

On déduit la formule du contrôleur de l'inter-distance par l'expression suivante :

$$A_{fc} = \frac{1}{h}(\Delta V + k(\Delta X - hV_f - d_{\min})) \text{ avec } \begin{cases} k = \min(\frac{1}{h}, \frac{A_{\max}}{V_f}) & \text{si } \Delta X \geq D(V_l) - D(V_f) \\ k = \max(\frac{1}{h}, \frac{A_{\max}}{V_f}) & \text{si } \Delta X < D(V_l) - D(V_f) \end{cases} \quad (3.38)$$

On présente sur Matlab/Simulink le modèle du contrôleur de l'inter-distance avec les coefficients variables du ressort-amortisseur, tel qu'illustré sur la figure 4.2.

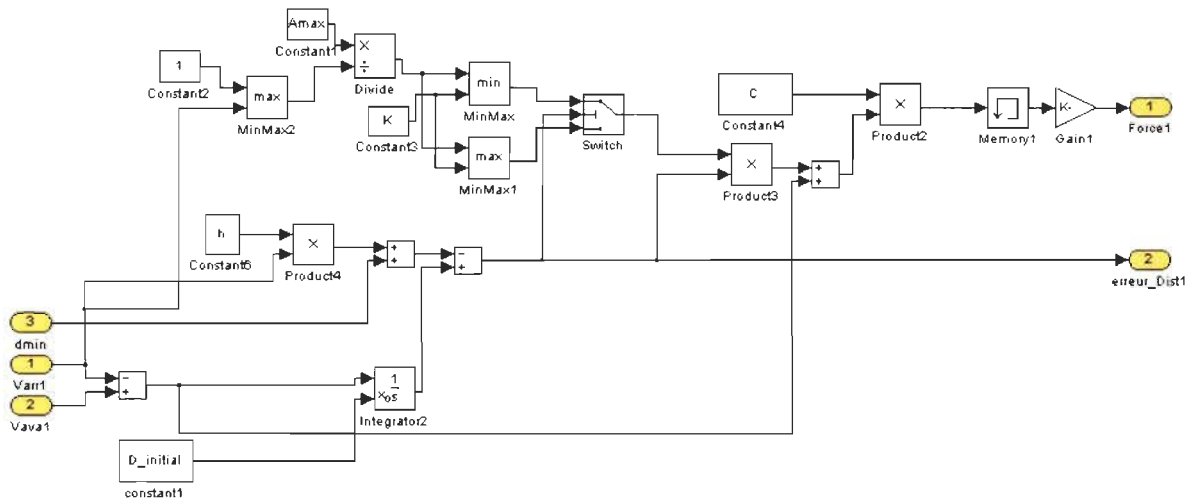


Figure 3.13 : Modèle du contrôleur de l'inter-distance avec variation des coefficients du ressort amortisseur

3.7 Conclusion

En utilisation cette nouvelle vision de contrôle, nous avons démontré qu'il est possible d'implémenter un système de contrôle basé sur des impédances. En effet, ce concept permet de doter les véhicules d'une autonomie leur permettant de réaliser l'approche d'interaction virtuelle.

Nous avons ainsi présenté le développement apporté sur le modèle de contrôle de l'inter-distance qui se résume dans l'ajout d'un terme de distance de sécurité pour rendre le système plus performant face à des perturbations ou des comportements inattendus des véhicules (accélération ou freinage maximal).

Les stratégies de commande présentées dans ce chapitre seront comparées par simulation dans le prochain chapitre afin d'évaluer la stabilité et la robustesse (modification point d'opération) de chaque stratégie de commande dans le système de convoi.

Chapitre 4 — Simulation des stratégies de commande

4.1 Introduction

Les résultats de simulation de chacune des stratégies de commande décrites au chapitre 3 seront exposés dans ce chapitre. Les modèles ont été implantés dans l'environnement Matlab/Simulink. Les différents paramètres des simulations qui suivent seront présentés en annexe B.

4.2 Stratégies de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance

On compare deux stratégies. La première attribue la même vitesse de consigne du PID pour les 10 véhicules de convoi. Dans la deuxième, on attribue la vitesse de consigne sur le premier véhicule seulement. Les neuf autres véhicules qui suivent utilisent la vitesse du véhicule précédent comme vitesse de consigne.

Important : seule la vitesse de consigne sera changée, les autres paramètres resteront inchangés.

Pour la simulation, nous avons choisi les paramètres du contrôleur de l'inter-distance en se basant sur l'équation (3.22). Il est à noter que les différents paramètres de simulations sont présentés en annexe B.

Le but de cette simulation est d'évaluer la rapidité d'établissement de la vitesse pour tous les véhicules en fonction de l'erreur de l'inter-distance. Les simulations ci-dessous

démontrent que la stratégie locale avec une vitesse de consigne en cascade pour les contrôleurs de vitesse a un effet significatif sur l'erreur. Le temps de réponse pour établir la vitesse de chaque véhicule devient un peu long d'un véhicule à l'autre à travers la chaîne de convoi. On impose une vitesse de consigne de 15m/s au véhicule maître de convoi.

1^{er} cas : même vitesse de consigne pour tous les contrôleurs PID

Les fig. 4.1 et 4.2 représentent respectivement la vitesse et l'erreur de l'inter-distance en fonction du temps.

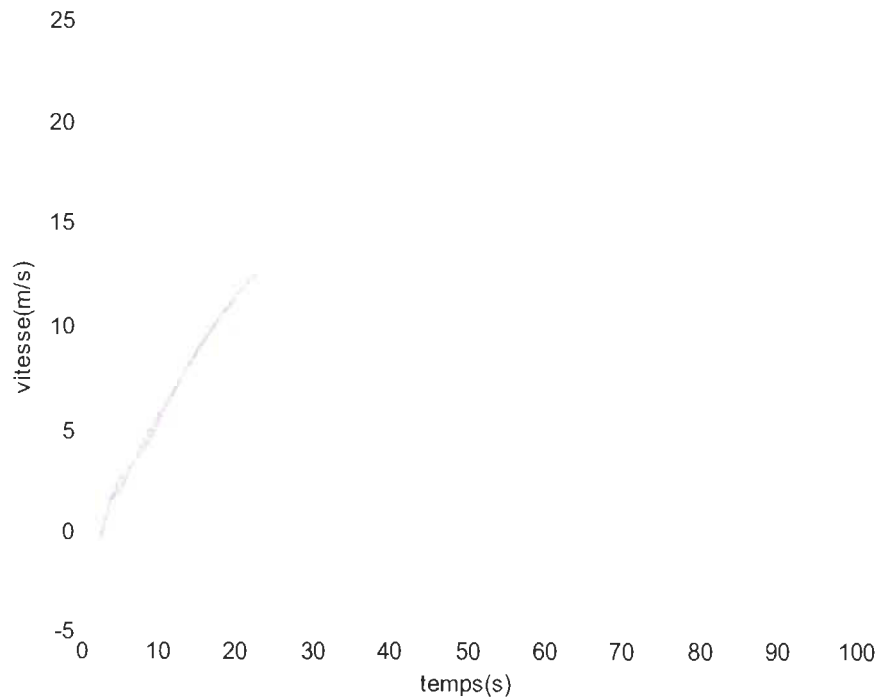


Figure 4.1 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale

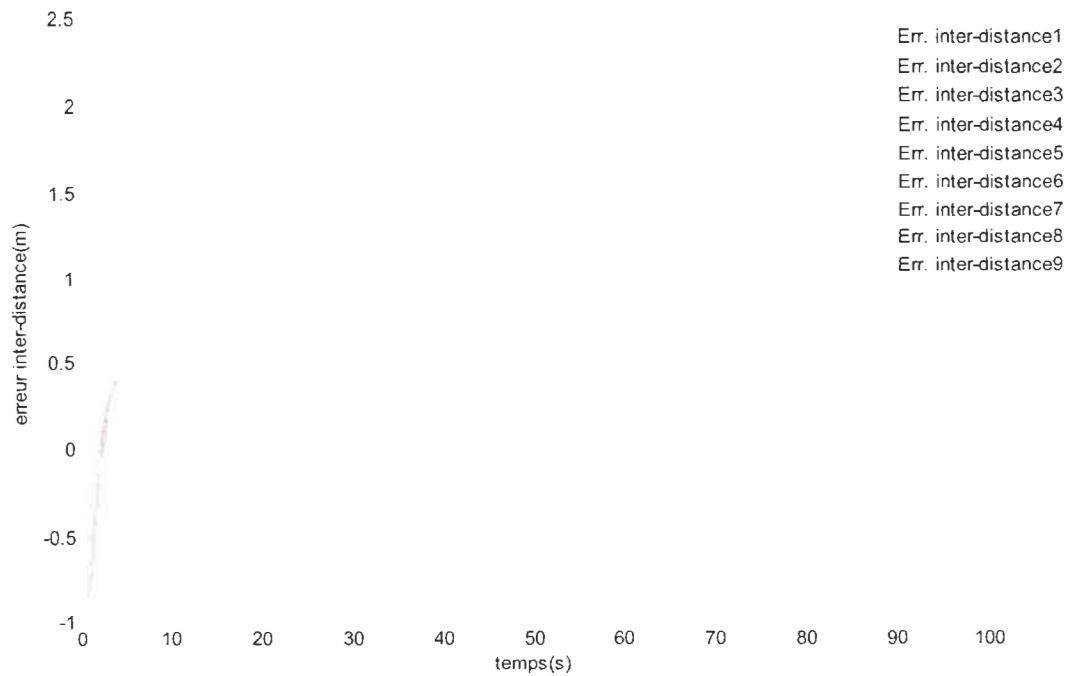


Figure 4.2 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale

2^{ième} cas : attribution de la vitesse de consigne en cascade pour tous les contrôleurs des vitesses PID

Les fig. 4.3 et 4.4 représentent respectivement la vitesse et l'erreur de l'inter-distance en fonction du temps.

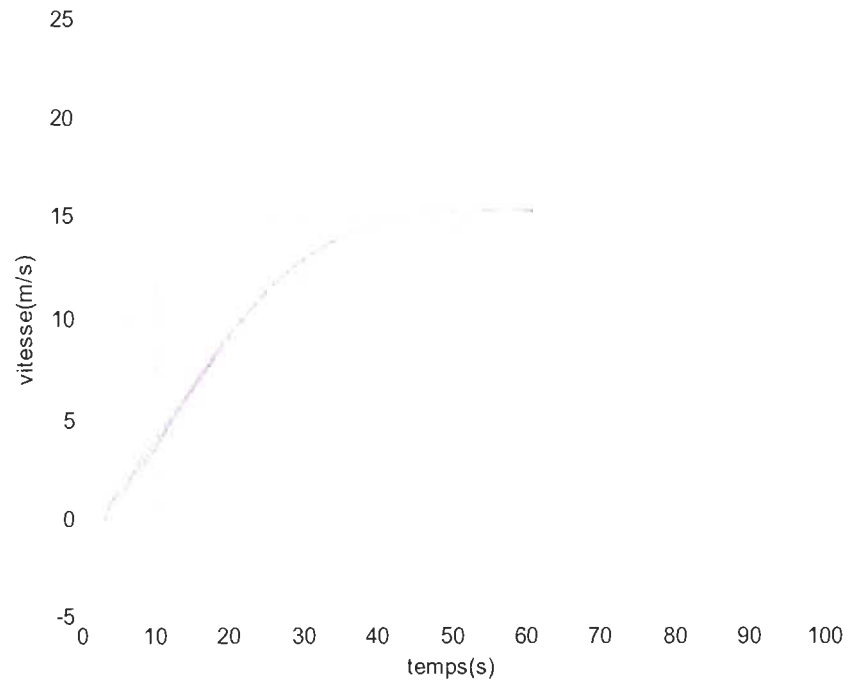


Figure 4.3 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade

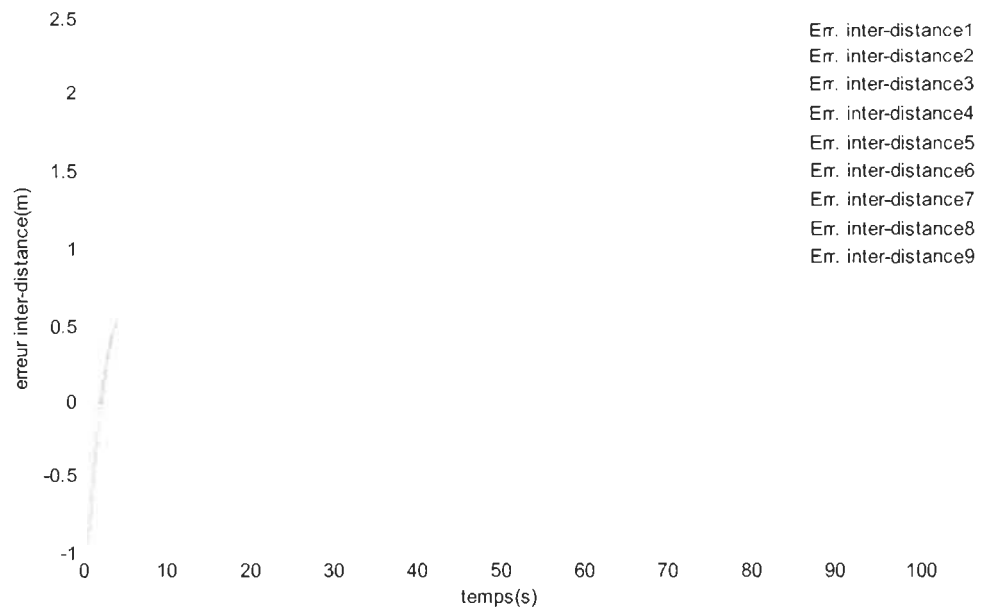


Figure 4.4 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade

Le résultat obtenu par simulation montre que l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules augmente lorsqu'on applique aux contrôleurs PID des véhicules du convoi, une vitesse de consigne en cascade. Pour améliorer le résultat de la figure 4.4, on doit changer les paramètres des contrôleurs PID et de l'inter-distance. La solution envisageable est de diminuer la constante de temps de l'intégrateur par un facteur de 2 et augmenter les paramètres de ressort-amortisseur, soit k par un facteur de 10 et c en respectant la relation exprimée dans l'équation (3.22).

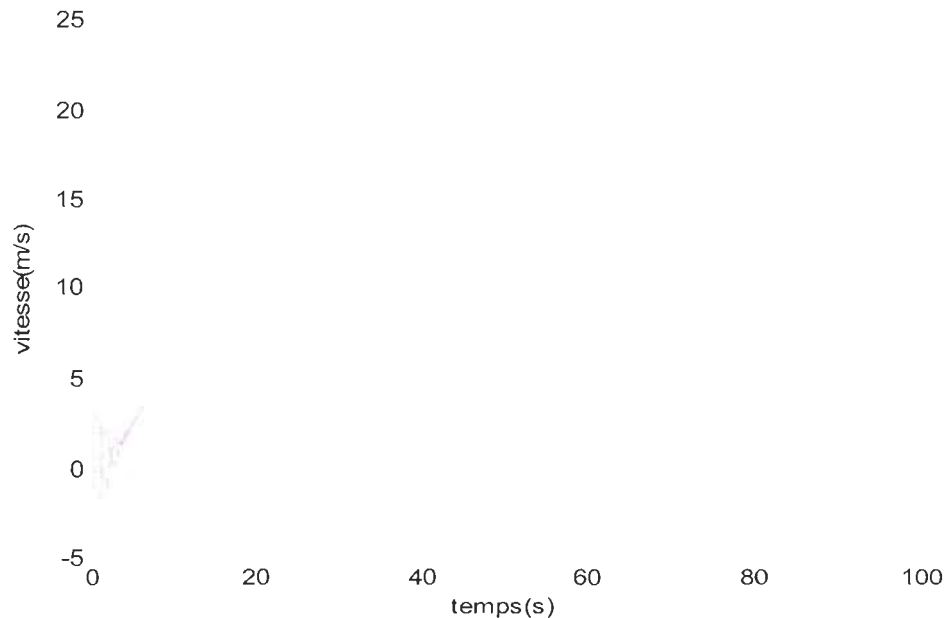


Figure 4.5 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade avec variation des paramètres de PID et de l'inter-distance

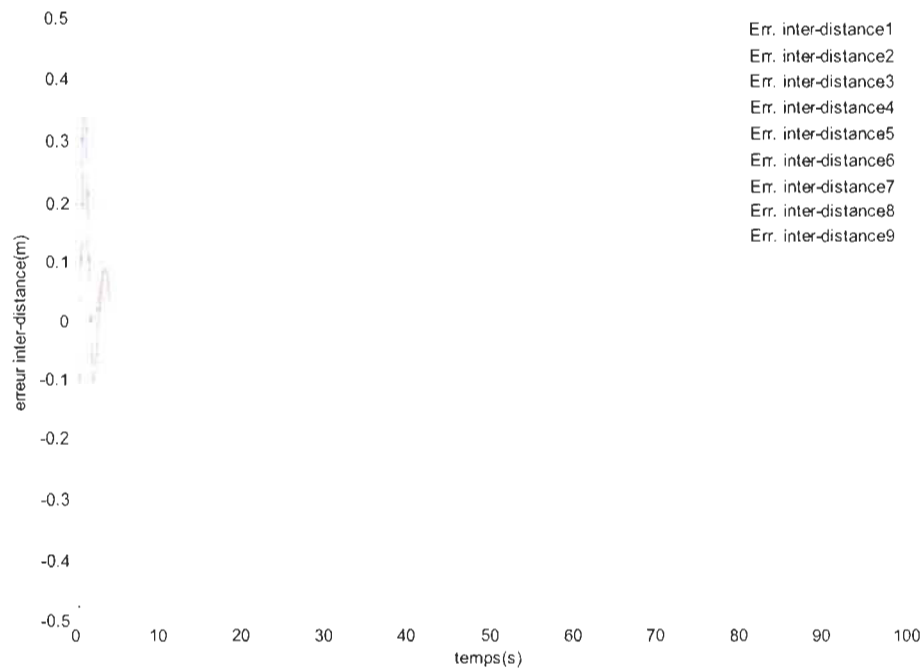


Figure 4.6 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande locale et une vitesse de consigne en cascade avec variation des paramètres de PID et de l'inter-distance

Les figures 4.5 et 4.6 présentent le résultat obtenu par simulation. Pour cette simulation, on agit sur la constante de temps de l'intégrateur du PID et sur les paramètres du ressort amortisseur. En diminuant la constante de temps de l'intégrateur du PID, on réduit le temps de réponse de vitesse des véhicules. On constate ainsi une diminution de l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules de convoi. On note que cette erreur diminue encore plus lorsqu'on ajuste les paramètres du ressort amortisseur.

4.3 Stratégie de commande globale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance

Afin de diminuer l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules du convoi. On compare dans cette partie le comportement des interactions entre les véhicules pour les deux stratégies de commande globale et locale. On évalue ainsi la complexité et la performance du système de contrôle qui permettra d'établir une meilleure stabilité du système de convoi. Pour les simulations qui suivent, on note qu'on garde les mêmes paramètres de vitesses et d'inter-distances.

