



HAL
open science

Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification

Madeleine El Zaher El Zaher

► To cite this version:

Madeleine El Zaher El Zaher. Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard; Université Libanaise (Liban), 2013. Français. NNT : 2013BELF0216 . tel-01010896

HAL Id: tel-01010896

<https://theses.hal.science/tel-01010896v1>

Submitted on 20 Jun 2014

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

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

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes: Modélisation et vérification



Madeleine EL ZAHER

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° X | X | X

THÈSE présentée par

Madeleine **EL ZAHER**

pour obtenir le

Grade de Docteur de
l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes: Modélisation et vérification

Soutenue le 22 Novembre 2013 devant le Jury :

Olivier SIMONIN	Rapporteur	Professeur des Universités, INSA-Lyon
George TURKIYYAH	Rapporteur	Professeur des Universités, AUB
Jean-Pierre DERUTIN	Examineur	Professeur des Universités, Blaise Pascal
Bassam DAYA	Examineur	Professeur des Universités, UL
Sebastien RODRIGUEZ	Examineur	Professeur des Universités, UTN-Argentine
Pablo GRUER	Directeur de thèse	Professeur des Universités, UTBM
Mohammad HAJJAR	Directeur de thèse	Professeur des Universités, UL
Franck GECHTER	Co-directeur de thèse	Maître de conférence, UTBM

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Olivier Simonin et M. George Turkiyyah pour m'avoir fait l'honneur de rapporter sur mes travaux de thèse et d'avoir consacré leurs temps à l'examen de mon mémoire de thèse.

Merci également aux autres membres d'avoir accepté de juger ce travail, M. Sébastien Rodriguez et M. Jean-Pierre Derutin, d'avoir examiné cette thèse et M. Bassam Daya d'avoir présidé le jury de thèse.

Un grand merci à mes directeurs de thèse, M. Pablo Gruer, M. Franck Gechter et M. Mohammad Hajjar, pour leur encadrement exemplaire. Je les remercie pour leur confiance en moi et pour l'autonomie qu'on m'a donnée. Je serai toujours reconnaissante de m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse.

Je remercie Monsieur Abderrafiaa Koukam, responsable du projet SafePlatoon, de m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse au sein du laboratoire SeT et dans le cadre du projet.

Un grand merci pour Jean-Michel Contet. Merci pour toutes les aides que tu m'a apportées, surtout au début de ma thèse. Merci aussi pour ta générosité scientifique, ta disponibilité, ton amitié, et bien sûr pour les gâteaux de mercredi matin :).

Je souhaite aussi remercier Baudouin Dafflon, mon collègue de bureau. Merci de m'avoir supporté pendant les deux dernières années (avec le chauffage qui tourne à fond). Merci pour toutes les aides en VIVUS, pour toutes les discussions au bureau et pour toutes les pauses café.

Je remercie Frederick Zann pour ses aides avec les véhicules et le GPS, ainsi que pour toutes les commandes de café.

Je remercie également Cindy Cappelle pour son attention et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier Julien Moreau et Julian Murgia qui ont toujours accepté de participer aux expérimentations et aux démonstrations avec les véhicules. Je les remercie pour leurs aides au travail mais aussi pour leurs amitiés.

Une pensée émue pour tous les doctorants et les collègues avec qui j'ai partagé mon quotidien pendant ces années d'étude. je pense notamment à Lijun avec sa sourire permanente, Dhouha avec sa gentillesse, Mona pour son amitié, Ali pour son encouragement au sport, ainsi que

Houssam, Saeid et You.

Merci à toute ma famille qui m'a toujours supporté et encouragé avec une confiance inconditionnelle.

Finalement, je remercie mon très cher mari Khalil. Merci pour ton encouragement, ton amour et la patience que tu m'as témoignée durant cette période.

Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Contexte général	15
1.2	Objectif de nos travaux	17
1.2.1	La conduite en convoi de véhicules autonomes	18
1.2.2	Modèle réactif pour la conduite en convoi en configuration colonne	18
1.2.3	Généralisation aux convois multi-configuration	18
1.2.4	Spécification et vérification des systèmes de conduites en convoi	19
1.2.5	Validation du modèle : simulation et expérimentation	19
1.3	Plan de la thèse	19
1.3.1	Conclusion	21
I	Une approche pour la conduite en convoi	23
2	La conduite en convoi	25
2.1	Introduction	25
2.2	Définition d'un convoi de véhicule	25
2.3	Rôle des véhicules dans un convoi	26
2.4	Les configurations	27
2.4.1	Caractérisation des configurations	27
2.4.2	Les configurations usuelles	29
2.5	Perception, prise de décision et contrôle	30
2.5.1	La perception	31
2.5.2	Prise de décision et contrôle	32
2.6	Conclusion	33
3	Décision et contrôle pour la conduite en convoi : état de l'art	35
3.1	Introduction	35
3.2	Prise de décision décentralisée	36
3.2.1	Asservissement sur le leader local	36
3.2.2	Asservissement sur un leader global et une trajectoire de référence	40
3.3	Prise de décision centralisée	42
3.4	Convois de véhicules avec multi-configurations	44