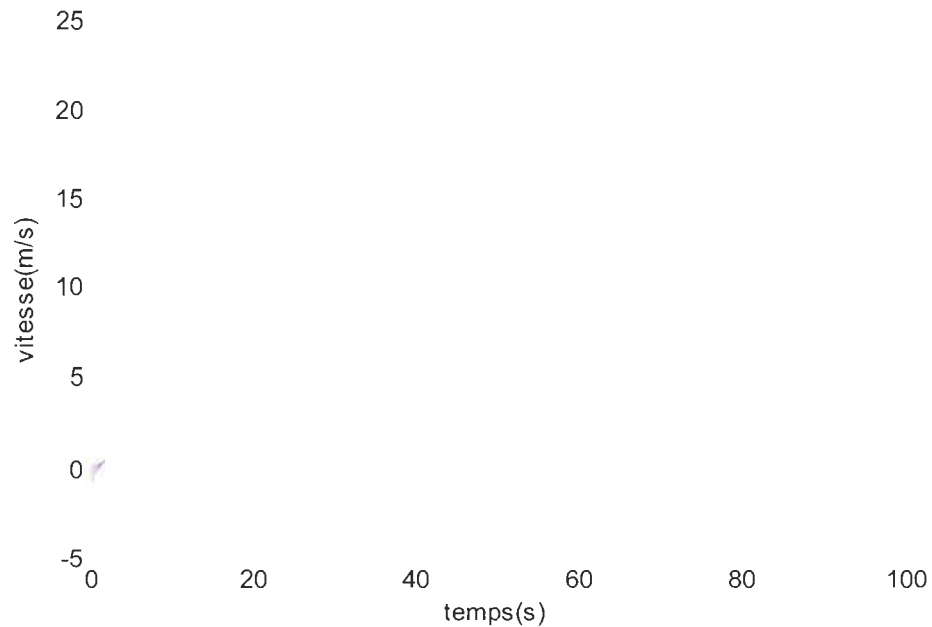


Figure 4.7 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande globale

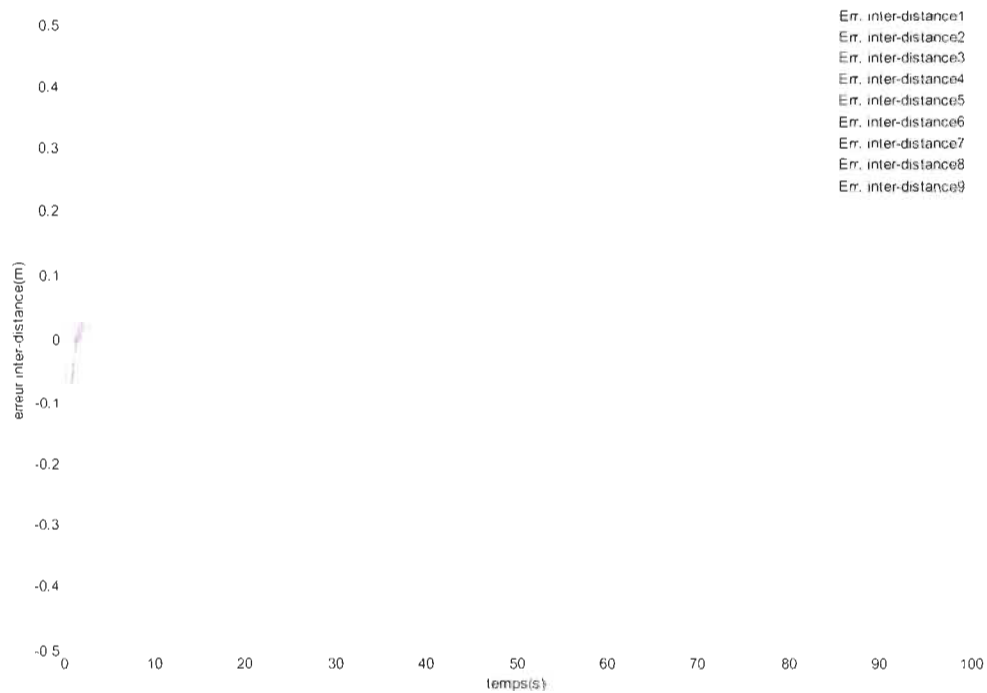


Figure 4.8 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande globale

Pour la stratégie de commande globale, on obtient des résultats de simulation semblables à ceux de la stratégie locale (fig. 4.5 et 4.6). En gardant les mêmes paramètres de vitesses et d'inter-distances, on constate des oscillations dans les réponses de vitesse et des inter-distances. En réagissant sur le paramètre de l'amortisseur (augmentation du coefficient visqueux de l'amortisseur), on diminue ces oscillations. On déduit donc que ces dernières proviennent d'une résonance entre les ressorts et les masses.

Pour les deux stratégies de commande locale et globale, on compare le comportement d'interaction entre les véhicules dans le régime transitoire. Dans la stratégie locale, on constate que le comportement du système de convoi de dix véhicules est lié principalement à l'action et réaction de véhicule au milieu (véhicule 5). Ce dernier applique

deux forces opposées en avant et en arrière aux autres véhicules pour stabiliser le comportement de l'interaction de vitesse entre les véhicules du convoi. Dans la stratégie globale on trouve que le comportement d'interaction entre les véhicules suit principalement la réaction de véhicule de tête de convoi (accélééré ou décélééré) afin d'atteindre la stabilité. On présente dans les figures 4.9 et 4.10, les effets d'interaction de vitesse entre les véhicules dans les deux stratégies de commande locale et globale.

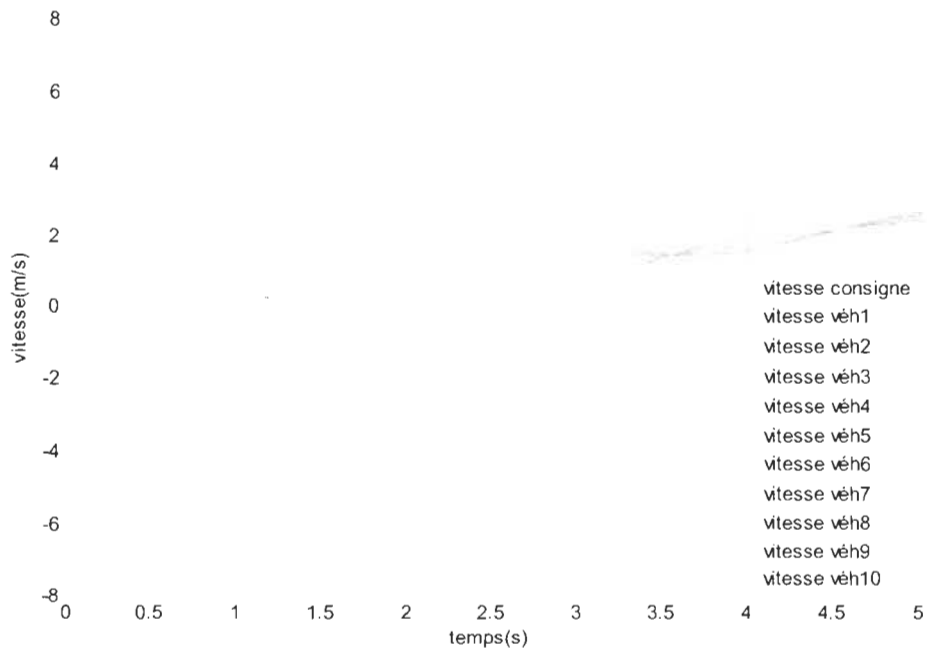


Figure 4.9 : Comportement transitoire de vitesse des véhicules dans la stratégie de commande locale

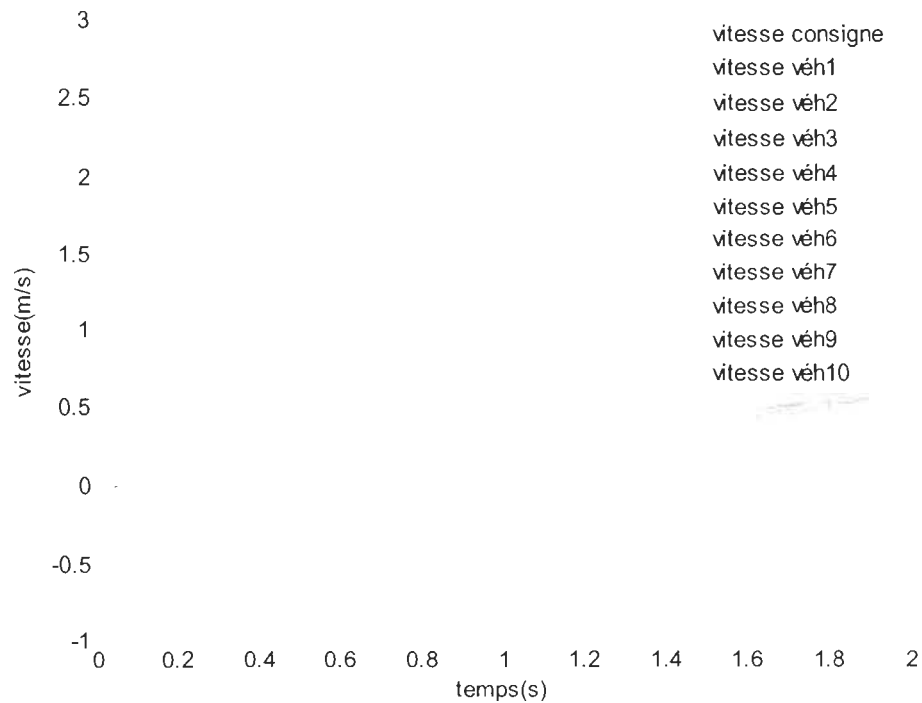


Figure 4.10 : Comportement transitoire de vitesse des véhicules dans la stratégie de commande globale

Pour les deux stratégies de commande, on conclut que les résultats obtenus par simulation sont les mêmes pour l'erreur de l'inter-distance finale entre les véhicules. Dans la stratégie de commande locale, lorsqu'on impose aux contrôleurs PID une vitesse de consigne en cascade, on constate un effet de propagation d'un léger retard sur l'erreur de l'inter-distance. La stratégie de commande globale montre une complexité d'ajustement des coefficients des contrôleurs de l'inter-distance des véhicules. On constate aussi que l'estimation de distance désirée (distance au repos du ressort) dépend de l'emplacement de chaque véhicule dans le convoi.

4.4 Stratégies de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance

Dans cette partie, nous voulons démontrer que l'application de la stratégie de commande mixte permet d'éliminer le léger retard imposé par l'application de la stratégie de commande locale et le risque des oscillations qui peuvent se produire lors d'un mauvais choix des paramètres des contrôleurs de vitesse et de l'inter-distance dans la stratégie de commande globale. Le choix des paramètres du contrôleur dans la stratégie globale dépend du nombre de véhicules dans le convoi (l'estimation de la distance au repos du ressort dépend de l'emplacement des véhicules). Plus la distance naturelle au repos du ressort est grande, plus le coefficient de raideur du ressort doit être augmenté pour réduire cette distance ; le coefficient d'amortissement doit être augmenté proportionnellement afin de réduire les oscillations associées à la résonance entre les masses et ressorts.

Pour la simulation, nous avons utilisé les mêmes paramètres que dans le cas de la structure de commande locale avec une constante de temps de l'intégrateur $\tau_i = 0.01$. Les figures 4.11 et 4.12 représentent les vitesses et l'erreur des inter-distances entre les dix véhicules du convoi.

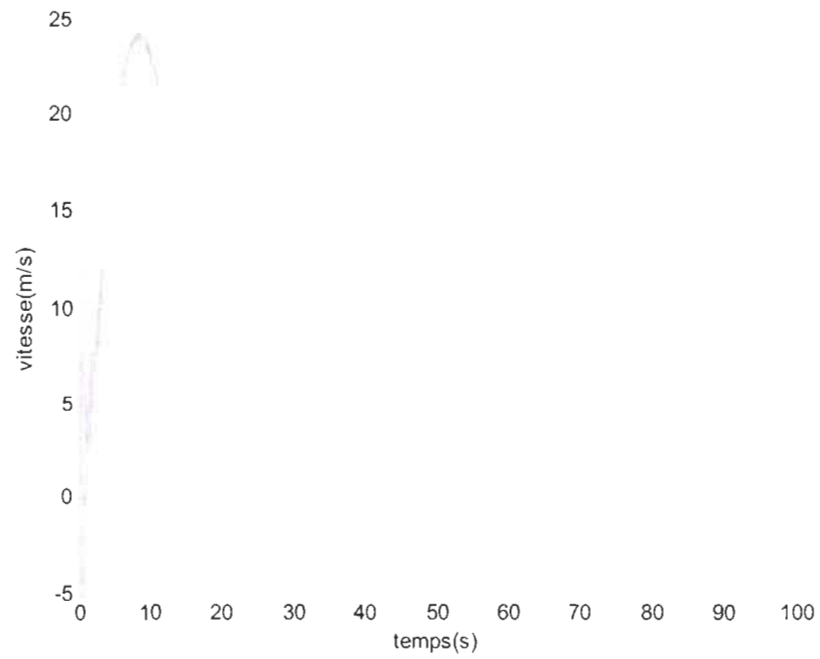


Figure 4.11 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte

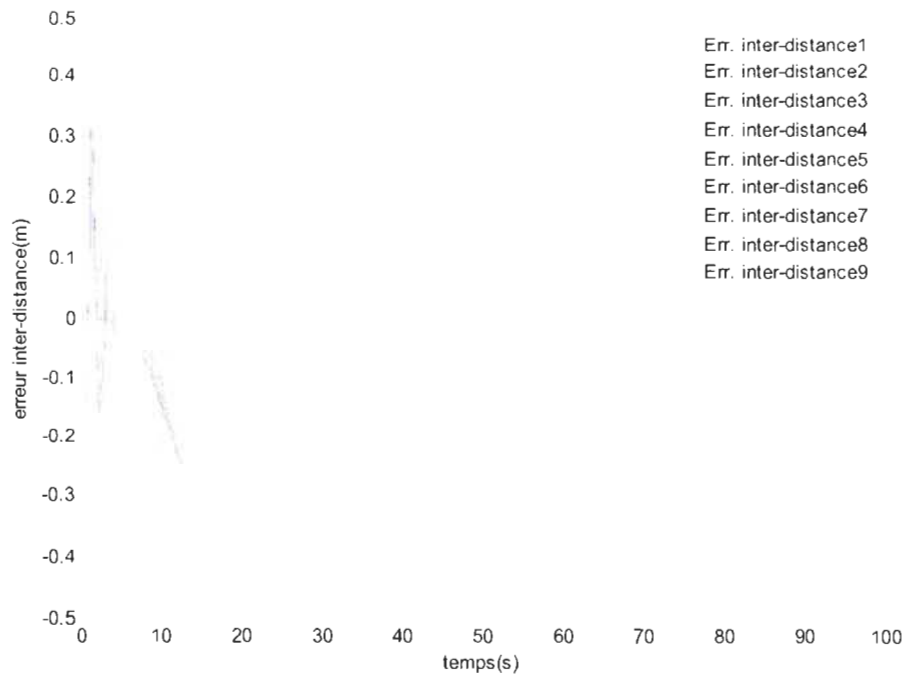


Figure 4.12 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande mixte

La figure 4.12 montre que l'erreur des inter-distances entre les véhicules du convoi devient négative (les véhicules ont franchi la zone limite de sécurité) comparativement avec l'erreur des inter-distances données par la structure de commande locale (figure 4.6). Pour rendre l'erreur positive on doit ajuster le paramètre de l'intégrateur (constante du temps τ_i) du contrôleur de vitesse PID. Les figures 4.13 et 4.14 représentent les vitesses et l'erreur des inter-distances entre les dix véhicules de convoi après l'ajustement du paramètre du contrôleur de vitesse PID.

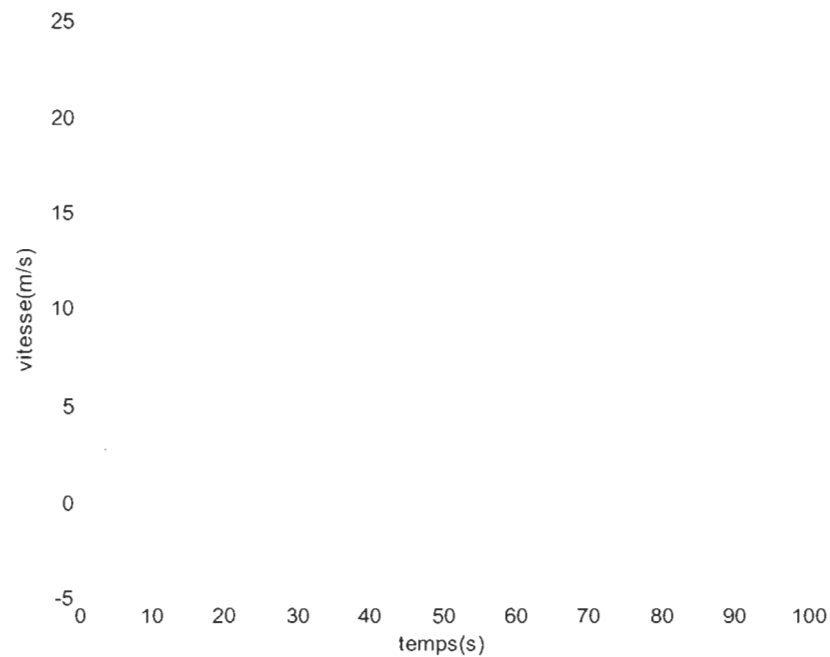


Figure 4.13 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte après ajustement du paramètre de l'intégrateur du contrôleur PID

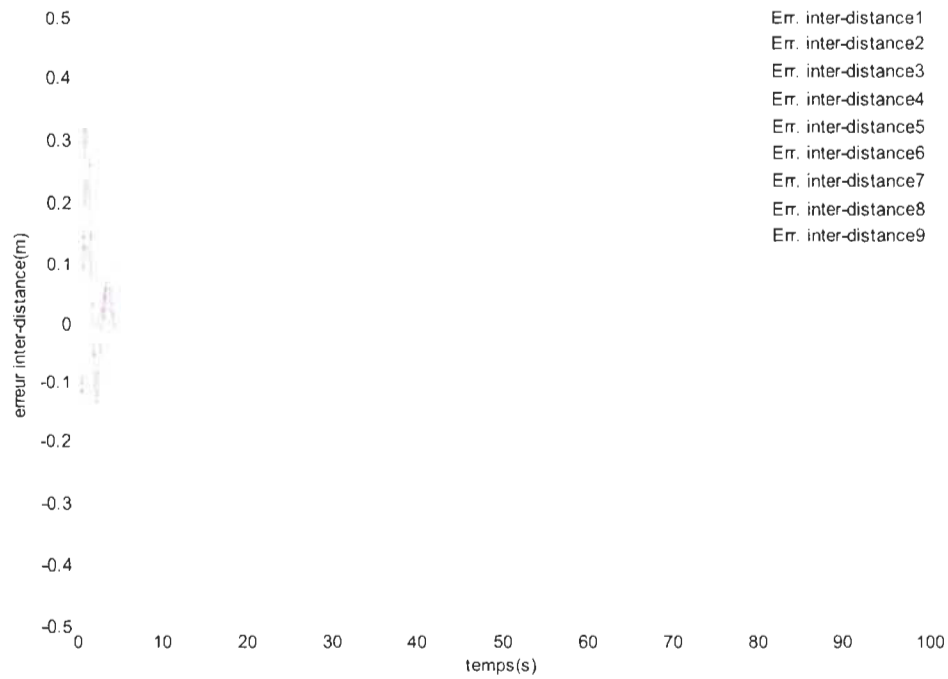


Figure 4.14 : Erreur des inter-distances entre les 10 véhicules du convoi avec une stratégie de commande mixte après ajustement de l'intégrateur du contrôleur PID

La figure 4.14 montre que l'erreur des inter-distances devient positive lors d'un ajustement du paramètre de l'intégrateur du contrôleur de l'inter-distance PID. Cette variation de la constante de temps τ_i permet d'augmenter le temps de réponse (temps de montée) et de rendre l'erreur des inter-distances positive.

4.5 Stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance incluant le terme de distance de sécurité

Dans cette partie on va démontrer par simulation que l'incorporation d'un terme actif hV_f dans la structure du contrôleur de l'inter-distance possède un avantage. En

effet, ce terme actif représente une valeur ajoutée au système qui ajustera l'inter-distance désirée suivant le changement de la vitesse du véhicule esclave. La robustesse du système (bonne réaction à la perturbation et variation faible au niveau des critères de performance) sera observée dans les figures 4.17 et 4.18 (la distance minimale $d_{\min}$ est variable, on applique un échelon), qui sont comparées aux figures 4.15 et 4.16 (la distance minimale $d_{\min}$, distance au repos du ressort, est fixe). Sur les figures 4.17 et 4.18, on introduit une perturbation au niveau de la distance minimale $d_{\min}$, tel que, à l'instant $t=50s$, on demande un changement de $d_{\min}$ qui augmente de 1m à 2m pendant 5s. Le résultat obtenu montre que, suite à la modification de la consigne d'inter-distance, l'erreur de l'inter-distance et la vitesse du système de convoi se stabilisent en 2s environ, tout en gardant le même comportement de système de contrôle.

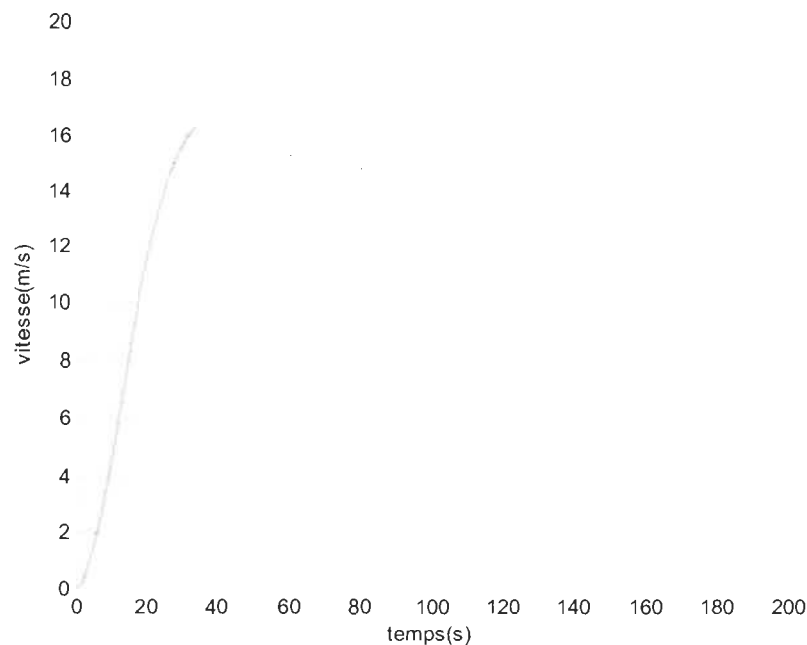


Figure 4.15 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant le terme de distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance

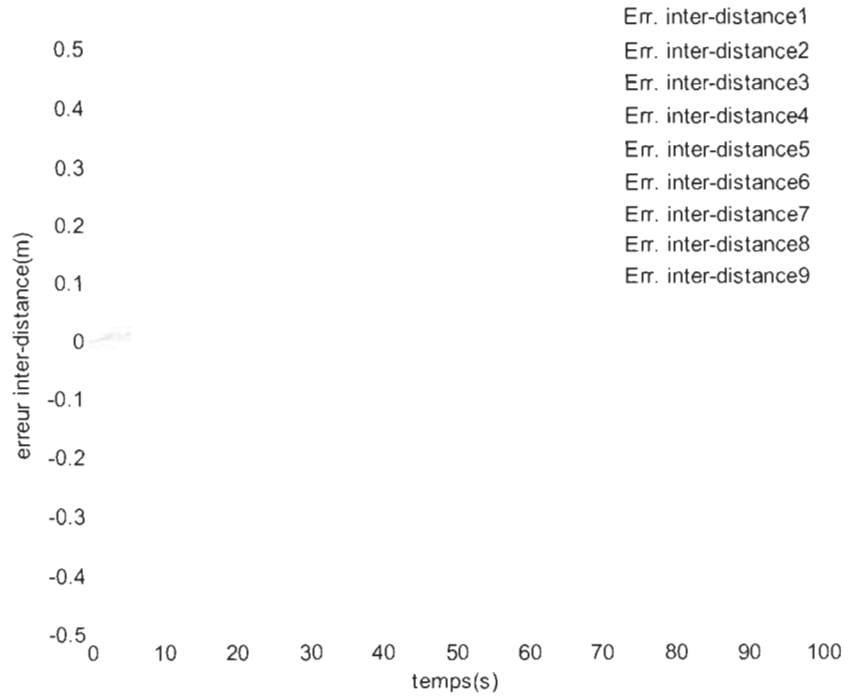


Figure 4.16 : Erreur de l'inter-distance des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant le terme de distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance

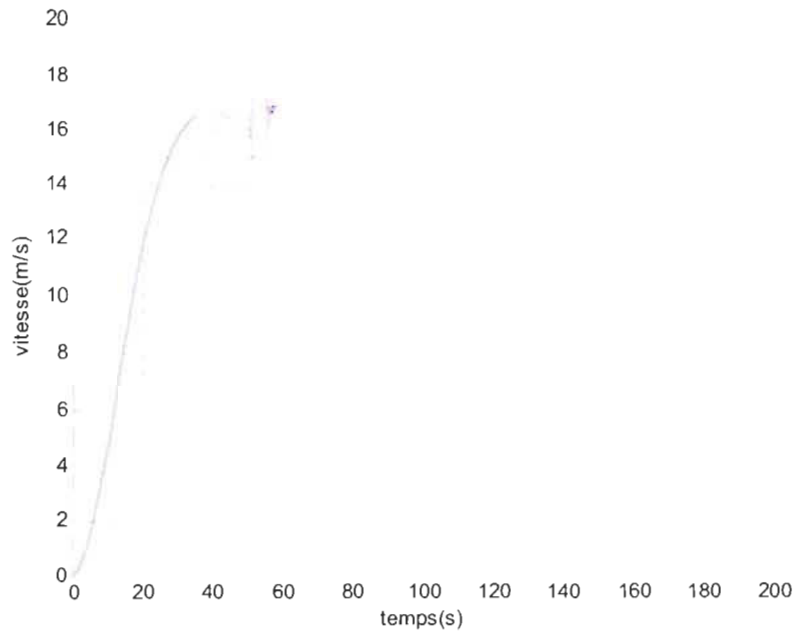


Figure 4.17 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance

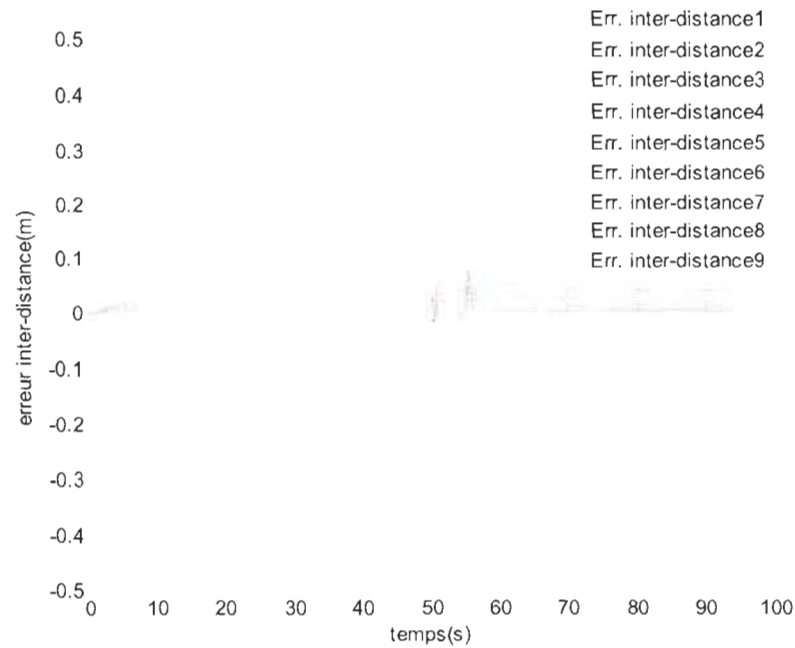


Figure 4.18 : Erreur de l'inter-distance des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité dans le contrôleur de l'inter-distance

4.6 Stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance avec des coefficients variables du ressort amortisseur

Ce modèle expose la structure complète du contrôleur de l'inter-distance. Il présente la gestion du système de contrôle (variation des coefficients ressort-amortisseur) selon les situations limites (accélération et décélération maximales). Pour la simulation, nous avons utilisé les mêmes paramètres que dans le cas précédent (chapitre 3.6.2). Les figures 4.19 et 4.20 présentent la vitesse et l'erreur des inter-distances entre les véhicules du convoi.

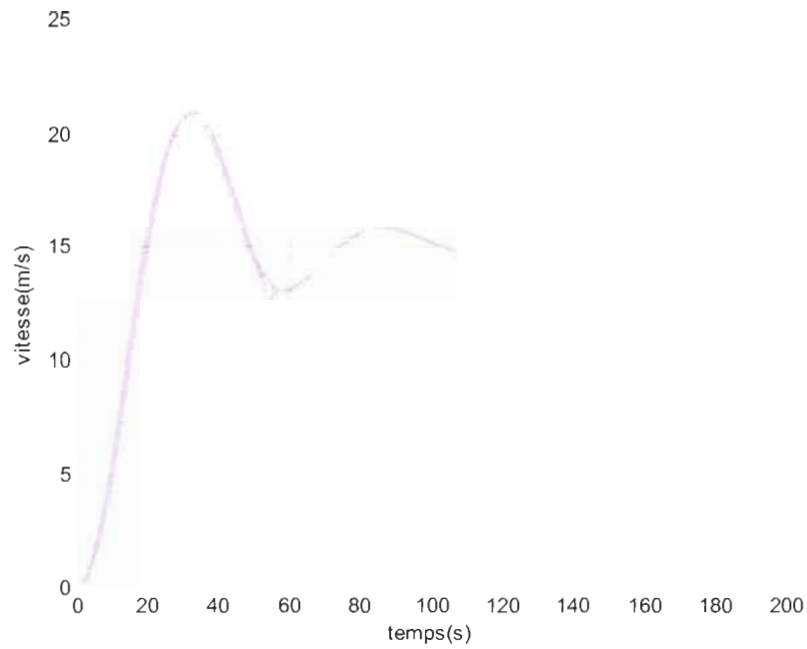


Figure 4.19 : Vitesse des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité avec une gestion du contrôleur de l'inter-distance

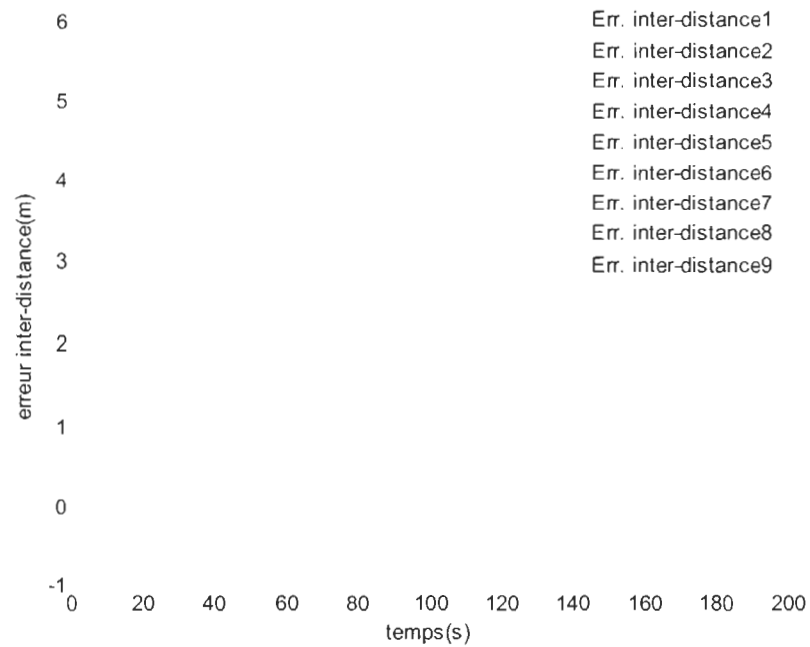


Figure 4.20 : Erreur des inter-distances des 10 véhicules avec une stratégie de commande mixte incluant la variation de la distance de sécurité avec une gestion du contrôleur de l'inter-distance

La figure 4.20 démontre que l'erreur des inter-distances entre les véhicules augmente significativement par rapport à la figure 4.18. Cela signifie que le contrôleur de vitesse PID devient plus dominant dans le cas où l'erreur des inter-distances est positive. Pour améliorer l'erreur des inter-distances, on doit jouer sur la constante du temps de l'intégrateur du contrôleur de vitesse PID. Lorsqu'on diminue la valeur de la constante de temps de l'intégrateur τ_i , on arrive à rendre négative l'erreur de l'inter-distance entre les véhicules (le coefficient de raideur du ressort prend une valeur ($k = \max(\frac{1}{h}, \frac{A_{\max}}{V_f})$)). Le contrôleur de l'inter-distance devient donc plus dominant et l'erreur de l'inter-distance faible. Par contre on perd la performance du système (le temps de stabilisation devient plus long) à cause de l'interaction entre les deux contrôleurs de vitesse et de l'inter-distance.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents résultats de simulation pour les modèles développés dans le chapitre 3. Nous avons aussi comparé les réponses de vitesse et l'erreur des inter-distances entre les véhicules pour les trois stratégies de commande (locale, globale et mixte).

Les résultats démontrent que la stratégie de commande mixte permet de réduire l'effet de variation de vitesse de consigne pour les contrôleurs de vitesse PID (on applique la vitesse du véhicule en tête de convoi comme une vitesse de consigne de tous les contrôleurs PID des véhicules). On évite ainsi les oscillations qui peuvent se produire dans la stratégie de commande globale lorsque le choix des valeurs du ressort-amortisseur n'est

pas compatible avec l'inter-distance désirée (distance au repos du ressort) qui dépend de l'emplacement de chaque véhicule.

Enfin, les résultats de simulation montrent un problème d'interaction entre les deux contrôleurs de vitesse et de l'inter-distance lorsqu'on gère la variation des coefficients de contrôleur d'inter-distance. Ceux-ci provoquent une dégradation de la performance du contrôleur de vitesse (le temps de stabilisation est long lorsque le contrôleur de l'inter-distance devient dominant) et du contrôleur de l'inter-distance (l'erreur des inter-distances est significative lorsque le contrôleur de vitesse devient dominant).

Chapitre 5 — Réalisation et validation expérimentale du convoi

5.1 Introduction

Jusqu'à présent nous avons validé du point de vue théorique les différentes stratégies de commande par simulation (chapitre 4). Il devient alors nécessaire de valider ces stratégies de commande expérimentalement. Pour cette fin, le laboratoire s'est doté d'un banc d'essai expérimental qui utilise un système Robot kit de la compagnie Vex. La plate forme du Robot kit contient différentes composantes électroniques. Le système de convoi sera réalisé par trois petits véhicules électriques. Ces véhicules seront équipés de capteurs de vitesse (encodeurs), d'un capteur d'inter-distance (ultrasonique) et d'un capteur de guidage (infrarouge) ; ces derniers sont décrits dans l'annexe E. Les tests qui seront réalisés sur les trois véhicules seront évalués suivant deux axes : le respect de la distance de sécurité entre les véhicules ; et la réaction du train de véhicules face à des perturbations (freinage d'urgence). Suite à ces tests, nous avons pu déduire le meilleur des modèles proposés et réaliser une application réelle avec ce modèle.

5.2 Architecture du banc d'essais expérimental

Cette section consiste à valider expérimentalement une stratégie de commande locale sur un convoi de trois véhicules (voir figure 5.1). Il devient alors nécessaire de bâtir une architecture informatique adéquate pour contrôler la vitesse et l'inter-distance relatives des véhicules en convoi.

La première étape de la conception de l'architecture du banc d'essais expérimental, consiste à discrétiser le modèle de commande locale pour le système du convoi. Pour ce

faire, on applique la méthode de transformée en Z qui consiste à transformer le système continu à un système échantillonné, implantable sur un calculateur (microcontrôleur).

L'étape suivante consiste à implémenter un programme en langage C sur un microcontrôleur pour contrôler la vitesse et l'inter-distance entre les véhicules. L'algorithme du programme doit effectuer deux tâches précises, le traitement des données des capteurs et le calcul des régulateurs de vitesse et de l'inter-distance.