3.4.1	Approche comportementale	44
3.4.2	Approche basée sur une structure virtuelle	45
3.4.3	Approche basée sur le principe leader/follower	47
3.5	Conclusion	49
4	Approche locale pour la conduite en convoi en configuration colonne	51
4.1	Introduction	51
4.2	Présentation de l'approche	51
4.2.1	Choix du modèle d'interaction	52
4.2.2	Mécanisme de perception	53
4.2.3	Paramètres du modèle	54
4.3	Calcul des paramètres	54
4.3.1	Calcul de la raideur globale	55
4.3.2	Calcul du coefficient d'amortissement	55
4.3.3	Calcul des deux raideurs k_1 et k_2	56
4.4	Calcul des consignes de vitesse et d'orientation	57
4.4.1	Cas du régime stationnaire	58
4.4.2	Cas du régime transitoire	58
4.5	Etude de stabilité	59
4.5.1	Stabilité de Lyapunov	59
4.5.2	String stability	62
4.6	Conclusion	63
5	Généralisation aux configurations échelon et ligne	65
5.1	Introduction	65
5.2	Décomposition en configurations élémentaires	65
5.3	Approche par changement des points d'attache	66
5.3.1	Application sur la configuration échelon	67
5.3.2	Application pour la configuration ligne	69
5.4	L'approche par véhicule virtuel	70
5.5	Conclusion	71
II	Vérification de la sûreté des convois de véhicules	73
6	La vérification	77
6.1	Introduction	77
6.2	Les systèmes formels : un cadre pour la vérification	78
6.3	La vérification	81
6.3.1	Cadre conceptuel	81
6.3.2	L'algorithmique de la vérification	81
6.3.3	Limites et difficultés	83
6.4	Les méthodes de vérification	84
6.4.1	Les approches basées sur l'abstraction	85

6.4.2	Les approches compositionnelles	87
6.5	Outils de vérification	88
6.5.1	Contexte	88
6.5.2	La méthode B	88
6.5.3	Outils basés sur le model-checking	92
6.5.4	La boîte à outils SAL	93
6.6	Conclusion	94
7	Vérification de l'approche locale : méthode compositionnelle	95
7.1	Introduction	95
7.2	Propriétés de sûreté	95
7.2.1	Propriété de non-collision entre deux véhicules du convoi	96
7.2.2	Propriété de confort d'évolution du convoi	97
7.3	Approche méthodologique de vérification	97
7.3.1	Présentation générale	97
7.3.2	Modèle d'un véhicule	98
7.3.3	La méthode de vérification	98
7.4	Implémentation en SAL du modèle du convoi de véhicule	100
7.4.1	Le contexte d'un véhicule	100
7.4.2	Les modules du contexte	101
7.4.3	Traduction des propriétés de sûreté en SAL	105
7.4.4	Application de la méthode compositionnelle sur le modèle de convoi de véhicule	106
7.5	Conclusion	107
III	Evaluation de l'approche : Vérifications, simulations et expérimentations	109
8	Démarche d'évaluation	113
8.1	Introduction	113
8.2	Vérification de propriétés de sûreté du convoi	113
8.3	Evaluation de la qualité du système	114
8.3.1	Les indicateurs	114
8.3.2	La simulation	115
8.3.3	L'expérimentation	116
8.4	Conclusion	119
9	Résultats de vérification	121
9.1	Les cas de vérification	121
9.2	Colonne-cas1	122
9.2.1	Description du cas	122
9.2.2	Résultats de vérification de la propriété de sûreté	122
9.2.3	Résultats de vérification de la propriété de confort	124

9.3	Colonne-cas2	124
9.3.1	Description du cas	124
9.3.2	Résultats de vérification pour la propriété de sûreté	124
9.3.3	Résultats de vérification de la propriété de confort	125
9.4	Colonne-cas3	126
9.4.1	Description du cas	126
9.4.2	Résultats de vérification de la propriété de sûreté	126
9.4.3	Résultats de vérification de la propriété de confort	127
9.5	Echelon-cas1	128
9.5.1	Description du cas	128
9.5.2	Résultats de vérification de la propriété de sûreté	128
9.5.3	Résultats de vérification de la propriété de confort	131
9.6	Ligne-cas1	131
9.6.1	Description du cas	131
9.6.2	Résultats de vérification de la propriété de sûreté	131
9.6.3	Résultats de vérification de la propriété de confort	133
9.7	Synthèse des résultats	134
10	Configuration colonne : simulations et expérimentations	135
10.1	Introduction	135
10.2	Les simulations	135
10.2.1	Protocole de simulation	135
10.2.2	Evaluation par simulation de l'écart longitudinal	136
10.2.3	Evaluation du suivi de trajet	139
10.3	Les expérimentations	141
10.3.1	Protocole d'expérimentation	141
10.3.2	Evaluation par expérimentation de l'écart longitudinal	142
10.3.3	Evaluation par expérimentation du suivi de trajet	143
10.4	Bilan des résultats	144
10.4.1	Bilan d'évaluation de l'écart longitudinal	144
10.4.2	Bilan d'évaluation de l'erreur de suivi de trajet	144
10.5	Evaluation de l'effet de la force inertielle	145
10.5.1	Effet sur l'écart longitudinal	145
10.5.2	Effet sur le suivi de trajet	148
10.5.3	Bilan des résultats obtenus pour l'évaluation du suivi de trajet	150
10.6	Conclusion	150
11	Simulations de la configuration échelon	151
11.1	Introduction	151
11.2	Scénario de simulation	151
11.3	Evaluation de l'écart longitudinal	152
11.3.1	Première possibilité	152
11.3.2	Deuxième possibilité	152
11.3.3	Troisième possibilité	153