Vu qu'il existe un problème d'équilibrage de direction (déviation des véhicules sur une trajectoire rectiligne) pour les petits véhicules, nous avons développé un algorithme de contrôle latéral pour que le convoi suive une référence sur la trajectoire rectiligne. L'architecture de contrôle latéral sera présentée à l'annexe D

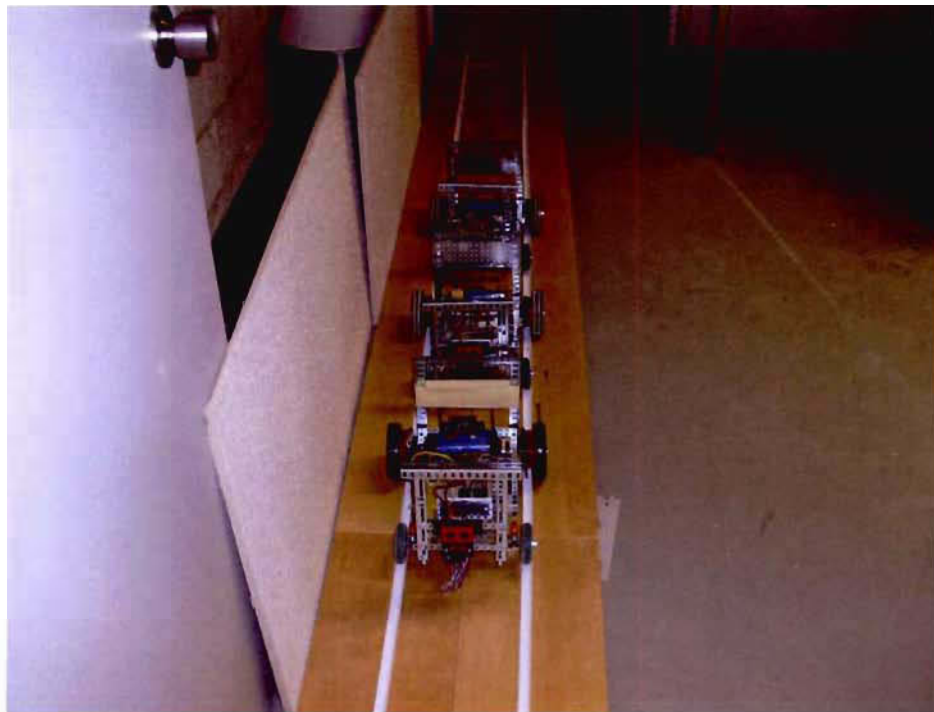
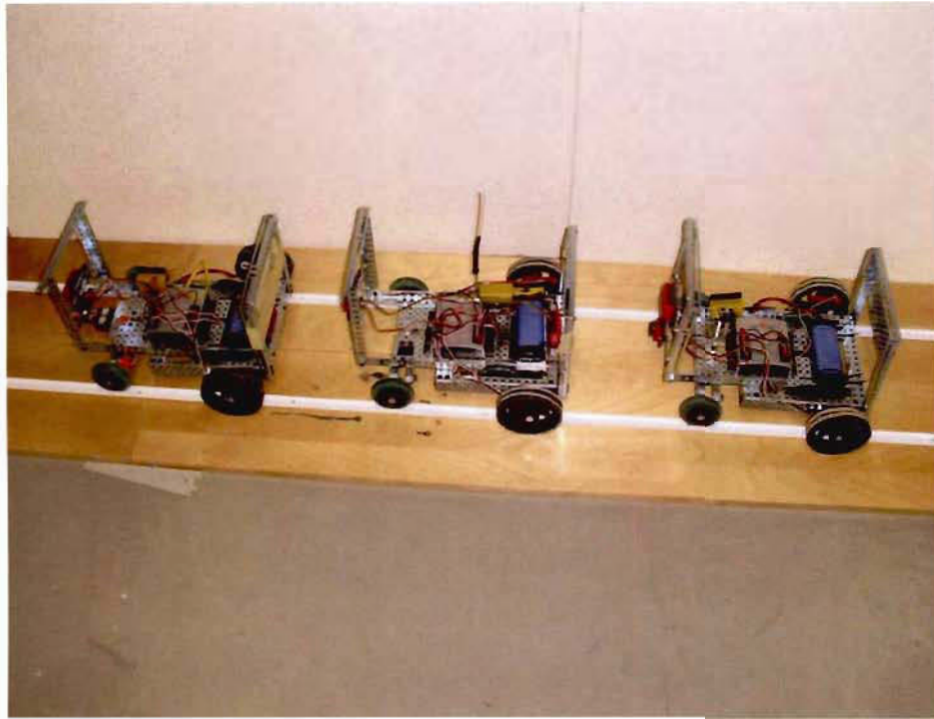


Figure 5.1 : Convoi de trois véhicules

5.2.1 Structure de commande de l'inter-distance pour un convoi de trois véhicules

Pour pouvoir régler convenablement l'inter-distance entre les trois véhicules électriques, il faut tout d'abord modéliser le système de contrôle et calculer la fonction de transfert en boucle fermée de la boucle d'asservissement. Le schéma bloc utilisé est illustré à la figure 5.2.

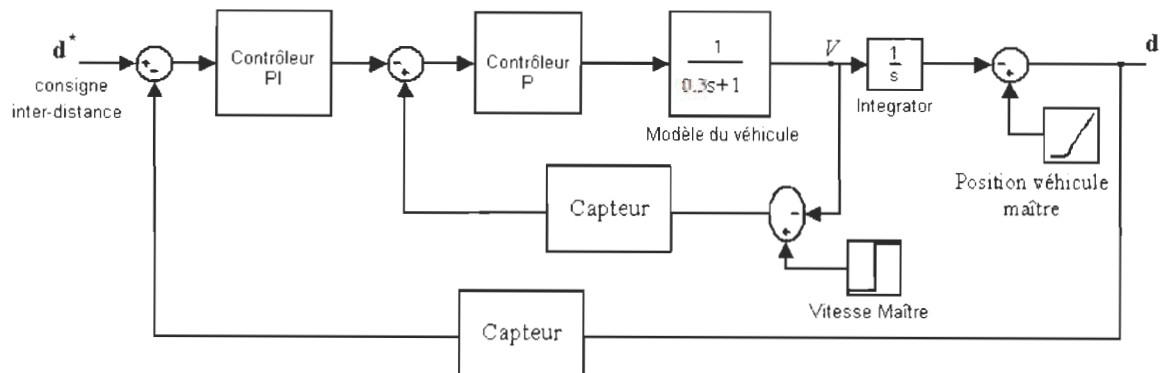


Figure 5.2 : Schéma bloc de la structure d'asservissement de l'inter-distance entre deux véhicules électriques (maître-esclave)

La figure 5.2 représente la structure de commande pour le véhicule électrique. Cette structure se compose de deux boucles imbriquées pour l'asservissement en vitesse et en distance du véhicule. Pour contrôler la vitesse et l'inter-distance entre deux véhicules, on utilise un contrôleur PI (proportionnel-intégral) et un contrôleur P (proportionnel). L'interprétation physique de cette structure de commande représente un modèle de ressort-amortisseur. On constate que si on néglige la partie intégrale de l'inter-distance (augmenter la constante τ_i), la conception du contrôleur de l'inter-distance se fait par une substitution

des paramètres de ressort amortisseur avec les paramètres du contrôleur PI (on néglige la partie intégrale) et du contrôleur P. La fonction de transfert du modèle du petit véhicule électrique est assimilée à un filtre passe bas (la constante de temps mécanique a été estimée expérimentalement à une valeur de 0.3s).

La vitesse du véhicule maître est considérée comme une perturbation externe dans la structure de commande de l'inter-distance.

Soit la fonction de transfert du contrôleur PI de l'inter-distance

$$C_1(s) = K_c \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) \quad (5.1)$$

La vitesse du véhicule est contrôlée par un contrôleur P (proportionnel)

$$C_2(s) = P \quad (5.2)$$

Le modèle du véhicule électrique est représenté par la fonction de transfert suivante

$$F(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (\text{avec } \tau = 0.3s) \quad (5.3)$$

Selon le schéma bloc de la figure 5.2, pour un gain unitaire pour les deux capteurs, on détermine la fonction de transfert en boucle fermée

$$H(s) = \frac{\frac{K_c P}{\tau} s + \frac{K_c P}{\tau \tau_i}}{s^3 + \frac{P+1}{\tau} s^2 + \frac{K_c P}{\tau} s + \frac{K_c P}{\tau \tau_i}} \quad (5.4)$$

On détermine les coefficients P, K_c et τ_i en fonction de deux paramètres physiques représentatifs (facteur d'amortissement ξ et pulsation naturelle ω_n).

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire de la manière suivante :

$$D(s) = (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (5.5)$$

En posant

$$\begin{aligned} \frac{PK_c}{\tau\tau_i} &= \omega_n^3 \\ \frac{PK_c}{\tau} &= \omega_n^2(1 + 2\xi) \\ \frac{P+1}{\tau} &= \omega_n(1 + 2\xi) \end{aligned} \quad (5.6)$$

On en déduit alors les coefficients des contrôleurs PI et P

$$\begin{aligned} P &= \omega_n \tau (1 + 2\xi) - 1 \\ K_c &= \frac{\omega_n^2 \tau (1 + 2\xi)}{\omega_n \tau (1 + 2\xi) - 1} \\ \tau_i &= \frac{1 + 2\xi}{\omega_n} \end{aligned} \quad (5.7)$$

On choisit les paramètres physiques :

$$\begin{aligned} \xi &= 0.6 \\ T_{s,(2\%)} &= \frac{4}{\xi\omega_n} = 3s \end{aligned} \quad (5.8)$$

On en déduit alors la valeur des paramètres des contrôleurs

$$\begin{aligned} P &= 0.46 \\ K_c &= 7.07 \\ \tau_i &= 0.99 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Les fig. 5.3 et 5.4 représentent respectivement la réponse de l'inter-distance entre les deux véhicules (maître-esclave) et la vitesse du véhicule esclave pour des véhicules initialement à l'arrêt.



Figure 5.3 : Inter-distance entre deux véhicules (maître-esclave)

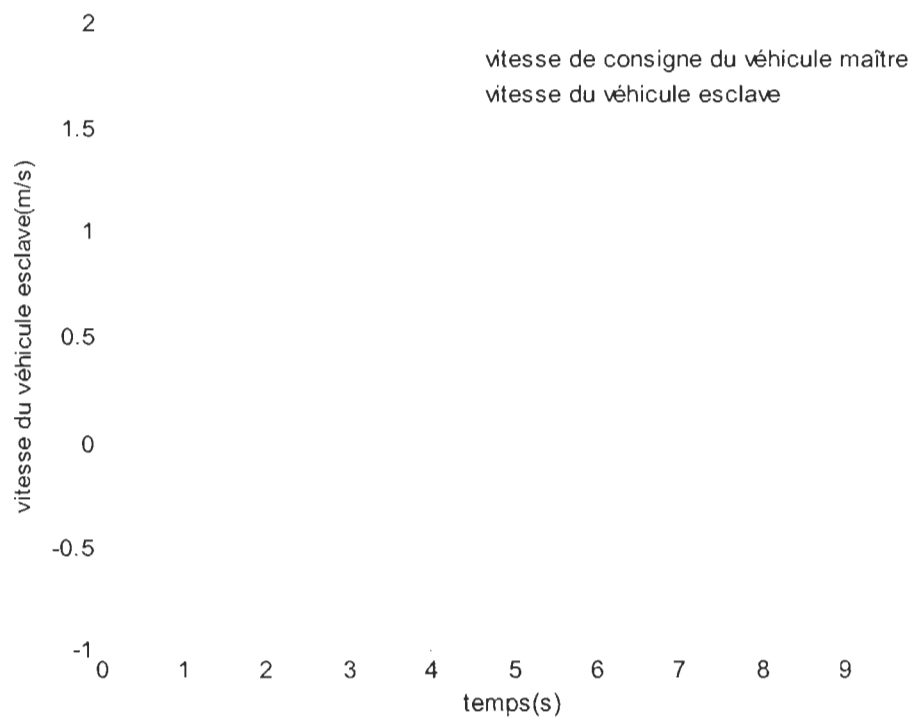


Figure 5.4 : Vitesse du véhicule esclave

Pour la simulation, on a imposé la valeur de l'inter-distance de sécurité entre deux véhicules de $0.5m$ et la vitesse de consigne pour le véhicule maître de $1m/s$

Selon la figure 5.3, on constate que la distance entre le véhicule maître et esclave est ajustée à la distance de sécurité après une période de 4s.

La figure 5.4 expose l'asservissement de vitesse du véhicule esclave. On constate que le temps de stabilisation de la vitesse du véhicule esclave est réglé après une période de 4.5s avec une erreur statique nulle.

5.2.2 Modèle discret de commande de l'inter-distance du système de convoi

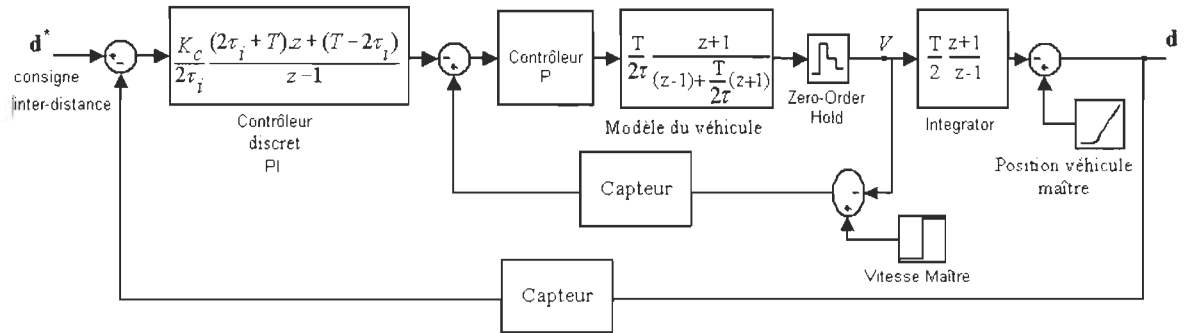


Figure 5.5 : Schéma bloc de la structure discrète d'asservissement de l'inter-distance entre deux véhicules électriques (maître-esclave)

Pour discrétiser le modèle de contrôle du convoi, on applique la méthode trapézoïdale de discrétisation. Cette méthode consiste à remplacer l'intégrateur dans le domaine de Laplace par la formule suivante

$$\frac{1}{s} = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (5.10)$$

où s et z représentent respectivement les opérateurs de Laplace et de la transformée en z .

Pour la simulation dans le domaine discret, on a choisi une période d'échantillonnage $T=100\text{ms}$. Le choix du pas d'échantillonnage dépend principalement du spectre en fréquence du signal échantillonné et des performances de réglage que l'on désire. En théorie, le théorème de Shannon [Xian96] fixe une borne inférieure à la fréquence d'échantillonnage qui doit être au moins égale à deux fois la plus grande fréquence contenue dans le signal que l'on échantillonne.

Les fig. 5.6 et 5.7 représentent respectivement la réponse du modèle discret de l'inter-distance entre les deux véhicules (maître-esclave) et la vitesse du véhicule esclave sous les mêmes conditions que pour les fig. 5.3 et 5.4.

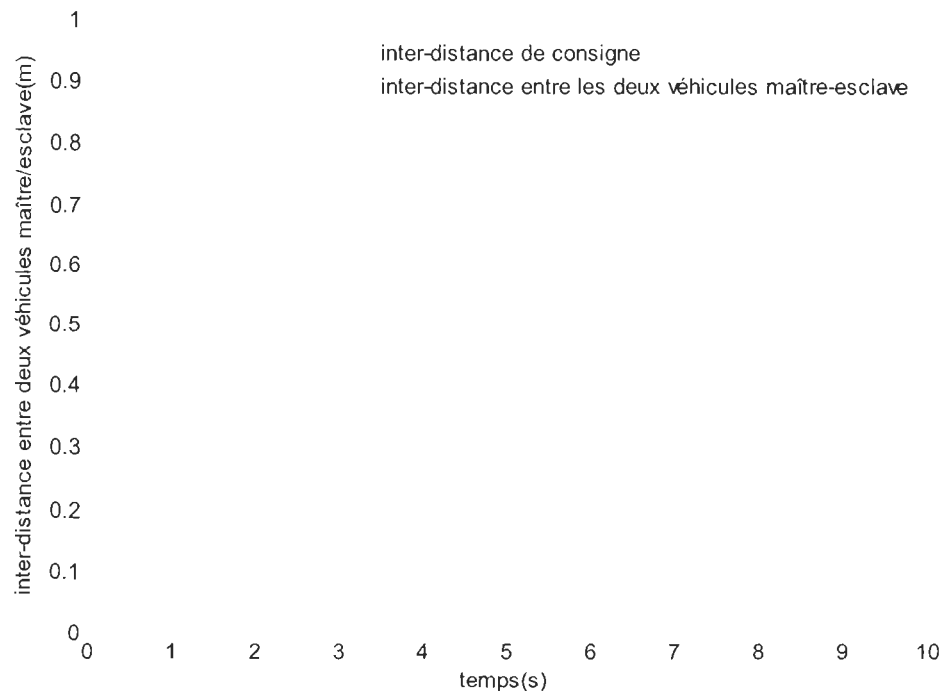


Figure 5.6 : Réponse avec le modèle discret de l'inter-distance entre deux véhicules consécutifs (maître-esclave)

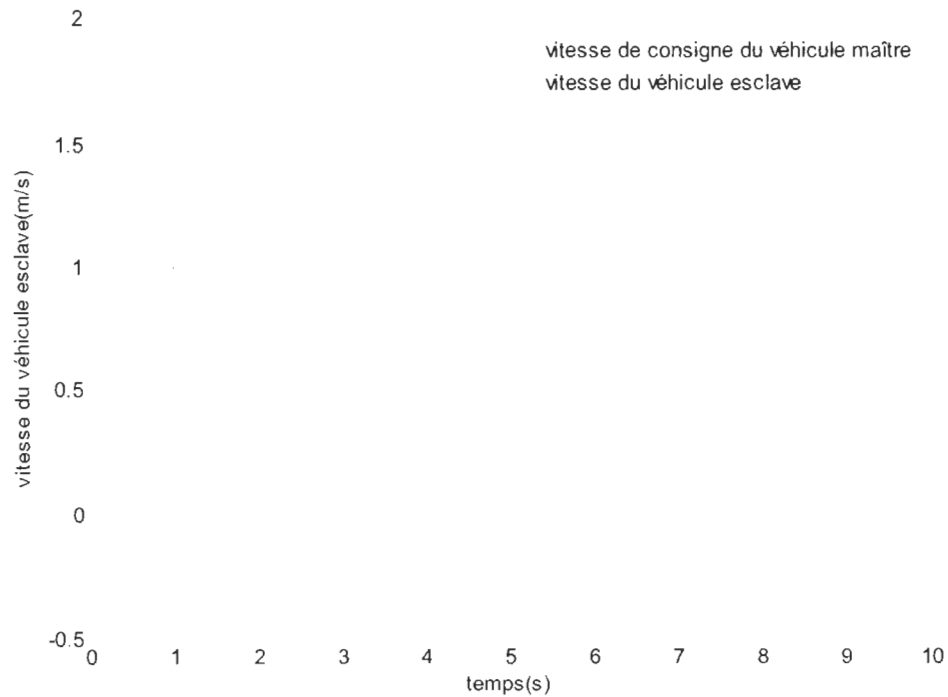


Figure 5.7 : Réponse avec le modèle discret de la vitesse du véhicule esclave

Les résultats obtenus par simulation montrent que la réponse du modèle discret de l'inter-distance et de la vitesse du véhicule esclave est comparable à celle obtenue par le modèle continu et cela sous les mêmes conditions initiales.

5.2.3 Conversion de données des capteurs et calcul de la boucle de commande de l'inter-distance par un microcontrôleur

La détection de l'inter-distance entre les véhicules est assurée par un émetteur-récepteur à ultrasons installé sur le devant du véhicule. Le microcontrôleur décode l'information qui lui a été envoyée par le détecteur ultrasonique et déduit par conséquent l'inter-distance entre le véhicule et véhicule en avant. Cette inter-distance est calculée par le

microcontrôleur pour chaque instant fixé T_e (temps d'échantillonnage) dans le programme du microcontrôleur.

Après calcul de cette inter-distance, le microcontrôleur commande les moteurs en leur imposant un sens de rotation et une consigne de vitesse. L'accélération de la vitesse variera donc en fonction de l'inter-distance ; si l'écart entre les deux véhicules est grand, l'accélération de la vitesse doit être grande pour réduire l'écart entre les deux véhicules. Si l'inter-distance est proche de la valeur désirée, la vitesse est maintenue fixe ou avec une faible accélération ou décélération. Si l'inter-distance est plus faible que la valeur voulue, une forte décélération de la vitesse est appliquée au moteur du véhicule. Si le véhicule s'approche excessivement du véhicule maître, un arrêt sécuritaire des moteurs sera imposé par le microcontrôleur. Le véhicule reprend la poursuite du véhicule maître quand l'inter-distance sera supérieure ou égale à l'inter-distance désirée.

➤ **Conversion des données**

L'aspect conversion des données est fondamental en robotique mobile. Pour calculer toute la boucle de régulation (voir fig. 5.2) (contrôleurs PI et P), le microcontrôleur doit effectuer des conversions de données pour calculer la vitesse et l'inter-distance du véhicule :

- Dans la première étape de conversion, le microcontrôleur reçoit les données du capteur ultrasonique, calcule l'inter-distance et donne le résultat sous forme d'un nombre décimal.
- La deuxième étape de conversion se situe au niveau de la commande du moteur. Classiquement, ce pilotage est réalisé à partir d'une commande de type PWM associée à

un pont en H, donc une nouvelle conversion entre un nombre numérique et une valeur de tension.

La figure 5.8 représente la conversion de l'inter-distance fournie par le microcontrôleur en décimal à une valeur en *cm*.

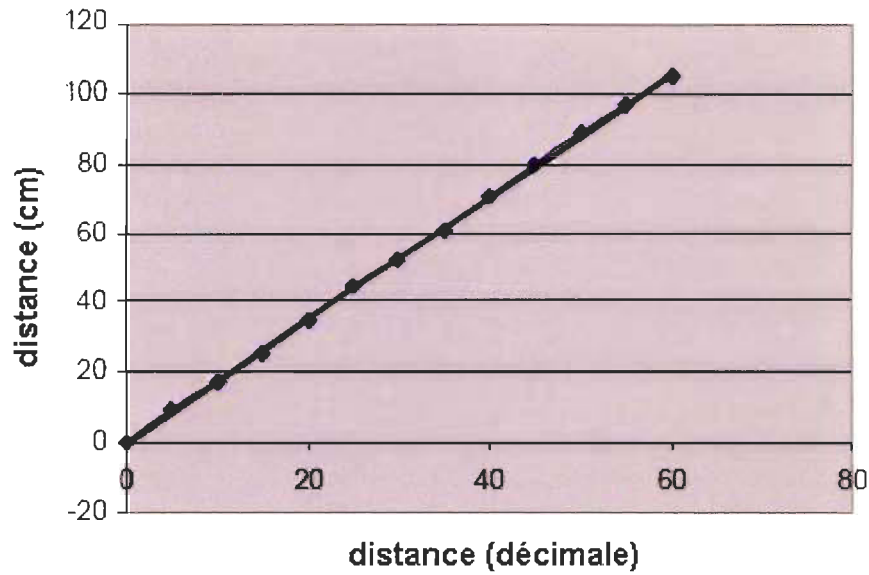


Figure 5.8 : Correspondance entre distance en décimal et en *cm*

La fig. 5.8 expose une relation linéaire de correspondance entre une distance calculée en décimal à une valeur en *cm*. Cette relation est représentée par l'équation suivante :

$$d(cm) = 1.77d(dec) \quad (5.11)$$

On déduit le facteur de conversion suivant

$$F_1 = \frac{d(cm)}{d(dec)} = 1.77 \quad (5.12)$$

or $d(cm)$ et $d(dec)$ représentent respectivement la distance calculée en cm et en décimal.

Pour calculer la vitesse linéaire du véhicule, on suit deux étapes de calcul.

Le facteur de conversion entre une vitesse linéaire du véhicule électrique et une vitesse de rotation de son moteur est donné par :

$$V_{ev} = 2\pi.n.R\omega_{Moteur} \quad (5.13)$$

où V_{ev} , ω_{Moteur} , R , et n représentent respectivement la vitesse linéaire du véhicule électrique, la vitesse de rotation du moteur en tours par seconde, le rayon de la roue et le facteur de réduction entre les vitesses de rotation du moteur et de la roue du véhicule électrique (dans notre cas $n = \frac{60}{36} = 1.66$).

Selon la caractéristique du moteur présentée dans l'annexe E (la vitesse maximale de rotation du moteur est $100tr/min$, qui correspond à une vitesse de rotation de $1.66tr/s$), on détermine la conversion entre un nombre décimal de commande et une vitesse de rotation du moteur par l'équation suivante :

$$V_{dec} = \frac{255}{1.66} \omega_{Moteur} \quad (5.14)$$

On remplace l'équation (5.14) dans (5.13) pour déduire le facteur de conversion entre une vitesse linéaire du véhicule électrique et un nombre décimal de commande de son moteur par l'équation suivante :

$$V_{ev} = 2\pi.n.R \frac{1.66}{255} V_{dec} \quad (5.15)$$

or V_{dec} représente un nombre décimal de commande du moteur.

Soit F_2 le facteur de conversion entre une vitesse linéaire du véhicule et un nombre décimal de mesure de vitesse.

$$F_2 = \frac{V_{ev}}{V_{dec}} = 2\pi.n.R \frac{1.66}{255} \quad (5.16)$$

Pour $R=5.2cm$ et $n=1.66$,

$$F_2 = 0.35 \quad (5.17)$$

➤ **Algorithme de calcul du contrôleur PI de l'inter-distance**

Le code permettant de calculer ce régulateur PI peut s'écrire selon l'algorithme suivant, où le calcul de l'intégrale est effectué en utilisant la méthode des trapèzes :

$$\begin{aligned} err &= d_0 - d \\ I_err &= I_err + K_i \frac{err + err_1}{2} T_c \\ V_{pi} &= K_c \cdot err + I_err \\ err_1 &= err \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\text{où } K_i = \frac{K_c}{\tau_i}$$

On expose dans l'annexe F, l'algorithme de programmation (en langage C) du système de contrôle pour un véhicule électrique, cela dans le cadre d'un système de convoi.

➤ Résultat obtenu expérimentalement

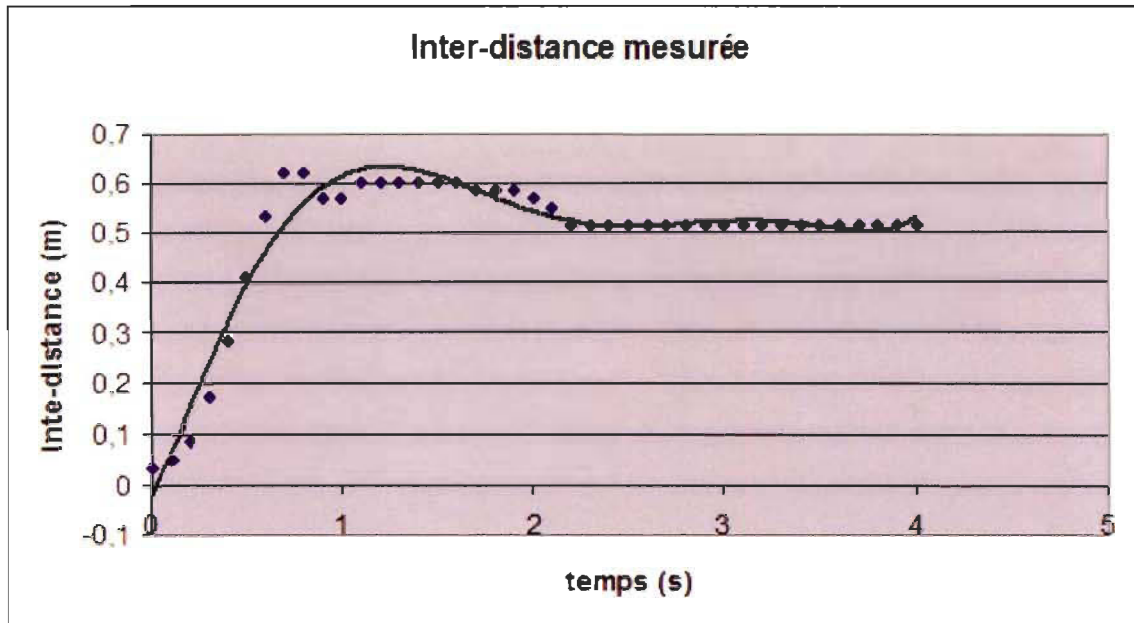


Figure 5.9 : Inter-distance mesurée entre deux véhicules (maître-esclave)

La démonstration expérimentale du convoi des trois véhicules démontre le bon fonctionnement du système de contrôle de l'inter-distance. La figure 5.9 représente la réponse de l'inter-distance obtenue pour une inter-distance de sécurité de 0.5m que doit respecter le véhicule esclave. L'analyse du résultat obtenu expérimentalement montre que la réponse de l'inter-distance mesurée respecte de façon plus efficace les spécifications de la performance du système de contrôle que prévu par la conception (équation 5.8). Le temps de stabilisation de l'inter-distance est maintenant ajusté après une période de 2.5s et on obtient un dépassement de 28%. Cette amélioration s'explique par le fait qu'on a imposé des frottements sur les roues du véhicule esclave (afin de diminuer l'effet du glissement sur le sol).

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de commande de l'inter-distance pour un système du convoi de trois véhicules, puis nous avons validé le système de contrôle dans le domaine discret afin d'implémenter le système dans un microcontrôleur.

Nous avons ensuite établi une architecture de programmation adéquate pour contrôler la vitesse et l'inter-distance relative à des petits véhicules en convoi.

Enfin, l'exécution du banc d'essais démontre le bon fonctionnement du système de convoi. Mais la démonstration présente une déviation d'orientation des véhicules sur la trajectoire désirée à suivre par le convoi des trois véhicules. Pour résoudre ce problème de déviation, on a développé un algorithme de contrôle latéral pour assurer une bonne manœuvre du système de convoi. Le développement de cet algorithme de contrôle est exposé en détail dans l'annexe D. Cet algorithme devra être validé dans les travaux futurs. Pour contourner ce problème, l'expérimentation a cependant été réalisée avec des véhicules sur rails.

Chapitre 6 — Conclusion générale

L'objectif de ce travail de recherche consiste à évaluer la performance d'utiliser une technique de contrôle de l'inter-distance dans les systèmes de convoi, basée sur une implémentation de ressorts et amortisseurs virtuels qui représentent les effets d'interactions désirés entre les véhicules.

Le travail réalisé a consisté, dans un premier lieu, à l'élaboration d'un état de l'art du point de vue théorique sur les systèmes de contrôle longitudinal dans les convois de véhicules. Nous avons constaté grâce à de nombreux exemples de recherches que le contrôle de l'inter-distance dans le système de convoi par l'imposition de ressorts et amortisseurs est d'actualité dans la recherche.

Dans ce mémoire nous avons présenté le modèle d'un véhicule électrique par la méthode de la Représentation Énergétique Macroscopique (REM), puis on a montré les différentes approches d'imposition de distance de sécurité, ainsi qu'exposé un modèle de contrôle de distance de sécurité basé sur l'utilisation de l'amortisseur. Dans ce cadre de modélisation, la structure de contrôle proposée a montré son efficacité dans les situations normales. Mais dans le cas des situations d'urgence (freinage brusque du véhicule maître), la structure de commande proposée est incapable de s'adapter avec cette situation délicate inattendue. Pour cela, il est nécessaire de placer le modèle du ressort à côté d'un amortisseur dans le système de contrôle de l'inter-distance.

Nous avons présenté le modèle du contrôle de l'inter-distance dans un système de convoi de dix véhicules. De cette modélisation représentative de la structure classique du ressort amortisseur dans l'architecture de commande, nous avons élaboré différentes

stratégies de commande (globale, locale et mixte) et cela pour évaluer la stabilité et examiner l'architecture la plus robuste pour contrôler l'inter-distance entre les véhicules du convoi.

Le modèle de contrôle proposé par la structure du ressort-amortisseur, nous a servi comme modèle de référence de définition requise pour développer une architecture de contrôle réactive face à des perturbations brusques du comportement des véhicules. Ainsi la première proposition consistait à adapter le système de contrôle de l'inter-distance aux perturbations dues aux changements de comportement du véhicule maître (accélération ou décélération du véhicule). Pour cela on a incorporé un terme de distance de sécurité additionnel au modèle du contrôleur de l'inter-distance. Les simulations du nouveau modèle ont permis de démontrer le grand apport de cet élément pour maintenir la stabilité du système de convoi durant une perturbation sur la distance de référence désirée (la distance au repos du ressort). Suite à cette modélisation, nous avons développé une stratégie de variation des coefficients du contrôleur de l'inter-distance, de façon à adapter ce dernier à un comportement adéquat envers la situation du système de convoi (situation de freinage d'urgence par exemple). Les résultats de simulation montrent un problème d'interaction entre les deux contrôleurs de vitesse et de l'inter-distance lorsqu'on gère la variation des coefficients de contrôleur d'inter-distance. Ceux-ci provoquent une dégradation de la performance du contrôleur de vitesse (le temps de stabilisation est long lorsque le contrôleur de l'inter-distance devient dominant) et du contrôleur de l'inter-distance (l'erreur des inter-distances est significative lorsque le contrôleur de vitesse devient dominant).

Après l'élaboration de ce modèle, nous avons mis en place une plateforme de banc d'essais sur un système de convoi de trois petits véhicules. Les tests en simulation et

expérimentaux sur l'inter-distance par rapport à une perturbation, nous a permis de valider le bon fonctionnement du modèle qui se révèle être très intéressant pour un système de convoi.

On termine sur les recommandations des travaux futurs qui pourraient s'orienter selon deux axes. Le premier en termes de modélisation, il est possible de définir un modèle de l'inter-distance qui prend en considération la phase d'insertion et ou de retrait d'un véhicule dans une même voie de circulation du système de convoi. D'autre part, l'extension du modèle de voie simple au modèle multivoie, peut être aussi explorée, si on introduit un système de contrôle latéral pour effectuer un changement dans les voies adjacentes (Annexe D).

Pour une deuxième perspective en termes de commande, nous avons réussi à valider des lois de commande proposées dans ce mémoire. Cependant, il reste encore à apporter des améliorations à la boucle de contrôle de l'inter-distance, cela pour éviter les interactions entre les deux contrôleurs, soit celui de vitesse du véhicule et celui d'inter-distance.

Finalement une recommandation en termes d'aspect pratique peut être mentionnée. Nous avons remarqué au cours de la réalisation pratique que le capteur suiveur de la ligne n'est pas capable de fournir en temps réel des informations fiables pour le système de commande latérale de véhicule, en raison de l'éclairage et d'autres limitations de sensibilité (changement de l'information de l'intensité du rayonnement reflété sur la surface de la ligne à suivre), par exemple son positionnement doit être perpendiculaire et avec une certaine précision par rapport à sa hauteur du sol. Le type de capteur utilisé est incapable de faire une détection fiable. Ceci cause une déviation sur la ligne de référence à suivre par le véhicule. Ceux-ci dégradent gravement la performance de la stabilité du système de contrôle latéral.

Bibliographie

- [Bau95] Bauer M, Tomizuka M. « Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems ». California Path Report, UCB-ITS-PRR-95-14, 1995.
- [Bra00] Brackstone M. et McDonald M., "Car-Following: a historical review", Transportation Research Part F 2, Pergamon, 2000, pages 181-196.
- [Chan58] Chandler R.E., Herman R., Montroll E.W., "Traffic Dynamics: Studies in Car Following". Operation Research, No.6, 1958, pages 165-184.
- [Chen08] K. Chen, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, Juin 2008, pages 1097-1102.
- [Chien92] Chien C. et Ioannou P., "Automatic Vehicle-Following". Proceeding of American Control Conference 1992, Chicago, IL, pages 1748-1752.
- [Dav96] P. Daviet, M. Parent. "Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon". Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Pages 41-46

- [Fan01] Fancher P., Bareket Z. et Ervin R. "Human-Centered Design of an Acc-With Braking and Forward-Crash-Warning System". *Vehicle System Dynamics* 2001, vol. 36, No 2-3, pages 203-223
- [Gaz59] Gazis D.C., Herman R., Potts R.B., "Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow". *Operation Research*, No.7, 1959, pages 499-505.
- [Gaz61] Gazis D.C., Herman R., Rothery W., "Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow". *Operation Research*, No.9, 1961, pages 545-567.
- [Hou96] M. Hou, S. H. Yeo, L. Wu, H. B. Zhang. "Teleoperation Characteristics and Human Response Factor in Relation to a Robotic Welding System". *IEEE/RSJ International Conference*. Vol. 3, Nov 1996, pages 1195-1202.
- [Hoo01] Hoogendoorn S.P. et Bovy P.H.L., "State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling". *Proceedings of the IMECH E Part I Journal of Systems and Control in Engineering*, Vol.215, No.4, 2001, pages 283-303.
- [Mar07] John-Jairo Martinez, Carlos Canudas de Wit. "A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios ". *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 15, No. 2, Mars 2007. pages 246 – 258.
- [Sug85] M. Sugeno, M. Nishida « Fuzzy control of model car ». *Fuzzy sets and systems*, Volume 16, No 2, Juillet 1985, pages 103-113.

- [Shei90] S. Sheikholeslam et C.A. Desoer, « Longitudinal control of a platoon of vehicles ». American control conference, Vol. 1, Mai 1990, pages 291-296.
- [Shei92] S. Sheikholeslam et C.A. Desoer. « A system level study of the longitudinal control of a platoon of vehicles ». ASME J. Dynamic Syst., Meas. Cont., Vol. 114, No. 2, June 1992, pages 286-292.
- [Shei93] S. Sheikholeslam et C.A. Desoer, « Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles with no Communication of Lead Vehicle Information: A System Level Study ». IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 42, No. 4, Novembre 1993, pages 546 – 554.
- [Vex] Système de Vex Robotics Design : <http://www.vexrobotics.com/products>
- [Xian96] M. Xiangwei, «simpling and reconstruction of Bandpass Signal». Signal Processing, 1996, 3rd International Conference, Vol 1, Octobre 1996, pages 80-82.
- [Yan01] D. Yanakiev, et I. Kanellakopoulos, « Longitudinal Control of Automated CHVs with Significant Actuator Delays ». IEEE Transactions on vehicular technology, Vol 50, Septembre 2001, pages 1289 - 1297.
- [Yeon05] Soo-Yeong Yi, Kill-To Chong « Impedance control for a vehicle platoon system ». Mechatronics, Elsevier, Vol. 15, 2005, pages 627-638.