11.3.4	Bilan d'évaluation de l'écart longitudinal	153
11.4	Evaluation du suivi du trajet	154
11.4.1	Première possibilité	154
11.4.2	Deuxième possibilité	155
11.4.3	Troisième possibilité	156
11.4.4	Bilan d'évaluation du suivi de trajet	156
11.5	Bilan des tests	156
11.6	Conclusion	157
IV	Conclusion	159
12	Conclusion et perspectives	161
12.1	Bilan des travaux réalisés	161
12.2	Perspectives et améliorations	162
12.2.1	Amélioration de l'approche de conduite en convoi	162
12.2.2	Amélioration de l'approche utilisée pour la multi-configuration	163
12.2.3	Amélioration de l'approche de vérification	163
V	Annexes	165
A	La boîte à outils SAL	167
A.1	Environnement SAL	167
A.2	Le Langage SAL	167
A.2.1	Les types	167
A.2.2	Les expressions	167
A.3	Un contexte en SAL	168
A.3.1	Les modules	168
A.4	Exemple	169
A.4.1	Un contrôleur de niveau d'eau	169
A.4.2	Implémentation en SAL	169
B	Capteurs et véhicules	173
B.1	Les capteurs	173
B.1.1	LMS 200	173
B.1.2	IBEO Lux	174
B.1.3	Le GPS RTK : ProFlex 500	175
B.2	Les véhicules	176
VI	Bibliographie	177

Table des figures

1.1	Organisation de la thèse	19
2.1	Convoi de véhicules autonomes en file indienne, réalisé dans le cadre de projet SARTRE sur une autoroute publique en mai 2012 à Barcelone.	25
2.2	Convoi de véhicules réalisé sur un Automated Highway System dans le cadre du projet PATH en août 1997 à San Diego.	26
2.3	Trois types de convois de véhicules avec des configurations différentes.	27
2.4	Les axes d'un véhicule.	28
2.5	Ecarts latéral et longitudinal entre deux véhicules d'un convoi.	28
2.6	Les trois configurations usuelles : Colonne (a), Ligne (b) et Echelon (c).	29
2.7	Les deux configurations "L" (a) et "Diamant"(b).	30
2.8	Architecture du système représentant un véhicule.	30
2.9	Localisation absolue(a) et localisation relative (b).	31
2.10	Prise de décision décentralisée (a) et centralisée (b).	32
3.1	Contrôle local	36
3.2	Contrôle local	36
3.3	Suivi idéal de suivi de trajet [Pal08].	38
3.4	Schéma du véhicule [Pal08]	38
3.5	Suivi autonome de deux véhicule [Pal08]	38
3.6	Modèle de contrôle basé sur un lien virtuel [CGGK11].	39
3.7	Architectures du véhicule leader(a) et du véhicule suiveur(b) [ATM12].	42
3.8	Zones pour le calcul de la magnitude du vecteur généré par le contrôleur du maintien de la formation.	46
3.9	Structure virtuelle.	46
3.10	La structure virtuelle.	47
3.11	Approche leader/follower.	47
3.12	Approche leader/follower appliquée sur les formations des drones.	48
4.1	Erreur d'anticipation produite dans les virages.	52
4.2	Modèle d'interaction.	53
4.3	Perception du véhicule suiveur.	53
4.4	Perception et calcul des trois distances.	53
4.5	Forces d'interaction.	54

4.6	Forces d'interaction avec un seul ressort.	55
4.7	Graphe de calcul.	56
4.8	Erreur longitudinale.	62
5.1	Les trois configurations usuelles : Colonne (a), Ligne (b) et Echelon (c).	66
5.2	Configuration diamant composée en trois convois échelons(a) ou en deux convois échelon et un convoi colonne(b).	66
5.3	Graphe de calcul.	68
5.4	Points d'attache dans une configuration ligne.	69
6.1	Un modèle basé sur les automates.	79
6.2	Les chaînes du système compteur-contrôleur	79
6.3	Model-checkers : entrées et sorties.	83
6.4	Vue locale du véhicule E [HLOR11].	86
6.5	Manoeuvre pour évitement de collision entre deux avions [PC09].	88
7.1	Définition des deux paramètres d_x et d_y	96
7.2	Schéma descriptif de la vérification.	97
7.3	Trois sous-comportements des véhicules du convoi.	98
7.4	Processus de vérification.	100
7.5	Les données échangées entre les trois comportements d'un véhicule suiveur	102
8.1	Mesure de l'erreur de suivi de trajectoire.	114
8.2	Environnement de simulation VIVUS.	115
8.3	Architecture du simulateur VIVUS.	115
8.4	Véhicule simulé en VIVUS.	116
8.5	Véhicules du laboratoire SeT : GEM (a) et Little-car (b).	117
8.6	Architecture du système embarqué utilisé sur les véhicules GEM	117
8.7	Fonctionnement d'un télémètre laser.	118
8.8	Capteurs installés sur les véhicules GEM du laboratoire SeT.	118
8.9	Balises réfléchissantes installées à l'arrière d'un véhicule suivi.	119
9.1	Un contre-exemple rencontré avec un convoi de 13 véhicules dans une configuration colonne.	123
9.2	Un contre-exemple rencontré avec un convoi de 5 véhicules dans une configuration colonne qui roule à 45 km/h.	125
9.3	Un contre-exemple rencontré avec un convoi de 4 véhicules qui roule à une vitesse de 25 km/h et avec un écart longitudinal de 1 m.	127
9.4	Un véhicule suiveur à l'extérieur du virage dans un convoi échelon.	129
9.5	Un véhicule suiveur à l'intérieur du virage dans un convoi échelon.	130
9.6	Contre-exemple produit dans le cas d'un convoi en configuration échelon. Lorsque le véhicule leader tourne sur un cercle de rayon de 20 m. Le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage.	130
9.7	Un véhicule suiveur à l'extérieur du virage dans un convoi ligne.	132
9.8	Un véhicule suiveur à l'intérieur du virage dans un convoi ligne.	132

9.9	Contre-exemple produit dans le cas d'un convoi ligne. Lorsque le véhicule leader tourne sur un cercle de rayon de 30 mètres. Le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage.	133
10.1	Circuit suivi durant les simulations.	136
10.2	Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules.	137
10.3	Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules.	137
10.4	Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules.	138
10.5	Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules.	138
10.6	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules.	139
10.7	Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules.	139
10.8	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de dix véhicules.	140
10.9	Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de dix véhicules.	140
10.10	Trajet suivi durant les expérimentations.	141
10.11	Evolution de l'écart longitudinal lors des expérimentations.	142
10.12	Traces suivies par les véhicules durant leurs mouvements.	143
10.13	Ecarts entre les trajets des véhicules.	143
10.14	Traces suivies par les véhicules durant leurs mouvements.	143
10.15	Ecarts entre les trajets des véhicules.	143
10.16	Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules, sans considération de l'effet inertielle.	146
10.17	Répartition de l'écart longitudinal pour un convoi de trois véhicules, sans considération de l'effet inertielle.	146
10.18	Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules, sans prise en compte de l'effet inertielle.	147
10.19	Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules, sans prise en compte de l'effet inertielle.	147
10.20	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.	148
10.21	Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.	148
10.22	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.	149
10.23	Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.	149
11.1	Trajet suivi pendant les simulations des configurations échelons.	151
11.2	Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la première possibilité d'attache des véhicules.	152
11.3	Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la deuxième possibilité d'attache des véhicules.	153

11.4	Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la troisième possibilité d'attache des véhicules.	153
11.5	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la première possibilité d'attache.	155
11.6	Ecart mesuré entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la première possibilité d'attache.	155
11.7	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la deuxième possibilité d'attache.	155
11.8	Ecart mesuré entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la deuxième possibilité d'attache.	155
11.9	Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la troisième possibilité d'attache.	156
11.10	Ecart mesuré entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la troisième possibilité d'attache.	156
B.1	Le capteur LMS 200.	173
B.2	Le capteur IBEO lux.	174
B.3	Le GPS RTK ProFlex 500.	175

Liste des tableaux

2.1	Ecarts latéral et longitudinal des configurations usuelles.	30
3.1	Répartitions des gains entre les sous-comportements [BA97].	45
4.1	Paramètres du modèle d'interaction.	57
5.1	Trois possibilités d'accrochage du modèle d'interaction pour une configuration échelon.	67
5.2	Utilisation du principe de véhicule virtuel avec les configurations échelon, ligne et colonne.	71
6.1	Obligations de preuve de la machine <i>Portes</i>	90
6.2	Différents outils de model-checking.	92
9.1	Cas de vérification	121
9.2	Paramètres des véhicules utilisés durant les expérimentations.	122
9.3	Bilan des résultats de vérification pour le scénario Colonne-cas1.	123
9.4	Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas1	124
9.5	Bilan des résultats de vérification de la propriété de sûreté pour le scénario Colonne-cas2.	125
9.6	Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas2.	126
9.7	Bilan des résultats de vérification de la propriété de sûreté pour le scénario Colonne-cas3.	127
9.8	Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas3.	128
9.9	Bilan des résultats de vérification pour le scénario Echelon-cas1 pour des mouvements linéaires.	129
9.10	Bilan des résultats de vérification pour le scénario Echelon-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage.	129
9.11	Résultats de vérification de Echelon-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'intérieur du virage.	130

9.12	Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour l'écart longitudinal pour le scénario Echelon-cas1.	131
9.13	Bilan des résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1, dans le cas où le véhicule leader suit un trajet linéaire.	132
9.14	Bilan des résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1, dans le cas où le véhicule leader suit un trajet linéaire.	132
9.15	Résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'intérieur du virage.	133
9.16	Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour l'écart longitudinal pour le scénario Ligne-cas1.	133
9.17	Tableau récapitulatif des résultats de vérification de la propriété de sûreté et de la propriété de confort.	134
10.1	Paramètres utilisés lors de la simulation des convois.	136
10.2	Propagation de l'erreur longitudinale.	139
10.3	variation de l'erreur latérale en fonction du rayon de courbure.	140
10.4	Propagation de l'erreur de suivi de trajet.	141
10.5	Paramètres utilisés lors des expérimentations.	142
10.6	Récapitulatif de l'erreur longitudinal.	144
10.7	Récapitulatif de l'erreur de suivi de trajet.	145
11.1	Récapitulatifs des tests avec les possibilités d'attaches.	157
B.1	Caractéristiques techniques du capteur LMS 200.	174
B.2	Caractéristiques techniques du capteur IBEO lux.	175
B.3	Caractéristiques du véhicule GEM	176
B.4	Caractéristiques du véhicule Little-Car	176