Autres références

- [Dav03] L.C. Davis. « Modifications of the optimal velocity traffic model to include delay due to driver reaction time ». Elsevier, Vol. 319, No 11, March 2003, pages 557-567.
- [God93] Datta N. Godbole et John Lygeros. « Longitudinal control of the lead car of a platoon ». IEEE Transaction on Intelligent Machines and Robotics, Vol. 43, Novembre 1993, pages 1125 – 1135.
- [Haj02] A. El hajjaji, S.Bentalba. « Fuzzy Path Tracking Control for automatic steering of vehicles ». Robotics and Autonomous Systems, Elsevier science, Vol 43, Mars 2003, pages 203–213.
- [Ioa93] P.A. Ioannou, et C. C. Chien. « Autonomous Intelligent Cruise Control ». IEEE Transactions on vehicular technology, Vol 42, November 1993, page(s):657 – 672
- [Kaw96] Taketoshi Kawabe, Masanori Kobayashi, Souichi Nakabayashi, Ikurou Notsu, Yoshito Watanabe. « A Concept of Car in a Virtual Moving Cell Platoon Construction on an Automated Highway System ». IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Tokyo, Japon, 1996, pages 397-402.

- [Lee01] G.D Lee, S.W. Kim. « A longitudinal control system for a Platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm ». Electrical and computer engineering division, POSTECH university, Korée du Sud, 4 Décembre 2001, pages 790-784.
- [Leun95] T.P. Leungn, Zhou Qi-jie, Mao Zhong-yuan et Yu De-jiang. « A Design Method for Vehicle Dynamic Systems Based on Fuzzy Logic Control ». Proceedings of the American Control Conference Seattle, Washington. Vol.5, Juin 1995, pages 3239 – 3243.
- [Sas89] S.S. Sastry et A. Isidori, « Adaptive control of linearizable systems », *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, Novembre 1989, pages 1123-1131.
- [Sesh99] Sridhar Seshagiri SRL, H.K. Khalil « Longitudinal Adaptive Control of a Platoon of Vehicles ». IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 5, Juin 1999, pages 3681 – 3685.
- [Shl91] S.E. Shladover, C.A. Desoer, J.K. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, Wei-Bin Zhang, D.H. McMahon, Huei Peng, S. Sheikholeslam, et N. McKeown. « Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program ». *IEEE Transactions on vehicular technology*, Vol. 40, No. 1, Février 1991, pages 114-130.

- [Soo01] Tae Soo No, Kil-To Chong, et Do-Hwan Roh. « A Lyapunov Function Approach to Longitudinal Control of Vehicles in a Platoon ». IEEE Transactions on vehicular technology, Vol 50, Janvier 2001, pages 116 - 124.
- [Wan98] Yibing Wang, Zengjin Han. « Stability of an Automated Vehicle Platoon ». Proceedings of the American Control Conference, Philadelphie, Pennsylvanie, Vol 2, Juin 1998, pages 950-954.
- [Yeo04] Soo-Yeong Yi, Kil-To Chong. « Impedance control for a vehicule platoon system ». Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk Nationnal University, Korée; Mechatronics, Vol 15, Mars 2005, pages 627–638.

Annexe A

Structure du contrôleur de vitesse PID et du courant de l'induit du moteur de véhicule électrique

Cette annexe a pour but d'expliquer de manière concise, une méthode simple permettant de déterminer les coefficients d'un régulateur PID et IP pour un asservissement en vitesse et en courant d'un véhicule électrique. Cette méthode bien que générale est appliquée ici dans le cadre d'un asservissement pour un véhicule électrique.

- **Fonction de transfert d'asservissement de la vitesse du véhicule électrique**

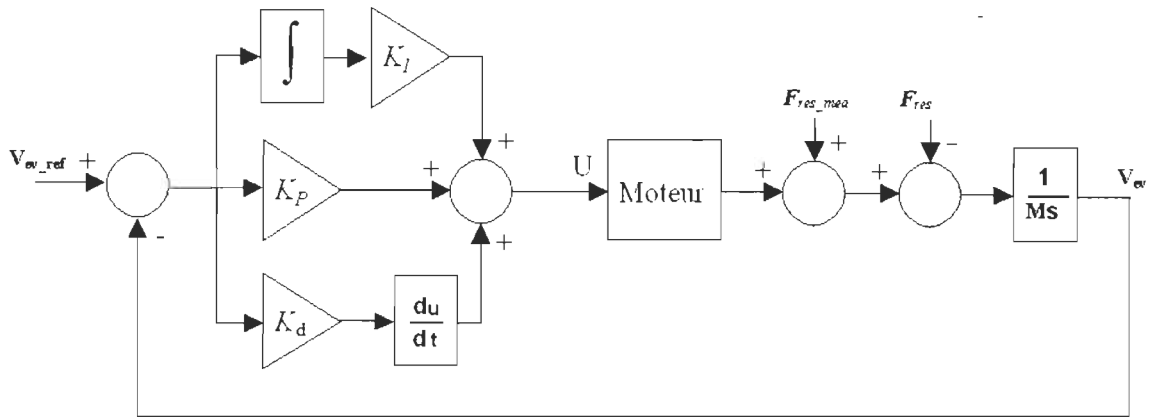


Figure A.1 : Schéma bloc d'asservissement de la vitesse du véhicule électrique

Classiquement, la fonction de transfert d'un moteur à courant continu (MCC) peut être assimilée à un système du premier ordre (la constante de temps électrique étant beaucoup plus petite que la constante de temps mécanique) soit :

$$H_m = \frac{K}{1 + \tau.s} \quad (A-1)$$

avec :

$$K = \frac{K_{rcl} k_{i_f} u_{bat}}{R_{rml} R_a} \text{ représente une constante électrique du moteur (voir l'équation (2.13))}$$

$$\tau = \frac{L_a}{R_a}, \text{ la constante de temps électrique du moteur cc.}$$

Selon le schéma bloc de la figure A.1, on détermine la fonction de transfert en boucle fermée

$$H(s) = \frac{V_{cv}}{V_{cv_ref}} = \frac{KK_i + KK_p.s + KK_d.s^2}{M\tau.s^3 + (KK_d + M).s^2 + KK_p.s + KK_i} \quad (A-2)$$

On peut également écrire cette fonction de transfert sous forme canonique

$$H(s) = \frac{\frac{KK_i}{M\tau} + \frac{KK_p}{M\tau}.s + \frac{KK_d}{M\tau}.s^2}{\frac{KK_i}{M\tau} + \frac{KK_p}{M\tau}.s + \frac{(KK_d + M)}{M\tau}.s^2 + s^3} \quad (A-3)$$

- **Réglage des coefficients du PID**

Pour régler un PID, il existe de nombreuses méthodes. Le réglage proposé dans ce document permet de déterminer les 3 coefficients du PID en fonction de deux paramètres physiques représentatifs.

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire de la manière suivante :

$$D(s) = (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n.s + \omega_n^2) \quad (A-4)$$

En posant

$$\begin{aligned}
\frac{KK_i}{M\tau} &= \omega_n^3 \\
\frac{KK_p}{M\tau} &= \omega_n^2(1 + 2\xi) \\
\frac{KK_d + M}{M\tau} &= \omega_n(1 + 2\xi)
\end{aligned} \tag{A-5}$$

Sous cette écriture, on se rend compte que cela correspond à un système du premier ordre suivi d'un second ordre. De plus, les paramètres ξ et ω_n étant des réels strictement positifs, le système est toujours stable. On voit donc qu'en jouant sur le paramètre ξ , on peut spécifier si oui ou non on souhaite un dépassement de la consigne. En jouant sur le paramètre ω_n , on peut régler la vitesse de réponse du système.

Alors on déduit les coefficients du contrôleur PID

$$\begin{aligned}
K_i &= \frac{M\tau\omega_n^3}{K} \\
K_p &= \frac{M\tau\omega_n^2(1 + 2\xi)}{K} \\
K_d &= \frac{M(\tau\omega_n(1 + 2\xi) - 1)}{K}
\end{aligned} \tag{A-6}$$

- **Fonction de transfert d'asservissement du courant d'induit du moteur électrique**

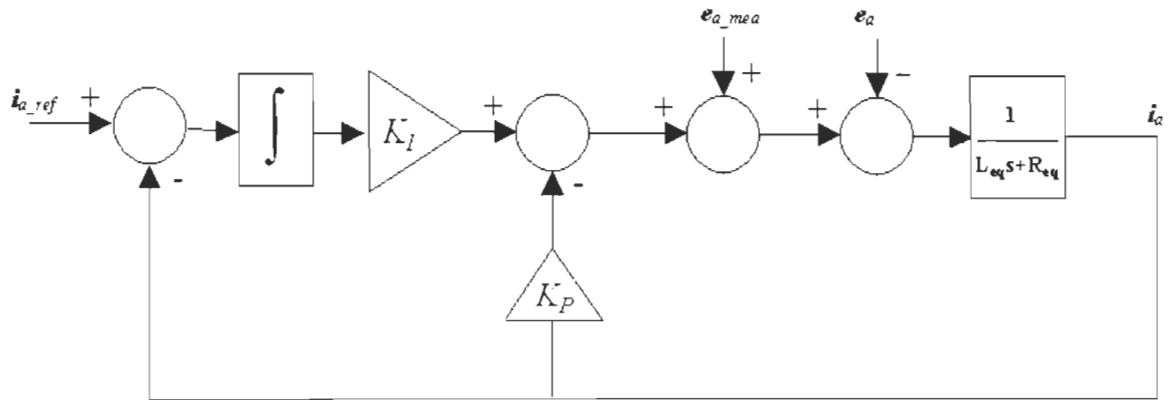


Figure A.2 : Schéma bloc d'asservissement du courant d'induit d'un moteur électrique

Regardons tout d'abord l'équation de l'induit du moteur courant continu

$$L_{eq} \frac{d}{dt} i_a + R_{eq} i_a = u_{ch} - e_a \quad (\text{A-7})$$

où L_{eq}, R_{eq}, i_a, e_a et u_{ch} représentent respectivement l'inductance et la résistance équivalentes du moteur cc, le courant à la sortie de l'induit, la force électromotrice et la tension à la sortie du hacheur.

Le contrôleur utilisé est de type IP tel qu'illustré à la figure A.2. Donc la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$H(s) = \frac{i_a}{i_{a-ref}} = \frac{\frac{K_i}{L_{eq}}}{s^2 + \frac{R_{eq} + K_p}{L_{eq}}s + \frac{K_i}{L_{eq}}} \quad (A-8)$$

- Réglage des coefficients du contrôleur IP

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire de la manière suivante :

$$D(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

En posant

$$\begin{aligned} \frac{K_i}{L_{eq}} &= \omega_n^2 \\ \frac{R_{eq} + K_p}{L_{eq}} &= 2\xi\omega_n \end{aligned} \tag{A-9}$$

d'où, les gains intégral et proportionnel du contrôleur IP :

$$\begin{aligned} K_i &= L_{eq}\omega_n^2 \\ K_p &= 2\xi\omega_n L_{eq} - R_{eq} \end{aligned} \tag{A-10}$$

Annexe B

Paramètres de simulation

Cette annexe présente les paramètres des différentes simulations dont les résultats ont été présentés au chapitre 4.

Tableau B.1
Paramètres des véhicules de convoi

Paramètre	Description	Valeur	Unité
M	Masse pour chacun des véhicules de convoi	1300	(kg)
L	Longueur pour chacun des véhicules de convoi	3	(m)
c'	Coefficient visqueux de frottement avec le sol	180	(N/m/s)

Tableau B.2
Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.1); 1^{er} cas : même vitesse de consigne pour tous les contrôleurs PID

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.1
	τ_d	0.2
Contrôleur de l'inter-distance	k	8.16
	c	5.71

Tableau B.3
Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande locale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.1); 2^{ème} cas : attribution de la vitesse de consigne en cascade pour tous les contrôleurs de vitesse PID

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.05
	τ_d	0.2
Contrôleur de l'inter-distance	k	81.6
	c	18

Tableau B.4

Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande globale pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.2)

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.05
	τ_d	0.2
Contrôleur de l'inter-distance	k	81.6
	c	80

Tableau B.5

Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance (voir chapitre 4.5.3)

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.05
	τ_d	0.2
Contrôleur de l'inter-distance	k	81.6
	c	18

Tableau B.6

Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle classique de l'inter-distance incluant le terme de distance de sécurité (voir chapitre 4.5.4)

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.08
	τ_d	0.2
Constante du temps	h	0.066(s)
Contrôleur de l'inter-distance	k	225
	c	15

Tableau B.7

Gains des contrôleurs (vitesse et inter-distance) de la stratégie de commande mixte pour un système de contrôle de l'inter-distance avec des coefficients variables du ressort amortisseur (voir chapitre 4.5.5)

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de vitesse	K_c	10
	τ_i	0.08
	τ_d	0.2
Constante du temps	h	0.066(s)
Contrôleur de l'inter-distance	k	225
	c	15

Annexe C

Développement des calculs pour trouver le vecteur de déplacement et l'erreur de l'inter-distance

Cette annexe présente les étapes de calcul pour trouver le vecteur de déplacement de chaque véhicule, ainsi que l'erreur de l'inter-distance associée à chaque paire de véhicules consécutifs.

Calcul de la matrice inverse K^{-1}

Pour obtenir la matrice inverse K^{-1} , il faut calculer le déterminant de cette matrice, ainsi que sa matrice de cofacteurs.

Le déterminant de K^{-1} est donné par l'expression suivante :

$$\det K = \begin{vmatrix} k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{K_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{K_c}{\tau_i} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k + \frac{K_c}{\tau_i} & \frac{K_c}{\tau_i} & 0 \\ -k & \frac{K_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & \frac{K_c}{\tau_i} & k + \frac{K_c}{\tau_i} \end{vmatrix} \quad (C.1)$$

On développe le déterminant par le calcul suivant :

$$\begin{aligned} \det K &= (k + \frac{K_c}{\tau_i})(\frac{K_c}{\tau_i}(k + \frac{K_c}{\tau_i}) + k \frac{K_c}{\tau_i}) + k \frac{K_c}{\tau_i}(k + \frac{K_c}{\tau_i}) \\ &= \frac{K_c}{\tau_i}(k + \frac{K_c}{\tau_i})(3k + \frac{K_c}{\tau_i}) \end{aligned} \quad (C.2)$$

La matrice des cofacteurs de K est donnée par l'expression suivante :

$$CofK = \begin{bmatrix} (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & k^2 \\ k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{K_c}{\tau_i})^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) \\ k^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

Donc on déduit la matrice inverse K^{-1} suivante :

$$K^{-1} = \frac{1}{\frac{K_c}{\tau_i}(k + \frac{K_c}{\tau_i})(3k + \frac{K_c}{\tau_i})} \begin{bmatrix} (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & k^2 \\ k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{K_c}{\tau_i})^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) \\ k^2 & k(k + \frac{K_c}{\tau_i}) & (k + \frac{3-\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{3+\sqrt{5}}{2} \frac{K_c}{\tau_i}) \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

- **Calcul du vecteur de déplacement, ainsi que l'erreur de l'inter-distance associée à chaque paire de véhicules consécutifs.**

Selon les hypothèses qu'on a posées dans la section 4.2, on a trouvé le vecteur de déplacement donné par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{K_c}{\tau_i} x_1^* + kx_0 - c'\dot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_2^* - c'\dot{x}_f \\ \frac{K_c}{\tau_i} x_3^* - kx_0 - c'\dot{x}_f \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

On pose :

$$\begin{aligned}
x' &= kx_0 - c'\dot{x}_f \\
x'' &= -c'\ddot{x}_f \\
x''' &= -kx_0 - c'\ddot{x}_f \\
x_1^* - x_2^* &= x_{120} = x_0 \\
x_2^* - x_3^* &= x_{230} = x_0 \\
A &= \frac{1}{\det K}
\end{aligned} \tag{C.6}$$

On remplace (C.6) dans (C.5) :

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{3k^2 + 4k \frac{K_c}{\tau_i} + \left(\frac{K_c}{\tau_i}\right)^2}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)\left(3k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)} x_1^* - \frac{k}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)} x_0 + ax' + bx'' + cx''' \\
x_2 &= x_2^* + a'x' + b'x'' + c'x''' \\
x_3 &= \frac{3k^2 + 4k \frac{K_c}{\tau_i} + \left(\frac{K_c}{\tau_i}\right)^2}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)\left(3k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)} x_3^* + \frac{k}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)} x_0 + a''x' + b''x'' + c''x'''
\end{aligned} \tag{C.7}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
a &= A\left((2k + \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{K_c}{\tau_i}) - k^2\right) \\
a' &= Ak\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right) \\
a'' &= Ak^2 \\
b &= Ak\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right) \\
b' &= A\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right)^2 \\
b'' &= Ak\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right) \\
c &= Ak^2 \\
c' &= Ak\left(k + \frac{K_c}{\tau_i}\right) \\
c'' &= A\left((2k + \frac{K_c}{\tau_i})(k + \frac{K_c}{\tau_i}) - k^2\right)
\end{aligned} \tag{C.8}$$

Maintenant on cherche l'erreur de l'inter-distance pour chaque paire de véhicules consécutifs. Pour cela on calcule l'inter-distance entre le véhicule de tête de convoi 1 et le véhicule 2, ainsi l'inter-distance entre le véhicule 2 et celui qui le suit, soit le véhicule 3.

$$\begin{aligned}
 x_1 - x_2 &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} x_0 + (a - a')x' + (b - b')x'' + (c - c')x''' \\
 x_2 - x_3 &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} x_0 + (a' - a'')x' + (b' - b'')x'' + (c' - c'')x'''
 \end{aligned} \tag{C.9}$$

On développe les calculs suivants :

$$\begin{aligned}
 a - a' &= A \frac{K_c}{\tau_i} \left(2k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \\
 b - b' &= -A \frac{K_c}{\tau_i} \left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \\
 c - c' &= -Ak \frac{K_c}{\tau_i} \\
 a' - a'' &= Ak \frac{K_c}{\tau_i} \\
 b' - b'' &= -A \frac{K_c}{\tau_i} \left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \\
 c' - c'' &= A \frac{K_c}{\tau_i} \left(\frac{K_c}{\tau_i} - 2k \right)
 \end{aligned} \tag{C.10}$$

On remplace les valeurs de (C.10) dans (C.9) :

$$\begin{aligned}
 x_1 - x_2 &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} x_0 + \frac{2k + \frac{K_c}{\tau_i}}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x' - \frac{1}{\left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x'' - \frac{k}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x''' \\
 x_2 - x_3 &= \frac{\frac{K_c}{\tau_i}}{k + \frac{K_c}{\tau_i}} x_0 + \frac{k}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x' + \frac{1}{\left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x'' + \frac{2k + \frac{K_c}{\tau_i}}{\left(k + \frac{K_c}{\tau_i} \right) \left(3k + \frac{K_c}{\tau_i} \right)} x'''
 \end{aligned} \tag{C.11}$$

On remplace x' , x'' et x''' dans (C.11) par ses valeurs dans (C.6) :

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= x_1 - x_2 = x_0 \\ \Delta p_2 &= x_2 - x_3 = x_0\end{aligned}\tag{C.12}$$

Annexe D

Modèle de contrôle latéral du petit véhicule

La détection d'une déviation entre la référence de la trajectoire rectiligne et la trajectoire effectuée par le véhicule, nécessite d'inclure au système de contrôle, une commande latérale qui va assurer une poursuite rectiligne des véhicules dans le système de convoi. Quatre capteurs suiveur de la ligne sont installés sous le véhicule pour détecter la référence de la trajectoire désirée à suivre. Deux capteurs installés en avant et deux autres en arrière du véhicule. Le fonctionnement de ce capteur est expliqué dans la section 5.2.4.