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte général

L'automobile, qui était hier essentiellement un système mécanique conduit par un être humain, embarque aujourd'hui des dispositifs et des composants électroniques et informatiques de plus en plus nombreux. Ces composants donnent peu à peu aux véhicules les capacités de percevoir, de communiquer et de réagir, bref, de devenir autonomes. Ainsi, les véhicules d'aujourd'hui peuvent être qualifiés d'intelligents.

Cette intelligence embarquée permet d'envisager la mise en place de nouvelles fonctionnalités et services, au niveau d'un véhicule isolé, mais aussi à l'échelle de systèmes de transport innovants, composés de véhicules intelligents, avec un impact social, économique et environnemental. Au niveau du véhicule, nous pouvons mentionner les systèmes d'assistance à la conduite et d'évitement de collisions. Pour les systèmes de transport et la gestion de trafic, nous pouvons mentionner la conduite en convoi et la gestion en temps réel des flux de véhicules, par adaptation d'itinéraires.

Ainsi, le concept des véhicules intelligents a conduit à la création de nouvelles thématiques de recherche, comme la conduite automatisée, la navigation autonome, etc,... La conduite en convoi (vehicle platoon en anglais), est l'un des domaines, qui a fait l'objet de nombreux projets de recherche, durant ces vingt dernières années. Nous pouvons mentionner PATH¹ en 1993, CRISTAL² en 2007, SARTRE³ en 2009, SafePlatoon⁴ en 2011, et d'autres.

Certains de ces projets ont abordé la problématique des convois de véhicules autonomes, dans l'objectif d'augmenter la sécurité routière et l'efficacité du transport dans les milieux urbains et autoroutiers. Le projet PACMAN⁵ vise à réduire les besoins en ressources humaines

1. <http://www.path.berkeley.edu/>

2. Cellule de Recherche Industrielle en Systèmes de Transport Automatisés Légers

3. <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx>

4. <http://web.utbm.fr/safeplatoon/>

5. <http://ewoutvb.com/4007/>

pour les convois en améliorant ainsi la sécurité et la sûreté du personnel militaire en terrains dangereux ou incertains.

L'objectif du projet ANR SafePlatoon, dans lequel les travaux de cette thèse sont menés, est d'étudier la problématique des convois de véhicules autonomes en considérant des applications dans les milieux urbains, militaires et agricoles. Son caractère novateur réside dans la conception et la mise au point de capacités de déplacement en convoi étendu et robuste. Le projet prend en compte plusieurs configurations géométriques de convois (linéaire, triangulaire, ligne de front,...). Il intègre aussi la possibilité d'adapter de manière dynamique la configuration du convoi. Chacune de ces configurations peut s'avérer particulièrement adaptée suivant le domaine d'application. Dans le domaine urbain par exemple, les trains de véhicules sans accroche peuvent servir de plateforme matérielle pour de nouveaux types de systèmes de transport de passagers, avec de bonnes propriétés : la possibilité d'adapter le nombre des véhicules à l'évolution de la demande au cours de la journée, la possibilité de l'usage multimodale de chaque véhicule : collectif, itinéraire à la demande, individuel, un fonctionnement autonome sur des trajets courts fixes et pour les déplacements vers les lieux de dépôt (perspective plus futuriste).

Les domaines envisagés d'application de la conduite en convoi, dans le cadre du projet SafePlatoon (transport urbain, activités agricoles, convois militaires) impliquent la présence d'opérateurs ou simples passagers. De ce point de vue, le système proposé appartient au domaine des applications embarquées dans des véhicules avec passagers. Pour ce type d'applications, il devient impératif que le cycle de conception comporte une phase dite de certification. Il s'agit d'établir, avec la force d'une preuve (c'est à dire avec le maximum de certitude), que l'application satisfera, lorsqu'elle sera en opération, un ensemble de propriétés de sûreté. Il a ainsi été décidé d'inclure dans les objectifs du projet SafePlatoon, le travail de certification de la sûreté, tâche qui a été prise en charge, en tant qu'objectif complémentaire, dans le cadre de cette thèse.

Le cadre institutionnel dans lequel s'est déroulée cette thèse est le Laboratoire IRTES-SET de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. L'équipe ICAP du Laboratoire IRTES-SET, qui a accueilli ces travaux, aborde, entre autres, des thématiques de recherche liées aux approches collaboratives pour la résolution de problèmes et aux systèmes composés d'entités autonomes situées, en interaction et possédant un objectif commun à satisfaire. Parmi les approches considérées, on privilégie celles où les entités sont essentiellement réactives : elles ont des capacités de perception mais pas de communication explicite, l'environnement commun étant le seul médium pour d'éventuels partages d'information. Ce type d'approche est souvent qualifiée de **locale**, car chaque entité décide de son comportement en fonction de ses propres perceptions, sans connaissance explicite de la situation globale. Ces approches sont également considérées comme étant **décentralisées** car le comportement de chaque entité ne dépend d'aucune relation (hiérarchique, de communication, ...) avec d'autres entités. Dans ce type d'approche dites auto-organisationnelle, le but commun est le résultat émergent de la combinaison ou composition des comportements individuels.