La correction de la trajectoire à suivre est obtenue par la manœuvre d'un servomoteur. Ce dernier permet de donner une orientation de la roue du véhicule avec un angle précis (braquage de la roue) demandée par le microcontrôleur et cela pour corriger l'erreur de la trajectoire désirée.

- **Modèle cinématique pour une faible vitesse du véhicule**

Pour modéliser le système de contrôle latéral du véhicule, on a utilisé un modèle cinématique du véhicule développé par Daviet [Dav96]. La figure D.1 représente le modèle latéral du véhicule avec une seule roue de direction.

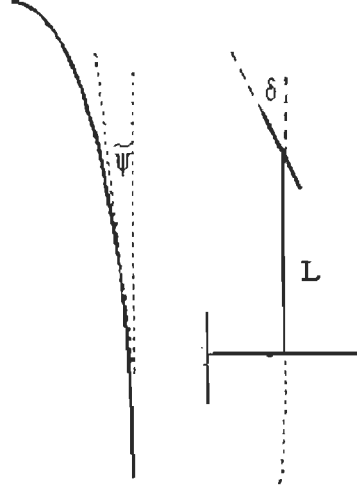


Figure D.1 Modèle latéral du véhicule

On utilise le modèle cinématique du véhicule dans l'espace cartésien

$$\begin{aligned}\dot{X} &= V(\cos \psi - \sin \psi \cdot \tan \delta) \\ \dot{Y} &= V(\sin \psi + \cos \psi \cdot \tan \delta) \\ \dot{\psi} &= \frac{1}{L}(\dot{Y} \cos \psi - \dot{X} \sin \psi) = \frac{V}{L} \tan \delta \approx \frac{V}{L} \delta\end{aligned}\tag{D.1}$$

Où $\dot{X}, \dot{Y}, V, L$ représentent la dérivée de position du véhicule sur l'axe X et Y , la vitesse et la longueur du véhicule. δ et ψ représentent respectivement l'angle de braquage de la roue et celle de déviation du véhicule sur la trajectoire de référence.

Pour mesurer l'angle et l'orientation de déviation du véhicule, on utilise 4 capteurs suiveur de la ligne ; deux capteurs pour avoir une mesure avant et deux autres pour une mesure arrière du véhicule.

$$\tan \delta = \frac{\Delta Y}{\Delta X - L}\tag{D.2}$$

Où ΔX et ΔY représentent respectivement la variation de position du véhicule sur l'axe des ordonnées X et Y

La figure D.2 définit la boucle du contrôleur latéral du véhicule

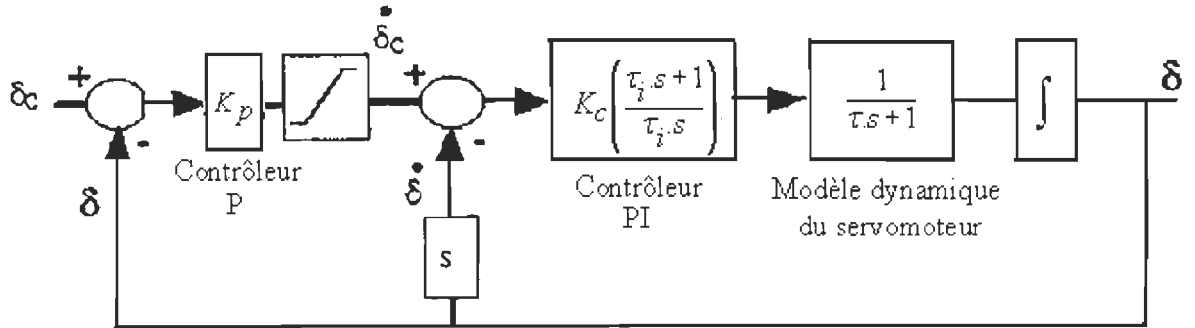


Figure D.2 Boucle du contrôleur latéral du véhicule

La fonction de transfert de cette boucle de commande est donnée par l'équation suivante :

$$C(s) = \frac{\frac{K_p K_c}{\tau} s + \frac{K_p K_c}{\tau \tau_i}}{s^3 + \frac{1 + K_c}{\tau} s^2 + \frac{K_c}{\tau \tau_i} (K_p \tau_i + 1) s + \frac{K_p K_c}{\tau \tau_i}} \quad (D.3)$$

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire de la manière suivante :

$$D(s) = (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (D-4)$$

En posant

$$\begin{aligned} \frac{K_p K_c}{\tau \tau_i} &= \omega_n^3 \\ \frac{K_c}{\tau \tau_i} (K_p \tau_i + 1) &= \omega_n^2 (1 + 2\xi) \\ \frac{1 + K_c}{\tau} &= \omega_n (1 + 2\xi) \end{aligned} \quad (D-5)$$

On en déduit alors les valeurs des paramètres du contrôleur PI et P.

$$\begin{aligned}
K_c &= \omega_n \tau (1 + 2\xi) - 1 \\
K_p &= \frac{\tau \omega_n^2 (1 + 2\xi)}{2K_c} \pm \frac{\tau \omega_n^2}{2K_c} \sqrt{(1 + 2\xi)^2 - \frac{4K_c}{\tau \omega_n}} \\
\tau_i &= \frac{(1 + 2\xi)}{2\omega_n} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1 + 2\xi}{\omega_n} \right)^2 - \frac{4K_c}{\tau \omega_n^3}}
\end{aligned} \tag{D-6}$$

On utilise la solution de τ_i soit la plus près de ω_n , ou si non le τ_i le plus faible pour obtenir l'annulation d'un pôle ou un zéro en haut fréquence.

Annexe E

Présentation de l'équipement du Robot kit de Vex

Dans cette annexe on va présenter en détail la description du fonctionnement des composants du Robot kit de Vex, qui sont utilisés pour les véhicules électriques.

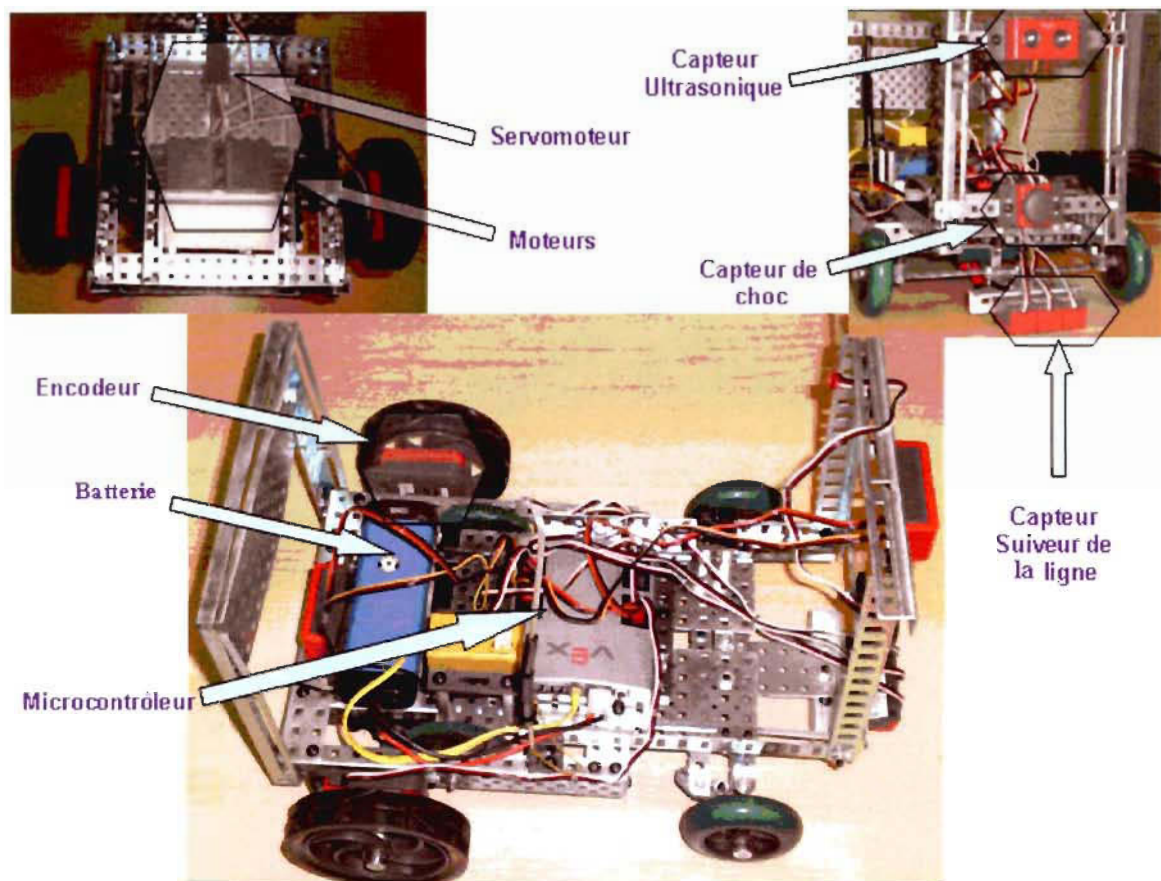


Figure E.1 : Véhicule électrique équipé par les composants du Robot kit Vex

- Moteur du Robot kit Vex



Figure E.2 : Moteur cc [Vex]

Le rôle principal du moteur dans le véhicule électrique est de fournir une force de traction, afin que le véhicule se déplace à une vitesse variable.

La fiche technique fournie par la compagnie Vex définit les caractéristiques électriques de ce moteur tel que présenté dans le tableau E.1.

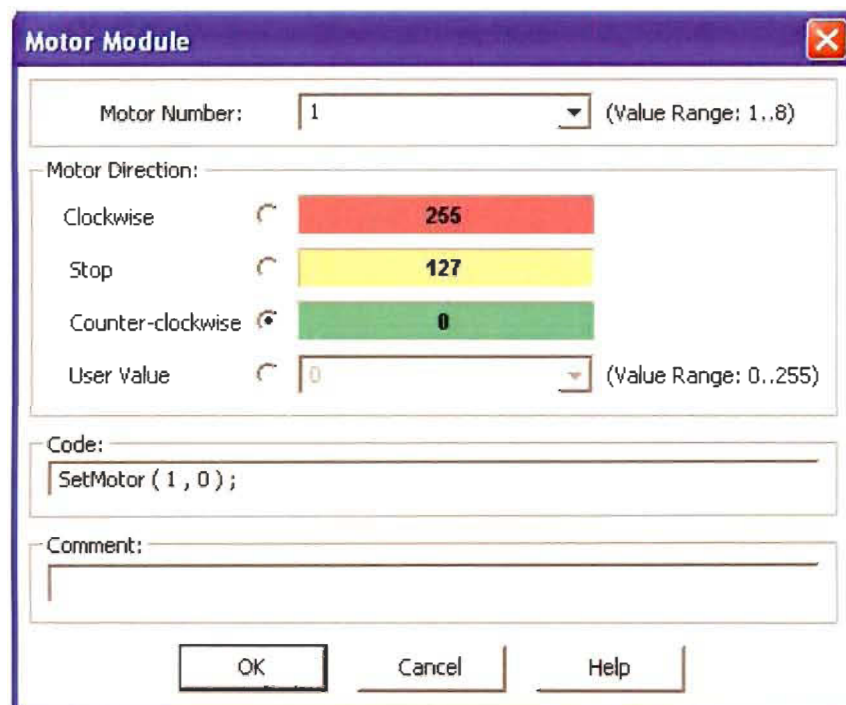
Tableau E.1
Caractéristiques du moteur cc

Vitesse de rotation maximale	100 tours par minute à 7.5V
Signal de contrôle PWM	$T_{on}=1\text{ms}-2\text{ms}$ correspondent respectivement aux vitesses maximales en avant et en arrière dans le sens de rotation du mouvement. $T_{on}=1.5\text{ms}$ correspond à l'état d'arrêt du moteur. $T=18.5\text{ms}$ correspond à la période de PWM
Bande morte	1.47ms-1.55ms est un intervalle de délai de PWM qui correspond à l'état d'arrêt du moteur
Couple maximum	6.5 po-lbs (approximativement)

- Configuration du module moteur avec EasyC

Module du moteur : 

On utilise ce bloc pour contrôler le moteur. Le moteur peut tourner continuellement à une valeur de PWM (modulation de largeur d'impulsion). Le Microcontrôleur envoie aux moteurs un signal PWM de rapport cyclique variable. Ce signal impose un sens de rotation aux moteurs ainsi qu'une vitesse de rotation, car la vitesse de rotation dans les moteurs à courant continu varie en fonction de la valeur moyenne du signal. Cette valeur moyenne change en fonction du rapport cyclique de PWM.



Motor Module

Motor Number: 1 (Value Range: 1..8)

Motor Direction:

- Clockwise: 255
- Stop: 127
- Counter-clockwise: 0
- User Value: 0 (Value Range: 0..255)

Code: SetMotor (1 , 0);

Comment:

OK Cancel Help

Figure E.3 : Bloc module moteur [Vex]

Nous pouvons sélectionner quatre options pour déterminer la direction et la vitesse du moteur.

Chaque option sélectionnée indiquera la forme du modèle moteur suivante :

➤ **CLOCKWISE** 

Cette option permet au moteur de tourner à une vitesse maximale dans le sens des aiguilles d'une montre.

➤ **STOP** 

Cette option force le moteur de stopper.

➤ **COUNTER-CLOCKWISE** 

Cette option permet au moteur de tourner à une vitesse maximale dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

➤ **USER VALUE** 

Cette option nous permet de choisir une valeur de PWM, qui correspond à une vitesse de rotation quelconque du moteur.

- Capteur ultrasonique du Robot kit de VEX

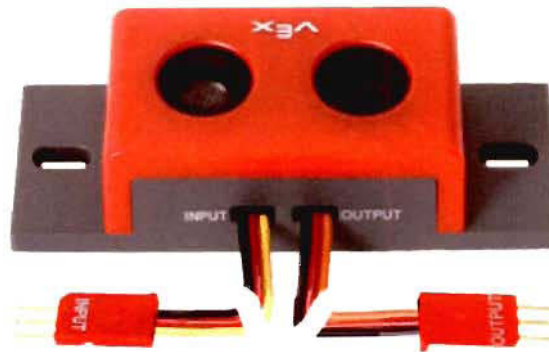


Figure E.4 : Capteur ultrasonique [Vex]

Le but d'utiliser ce capteur dans notre projet est de déterminer l'inter-distance entre deux véhicules consécutifs. Selon la fiche technique fournie par la compagnie VEX, on définit les caractéristiques de ce capteur ultrasonique dans le tableau E.2.

Tableau E.2
Caractéristiques du capteur ultrasonique

Portée de détection de l'obstacle	Le capteur est capable de détecter un obstacle dans la région de 3cm à 3m
Fréquence d'onde	40 kHz
Signal d'entrée	Est un signal provenant du microcontrôleur pour activer ou désactiver le capteur.
Signal de sortie	Est un signal qui donne l'information sur la détection du retour d'onde ultrasonique.

- Fonctionnement du capteur

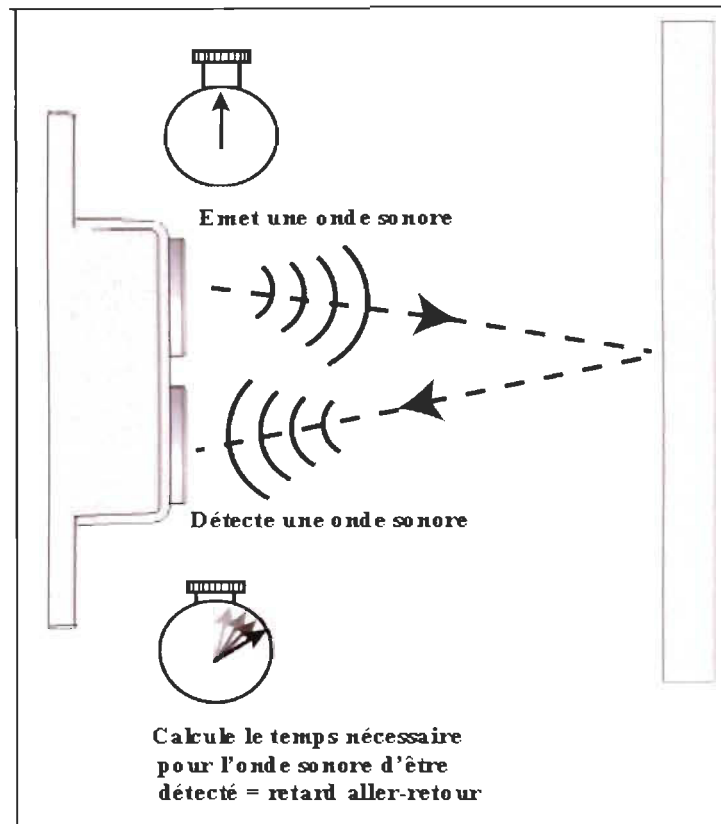


Figure E.5 : Technique de mesure de la distance d'obstacle [Vex]

Ce capteur ultrasonique est composé de deux éléments :

- Un émetteur, qui transmet des ondes sonores d'une fréquence de 40kHz avec une largeur d'impulsion de 250 microsecondes.
- Un récepteur, qui détecte l'onde transmise par l'émetteur réfléchi par un obstacle. Le capteur envoie un signal électrique au microcontrôleur au moment de la réception de l'onde réfléchi.

Le calcul de l'inter-distance est assuré par le calcul du temps que l'onde a pris pour faire un aller retour ; connaissant la vitesse de voyage (propagation) de l'onde, on peut déduire la distance que l'onde a parcourue.

La distance à l'objet peut alors être calculée avec la formule suivante :

$$D = V \cdot \frac{T}{2} \quad (E.1)$$

Où D , V et T représentent respectivement la distance parcourue par l'onde du capteur ultrasonique, la vitesse de propagation de l'onde et le temps que l'onde a pris pour faire un aller retour. Notons que la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique donnée par le constructeur est de valeur : $V = 344.2 (m/s)$

Le microcontrôleur code la distance en un format décimal allant de 2 à 99. Le chiffre 2 représente une distance minimale et le chiffre 99 représente des distances maximales. Ces codes décimaux correspondent à des distances réelles allant de 3 cm à 300 cm.

- Configuration du Capteur ultrasonique avec EasyC

Module ultrasonique  :

Ce module nous permet de définir le comportement de l'inter-distance à partir des signaux analogiques du capteur. L'onde sonore du transducteur ultrasonique utilise une haute fréquence pour détecter les objets. Ce capteur émet une onde sonore et mesure le temps que prend l'onde sonore pour rebondir. La mesure est traduite en une valeur numérique de 2 – 99. Si le capteur ne détecte pas un objet, il va lire une valeur élevée, environ 99.