Dans le cadre de la problématique des systèmes multi-agents, qui constituent l'un des principaux paradigmes pour les systèmes coopératifs décentralisés, l'équipe ICAP a également exploré la question de la spécification formelle de ce type de système. Cette activité de recherche se place dans le cadre des travaux en vue de proposer des méthodes de conception d'applications basées sur des systèmes multi-agents. Le rôle des méthodes et langages formels dans ce cadre est celui de disposer de modèles de spécification non-ambigus. D'autre part, sur la base d'un modèle formel de spécification d'un système il est possible de procéder à la vérification de propriétés. Etant donné un modèle formel M_S d'un système S et une propriété P exprimée à l'aide d'une formule de la logique, la vérification permet d'établir avec la force d'une preuve, que M_S satisfait P . La vérification apparaît donc comme une méthode possible pour la certification de propriétés de sûreté. Cependant, la mise en pratique d'une étape de vérification de systèmes possédant une certaine complexité peut avoir un coût calculatoire prohibitif. Ce constat a motivé, au sein de l'équipe ICAP, des travaux dont l'objectif est de proposer des méthodes de vérification adaptés aux systèmes multi-agents et autres systèmes collaboratifs décentralisés.

1.2 Objectif de nos travaux

C'est dans le contexte général que nous venons de présenter que l'objectif principal de cette thèse a été formulé :

Proposer une approche décentralisée pour la conduite en convoi de véhicules autonomes, dans laquelle chaque véhicule détermine son comportement de façon locale, à partir de ses propres capacités de perception, sans avoir recours à une communication explicite, de telle sorte que l'organisation du convoi, son maintien et son évolution soient le résultat émergent du comportement de chaque véhicule. L'approche proposée doit pouvoir s'appliquer à des convois suivant plusieurs types de configuration, et permettre des changements dynamiques de configuration.

En particulier, l'articulation des travaux sur la conduite en convoi au sein de notre équipe avec le projet SafePlatoon a conduit à formuler un objectif complémentaire pour nos travaux de thèse :

Proposer une approche de certification de propriétés de sûreté des convois de véhicules, en adoptant la vérification comme technique de preuve. En particulier, on considérera de façon prioritaire les techniques basées sur le model-checking (mais un état de l'art sur la vérification en général sera apprécié). L'approche proposée dans le cadre de la conduite en convoi comportera nécessairement l'aspect méthode de vérification, compte-tenu de la complexité des systèmes envisagés, porteuse en puissance d'un coût calculatoire prohibitif.

Avant de présenter l'organisation de ce mémoire nous voudrions revenir sur quelques aspects de notre travail pour en présenter, de façon informelle, quelques détails importants.

1.2.1 La conduite en convoi de véhicules autonomes

Il s'agit de la navigation d'un ensemble de véhicule au long d'une trajectoire, en maintenant et, au besoin, adaptant une configuration prédéfinie, sans aucune accroche matérielle. La configuration d'un convoi est son organisation spatiale, donnée par les positions relatives nominales des véhicules. La configuration la plus étudiée est la colonne, connue aussi sous le nom de train. Cette configuration est adaptée pour le transport dans les milieux urbains. D'autres types de configurations peuvent être considérées : ligne, échelon, diamant, etc... . Nous étudions particulièrement dans cette thèse la configuration ligne où les véhicules sont placés l'un à côté de l'autre. La configuration échelon où les véhicules sont placés en biais. La configuration peut être définie en termes d'écart longitudinal et d'écart latéral nominaux de chaque véhicule, par rapport à un autre véhicule, sa référence dans le convoi. La configuration d'un convoi peut évoluer en cours d'opération, soit par incorporation/éjection d'un véhicule, soit pour s'adapter à des contraintes imposées par le terrain.

1.2.2 Modèle réactif pour la conduite en convoi en configuration colonne

Nous proposons une approche réactive et auto-organisationnelle pour la conduite en convoi de véhicules autonomes. Dans ce modèle chaque véhicule est considéré comme une entité réactive, dotée de capacités de perception et de prise de décision, sans communication avec d'autres véhicules ou avec l'environnement. Dans cette approche, le suivi de trajectoire et le positionnement par rapport à un référentiel géographique sont des fonctions intégrées dans un unique véhicule du convoi, considéré comme véhicule leader. La prise de décision porte sur les consignes de vitesse et de direction d'un véhicule, en fonction de la configuration du convoi, en tenant compte de l'environnement (géométrie du terrain, présence d'obstacles, ...). L'approche réactive proposée repose sur un modèle d'interaction virtuel, inspiré de la physique : un véhicule V_i perçoit ce qui l'entoure, dont un véhicule V_k du convoi qui joue à son égard le rôle de référence locale. Alors V_i agit comme s'il était en interaction avec V_k , par l'intermédiaire d'un mécanisme virtuel, de nature physique. Dans le cas d'un convoi en configuration colonne, ce modèle d'interaction doit être conçu de telle sorte que le suivi de trajectoire soit aussi proche que possible d'un suivi mono trace : les roues de tous les véhicules passent exactement par les mêmes points de trajectoire.

1.2.3 Généralisation aux convois multi-configuration

Nous avons considéré la possibilité d'adapter le modèle d'interaction, proposé pour les configurations colonnes, à d'autres configurations. Nous étudions, en particulier, les configurations en échelon et en ligne. Deux approches sont proposées. Une première repose sur l'idée de l'utilisation du même modèle d'interaction virtuel, un système masse-ressort-amortisseur, en modifiant de façon dynamique l'emplacement des points d'attache. La deuxième évalue la possibilité de projeter la configurations vers une configuration virtuelle en colonne, en positionnant un véhicule virtuel de référence, en fonction de la position du véhicule de référence réel.

1.2.4 Spécification et vérification des systèmes de conduites en convoi

Les propriétés de sûreté qui doivent faire l'objet de vérification sont notamment la non collision entre les véhicules du convoi et la caractère borné des accélérations, à des niveaux confortables pour les passagers. La méthode de vérification proposée est la vérification par composition ou compositionnelle. Elle consiste à décomposer le système en sous systèmes, à vérifier des propriétés auxiliaires des sous systèmes et à déduire la propriété de sûreté à partir des propriétés auxiliaires. Le programme de vérification (un model-checker dans notre cas) traite ainsi des sous systèmes de moindre complexité que le système complet, ce qui évite le phénomène d'explosion combinatoire.

1.2.5 Validation du modèle : simulation et expérimentation

Compte tenu du domaine applicatif cible de ce travail, une étape de simulation et d'expérimentation est primordiale pour vérifier la validité du modèle proposé. En ce qui concerne la simulation, nous avons implanté les modèles de véhicules et convois dans un simulateur, développé au sein de notre laboratoire, qui prend en compte certaines caractéristiques matérielles et physiques des véhicules et de l'environnement. Pour compléter l'étude, nous avons procédé à une étape d'expérimentation, en utilisant des véhicules expérimentaux équipés au laboratoire (sur la base de d'automobiles GEM et Littel Car).

1.3 Plan de la thèse

Après la description de nos propositions et objectifs, cette section présente le plan de thèse qui est constitué de neuf chapitres. La figure 1.1 montre les parties qui caractérisent notre contribution.

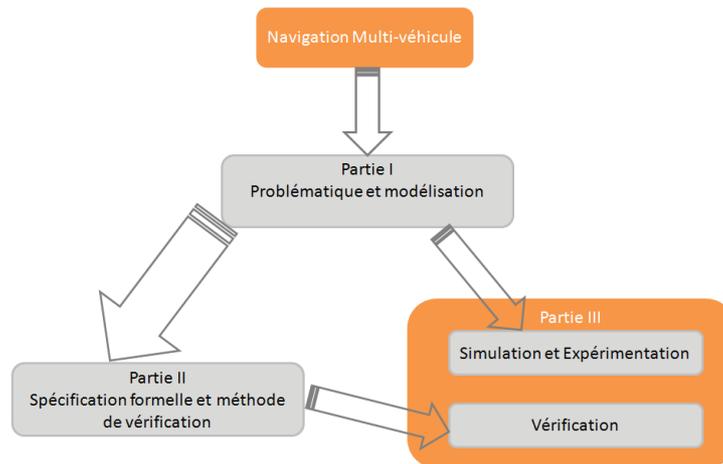


FIGURE 1.1 – Organisation de la thèse

Partie I

Dresse un état de l'art sur les approches de conduite en convoi autonome. Elle présente aussi notre proposition pour la prise de décision pour ces systèmes. Trois formations sont particulièrement étudiées : colonne, échelon et ligne.

Cette partie est composée de quatre chapitres. Le chapitre **La conduite en convoi**, donne les définitions des termes utilisés dans le domaine de la navigation multi-véhicule autonome. Le chapitre **Décision et contrôle pour la conduite en convoi : état de l'art** présente, un état de l'art sur les différentes approches proposées pour la conduite autonome en convoi de véhicule, en mettant l'accent sur les approches décentralisées. Ainsi, nous présentons un état de l'art inspiré du domaine de la robotique mobile, pour étudier le problème de la conduite autonome en différentes configurations. Ce chapitre nous permettra de bien situer les motivations et les enjeux du convoi de véhicule autonome, tout au long de cette thèse. Le chapitre **Approche locale pour la conduite en convoi en configuration colonne**, présente le cœur de notre approche décentralisée pour la conduite en convoi, en configuration colonne. Il s'agit d'une approche s'appuyant sur un modèle physique d'interaction, reliant chaque véhicule avec son prédécesseur dans le convoi. Le Chapitre présente aussi une étude de stabilité du système utilisant le théorème de Lyaounov et le principe de "string stability". Le chapitre **Généralisation aux configurations échelon et ligne**, étudie la possibilité d'adapter le modèle d'interaction, proposé pour la configuration colonne, sur d'autres types de configurations. Nous étudions, particulièrement, les deux configurations échelon et ligne.