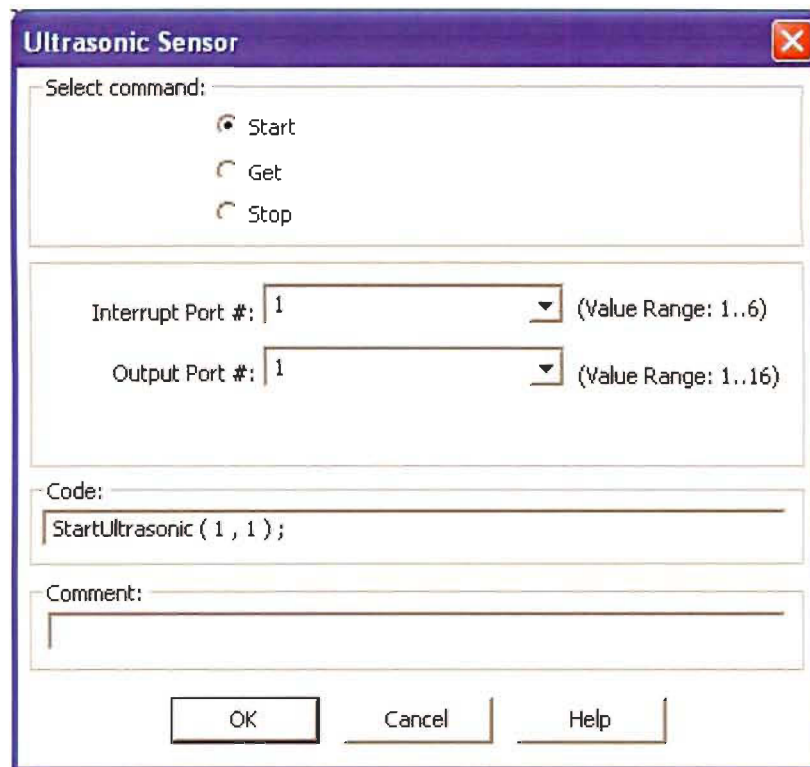


Figure E.6 : Bloc du module ultrasonique [Vex]

Ce bloc nous permet de configurer le capteur ultrasonique. Ce dernier a deux connecteurs ("input" et "output"). Le connecteur "input" est le déclencheur lié à une sortie du microcontrôleur ; le module ultrasonique reçoit un signal de début du microcontrôleur sur cette ligne. Le connecteur "output" sera branché sur un port d'interruption sur le microcontrôleur. Le signal transmis par ce connecteur, porte l'information de la distance mesurée par le détecteur à ultrasons.

La configuration de la commande du module ultrasonique, sera présentée par les trois options suivantes.

➤ **START COMMAND**

Cette option nous permet d'activer le capteur. Ce dernier émet des ondes sonores d'une durée de 250 microsecondes, et enregistre les ondes réfléchies par un obstacle.

➤ **STOP COMMAND**

Cette option désactive le capteur ultrasonique.

➤ **GET COMMAND**

Cette option nous permet d'enregistrer le signal de sortie du capteur dans une variable. Cette commande permet de déduire directement l'inter-distance sous format décimal.

- Capteur Pare-choc



Figure. E.7 : Capteur pare-choc [Vex]

C'est un capteur de choc ou de contact, qui délivre deux niveaux de tension, soit un '1' (correspond à une tension de 5V) quand il n'y a pas de choc et un '0' (correspond à une

tension 0V) quand il y a un choc. Des signaux sont envoyés au microcontrôleur pour arrêter les moteurs quand un choc se produit.

- Capteur suiveur de ligne (*TRAKING LINE*)



Figure E.8 : Capteur infrarouge suiveur de ligne [Vex]

Ce capteur se compose d'une sonde de lumière infrarouge et LED infrarouge. Le capteur envoie une onde infrarouge sur une surface (la trajectoire de référence à suivre par le véhicule); la sonde récupère le rayonnement infrarouge reflété par la surface et selon son intensité, on détermine la réflectivité de la surface en question. Les surfaces pâles réfléchissent plus de lumière que les surfaces foncées. Ceci permet à la sonde de détecter une surface foncée d'une surface pâle, ou l'inverse.

- Fonctionnement du capteur suiveur de ligne

C'est un capteur analogique qui produit une gamme de valeurs de tension de 0V à 5V. La tension est envoyée au microcontrôleur. Ce dernier se compose d'un convertisseur analogique numérique qui code sur 10 Bit et qui convertit la valeur de tension (0V à 5V) fournie par le capteur à une valeur numérique (0 à 1024). La sortie du capteur sera faible

(environ 0) lorsque la lumière infrarouge rebondit au détecteur ; en d'autre terme lorsque la surface est pâle ou très réfléchissante. La sortie du capteur sera élevée (environ 1024) lorsque la lumière est absorbée et n'a pas rebondi.

- Configuration du capteur suiveur de ligne (*TRAKING LINE*)

Module *TRAKING LINE*

Ce module nous permet d'enregistrer le comportement du véhicule afin de détecter une déviation de trajectoire.

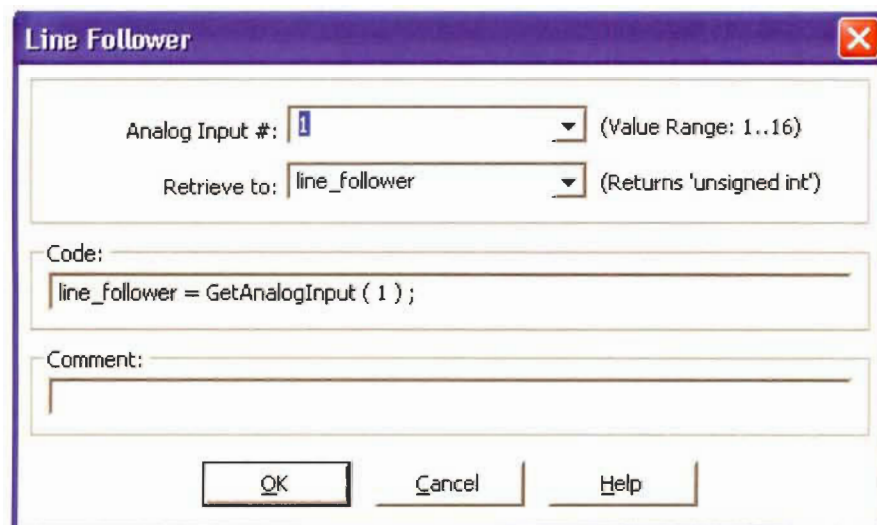


Figure E.9 : Bloc du module *TRAKING LINE* [Vex]

Ce bloc nous permet de configurer le capteur *TRAKING LINE*. Ce dernier a une seule broche de connecteur qui va se connecter au microcontrôleur. Le signal transmis par

ce connecteur porte l'information sur la nature de la surface du sol. Le microcontrôleur prend la valeur de tension fournie par le capteur et la convertit en une valeur numérique.

- Capteur optique de vitesse (Encodeur)



Figure E.10 : Capteur optique de vitesse [Vex]

Ce capteur optique permet de mesurer la vitesse angulaire de rotation. Il utilise un disque troué sur sa circonférence. Le disque est placé entre une LED et d'un détecteur de lumière ; quand le disque tourne, la lumière infrarouge de la diode est bloquée sur une base régulière. Quand le disque est attaché à une roue, il est possible de déterminer la distance que les roues ont parcourue ainsi que la vitesse linéaire, en se basant sur la circonférence de la roue et le temps ``t``.

- Fonctionnement de l'encodeur

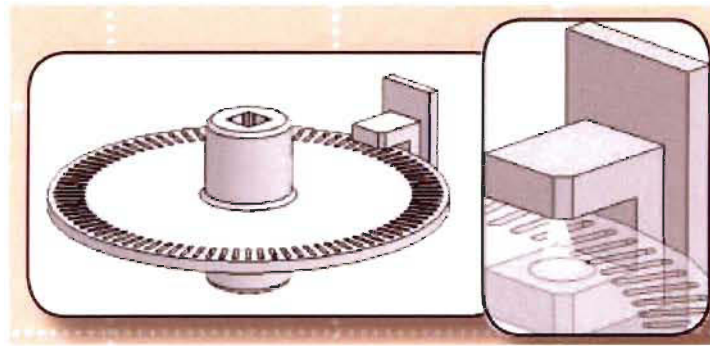


Figure E.11 : Schéma bloc de fonctionnement de l'encodeur [Vex]

C'est un capteur numérique qui se compose d'un circuit électrique ; il se présente sous la forme d'un émetteur et d'un récepteur infrarouge. Le récepteur est un phototransistor, disposé de sorte que le faisceau émis par la diode provoque un changement d'état de sortie du transistor (0V si le faisceau est absorbé par le transistor et 5V si le faisceau est réfléchi sur le disque).

L'encodeur peut détecter 1700 impulsions par seconde, ce qui correspond à 18.9 tours par seconde (90 impulsions correspondent à un tour de disque).

- Configuration de l'encodeur

Module **OPTICAL SHAFT ENCODER**

Ce module nous permet de définir la vitesse de rotation du moteur. Lorsque l'encodeur détecte le disque, il génère un signal numérique de ``1'' et si il détecte une fente, il génère

un signal ``0''. Comme le disque tourne, le capteur génère une série de signaux (c'est-à-dire 01010101).

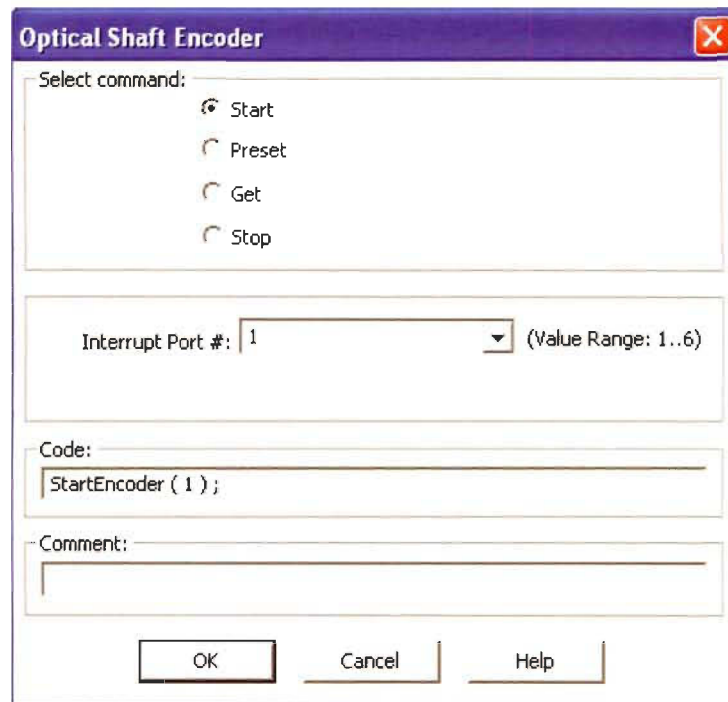


Figure E.12 : Bloc du module de l'encodeur [Vex]

Ce bloc nous permet de choisir l'une des quatre options qu'on va définir par la suite :

➤ **START COMMAND**

Cette commande permet d'activer le capteur, ainsi ce dernier commence à compter les impulsions.

➤ **PRESET COMMAND**

Cette commande permet d'initialiser le capteur.

➤ *GET COMMAND*

Cette commande permet de stocker le comptage des impulsions du capteur dans une variable.

➤ *STOP COMMAND*

Cette commande permet de désactiver le capteur.

- Microcontrôleur de Vex



Figure E.13 : Boîtier qui représente le microcontrôleur et ses entrées/sorties [Vex]

Le microcontrôleur représente le cerveau du véhicule. Il contient des outils et des fonctions pour contrôler les moteurs, et pour gérer tous les processus et les signaux reçus

des capteurs. La description des entrées/sorties de ce microcontrôleur est présentée dans le tableau E.3.

Tableau E.3
Description des entrées/sorties du microcontrôleur

Entrées/sorties du microcontrôleur	Description
Pin d'entrée de la batterie	La valeur nominale est 7.2V. 6V à 9V correspondent aux tensions Min/Max
Entrées d'interruption	Il y a 6 entrées d'interruption
Entrées/sorties numériques (<i>Digital I/O</i>)	On peut configurer 16 entrées/sorties numériques
Impédance d'entrée	Pour la conversion analogique/numérique, il est nécessaire d'utiliser une résistance "pull-up" de 470 k Ω à 5V afin d'éviter la tension flottante. Au niveau des entrées d'interruption, le microcontrôleur contient une résistance interne "pull up" de 12 k Ω - 100 k Ω
Entrées analogiques	On peut configurer 16 entrées analogiques afin d'exécuter une conversion analogique/numérique avec une résolution de 10-bit
Signal de sortie PWM	On peut configurer 8 signaux de sortie PWM pour contrôler 8 moteurs. [0-0,6 V] correspond à un niveau bas. [4-5V] correspond à un niveau haut. Il peut commander une charge avec un courant de 1mA et une tension de 1V
Ports série	TTL (115kb)- port série et le port TX/RX

Il existe deux façons pour programmer le microcontrôleur, soit de le faire par MPLAB qui est un logiciel avancé et souvent utilisé pour des programmes plus complexes, soit le logiciel easyC qui offre une interface graphique pour une programmation facile et rapide.

On présente les caractéristiques de ce microcontrôleur dans le tableau suivant :

Tableau E.4
Caractéristiques du module microcontrôleur

<i>Microcontrôleur</i>	<i>Picmicro® PIC18F8520 de Microchip</i>
<i>Vitesse du processeur</i>	<i>10MIPS (million d'instructions par seconde)</i>
<i>Espace pour les variables</i>	<i>1800 octets + 1024 octets EE2</i>
<i>Espace programme</i>	<i>32k octets</i>
<i>Programmation</i>	<i>PIC C</i>
<i>Outils de programmation</i>	<i>MPLAB IDE de Microchip ou easyC</i>

Annexe F

Algorithme de programmation (en langage C) du système de contrôle pour un véhicule électrique dans le cadre d'un système de convoi

Cette annexe présente les étapes de programmation en langage C pour contrôler l'inter-distance de chaque paire de véhicules consécutifs

```
#include "Main.h"

void main ( void )
{
    float Distance = 0 ;

    float d = 0 ;                // Inter-distance mesurée par le capteur ultrasonique (en cm)
    float F1 = 0.0177 ;         // Facteur de conversion de l'inter-distance (voir l'équation 5.12)
    float Kc = 7.07 ;           // Gain proportionnel du contrôleur PI
    float Ki = 7.14 ;           // Gain intégral du contrôleur PI
    float Te = 0.1 ;            // Temps d'échantillonnage
    float d0 = 0.5 ;            // Inter-distance de sécurité (en m)
    float R = 0.052 ;           // Rayon de la roue (en m)
    float pi = 3.14;

    float d_precedente = 0.5 ;  // Inter-distance initiale
    float Vr_mot = 0 ;          // Vitesse de rotation appliquée au moteur du véhicule esclave
                                // (en tours/seconde)
    float Vr_dec = 0 ;          // Vitesse de rotation appliquée au moteur du véhicule esclave
                                // (en décimal)
```



```

float V_regulation = 0 ;    // Erreur de vitesse relative du véhicule esclave

float Err = 0 ;            // Erreur de l'inter-distance de sécurité

float Err_1 = 0 ;          // Erreur de l'inter-distance de sécurité précédent

float I_err = 0 ;          // Intégrale de l'erreur de l'inter-distance de sécurité

float contr_P = 0 ;        // Contrôleur P (Proportionnel) de la vitesse du véhicule esclave

float contr_PI = 0 ;       // Contrôleur PI (Proportionnel-Intégral)

int Vitesse_moteur1 = 0 ; // Valeur décimal appliquée au moteur de la roue droite du
                           // véhicule esclave

int Vitesse_moteur2 = 0 ; // Valeur décimal appliquée au moteur de la roue gauche du
                           // véhicule esclave

float P = 0.46 ;           // Gain proportionnel du contrôleur P (Proportionnel) de la
                           // vitesse du véhicule esclave

float Vr = 0 ;             // vitesse relative du véhicule esclave par rapport au véhicule
                           // maître

while (1 == 1)             // Le temps d'exécution de cette boucle est estimé à 100
                           // millisecondes

{

    Distance = GetUltrasonic (4, 12) ;

    d = F1 * Distance ;     // Unité de calcul (m). Or F1 est un facteur de conversion

    Err= d0 - d ;           // Erreur de l'inter-distance (m)

    I_err= I_err +Te * Ki * (Err +Err_1 )/2; // Calculer l'intégrale de l' erreur de l'inter-
                           // distance

    if ( I_err >= 0.9 )     // Saturation la vitesse maximale du véhicule (0.9 m/s)

        {

            I_err =0.9 ;

```

```

    }

else if ( I_err <= - 0.9 )

    {

        I_err = -0.9 ;

    }

else if ( I_err <= 0.9 && I_err >= -0.9 )

    {

        I_err = I_err ;

    }

contr_PI = Kc * Err + I_err ;           // Calculer la sortie du contrôleur PI

Vr = ( d - d_precedente ) / Te ;       // Calculer la vitesse relative du véhicule
                                         // esclave par rapport au véhicule maître

V_regulation = Vr - contr_PI ;         // Calculer l'erreur entre la vitesse relative
                                         // mesurée du véhicule esclave et la
                                         // vitesse demandé par le contrôleur PI

contr_P = P * V_regulation ;           // Calculer la vitesse demandée par le
                                         // contrôleur P

Vr_mot = contr_P / ( 2 * pi * R * 1.66 ) ; // Calculer le nombre de tours du moteur
                                         // par seconde

Vr_dec = Vr_mot * 127 / 1.66 ;         // 1.66 tours/seconde représente la vitesse
                                         // maximale de rotation du moteur qui
                                         // correspond à 127 comme valeur
                                         // décimal

if ( Vr_dec > 127 )                   // La valeur 127 représente la vitesse
                                         // maximale du moteur en décimal

    {

```

```

        Vr_dec=127 ;

    }

else if ( Vr_dec <= 127 && Vr_dec >= 0 )

    {

        Vr_dec=Vr_dec ;

    }

else if ( Vr_dec < -127 )

    {

        Vr_dec=-127 ;

    }

else if ( Vr_dec >= -127 && Vr_dec <= 0 )

    {

        Vr_dec=Vr_dec ;

    }

Vitesse_moteur1 = 127 + Vr_dec;

Vitesse_moteur2 = 127 - Vr_dec;

SetMotor ( 1 , Vitesse_moteur1 ) ; // Le mouvement de rotation est dans le sens des
                                     aiguilles d'une montre

SetMotor ( 2 , Vitesse_moteur2 ) ; // Le mouvement de rotation est dans le sens
                                     inverse des aiguilles d'une montre

Err_1 = Err ;

d_precedente=d ;

}

```