Partie II

Présente notre approche de spécification formelle du modèle de conduite en convoi ainsi que la méthode utilisée pour la vérification du modèle.

Cette partie est composée de deux chapitres. Le chapitre **La vérification** présente les différentes définitions utilisées dans le domaine de la vérification, ainsi que les différentes méthodes de vérifications. Il présente aussi un état de l'art sur les outils de vérifications. Ce Chapitre permettra de situer notre approche de vérification du système de conduite en convoi, en effectuant les choix de la méthode et de l'outil de vérification. Le chapitre **Vérification de l'approche locale : méthode compositionnelle** présente notre contribution pour la vérification du système de convoi de véhicule proposé. Le chapitre commence par une description des propriétés à vérifier, puis la définition du modèle formel, pour enfin arriver à l'application de la méthode de vérification choisie.

Partie III

Est consacrée à la simulation et à l'expérimentation du modèle proposé dans la partie I, ainsi, qu'à la vérification de ce modèle selon la méthode proposée dans la partie II.

Cette partie est composée de quatre chapitres. Le chapitre **Démarche d'évaluation**

présente les trois activités : vérification, simulation et expérimentation. Il présente les outils et plate-formes utilisés, ainsi que les indicateurs évalués par chacune des activités. Le chapitre **Résultats de vérification** présente les protocoles de vérification ainsi que les résultats de vérification des propriétés de sûreté pour les trois configurations : colonne, échelon et ligne. Le chapitre **Configuration colonne : simulations et expérimentations** présente d'abord, le protocole et les résultats de simulation, suivi du protocole et des résultats d'expérimentation. Le chapitre **Simulations de la configuration échelon** montre les simulations de la conduite en convoi, avec une configuration échelon. Le chapitre présente le protocole et les résultats de simulation.

1.3.1 Conclusion

La thèse s'achève par le chapitre **Conclusion et perspectives**, dressant un bilan général, et rappelant les problèmes que nous avons traités. Dans ce chapitre nous déduisons un ensemble de perspectives pouvant être développées par la suite, ouvrant ainsi de nouvelles voies et propositions dans le but d'améliorer ce travail.

Première partie

Une approche pour la conduite en
convoi

Chapitre 2

La conduite en convoi

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'introduire les concepts et la terminologie inhérents à la conduite en convoi. Dans la première section nous présentons la définition d'un convoi de véhicule et des différents rôles qu'on peut assigner aux véhicules qui le composent. Une troisième section sera dédiée à la présentation des différentes configurations. La dernière section dresse une classification des approches proposées pour la conduite en convoi.

2.2 Définition d'un convoi de véhicule

Définition 1 : Convoi de véhicule

Est un ensemble de véhicules, pilotés ou bien autonome qui se déplacent ensemble, en maintenant une organisation spatiale prédéfinie. Cette organisation spatiale est la configuration du convoi, donnée par les positions relatives des véhicules qui le forment.

La figure 2.1, montre un exemple de convoi des véhicules, réalisé dans le cadre du projet SARTRE (Safe Road Trains for the Environment). Le convoi est composé d'un véhicule de tête conduit manuellement, et de quatre véhicules autonomes (un poids lourd et trois voitures) qui suivent le véhicule de tête. Ce convoi est connu comme étant le premier convoi à circuler sur une autoroute publique, en présence d'autres voitures n'appartenant pas au convoi.



FIGURE 2.1 – Convoi de véhicules autonomes en file indienne, réalisé dans le cadre de projet SARTRE sur une autoroute publique en mai 2012 à Barcelone.

La figure 2.2 montre un autre exemple de convoi de véhicules, réalisé dans le cadre du projet PATH (Partners for Advanced Transportation TechNology), évoluant sur un réseau routier automatisé (Automated Highway System, AHS), dans lequel, toutes les voitures doivent circuler en convoi. En s'engageant dans un AHS, le chauffeur de la voiture annonce sa destination, et l'AHS lui attribue un trajet (un convoi). Un contrôleur embarqué prend le relais de la conduite. Il effectue les manœuvres d'insertion et d'éjection dans le convoi existant. Il gère aussi les opérations de changement de voie, d'entrée et de sortie. Le contrôleur exécute des algorithmes qui régulent l'accélération et la décélération de la voiture.



FIGURE 2.2 – Convoi de véhicules réalisé sur un Automated Highway System dans le cadre du projet PATH en août 1997 à San Diego.

2.3 Rôle des véhicules dans un convoi

Dans un convoi, différents rôles peuvent être assignés aux différentes entités. Dans ce qui suit, les définitions des termes qui vont être utilisés dans ce mémoire, sont présentées.

Définition 2 : *Leader global*

C'est un véhicule qui se déplace de façon indépendante par rapport aux autres véhicules du convoi. En général le leader global "connaît" la trajectoire de référence suivie par le convoi. En générale, tout convoi possède un et un seul leader global.

Définition 3 : *leader local*

Toute configuration spatiale peut être définie en positionnant chaque véhicule du convoi par rapport à un véhicule de référence dans son voisinage. Ce voisin est appelé leader local. Par exemple, dans le cas de la configuration colonne, le leader local d'un véhicule est son prédécesseur dans le convoi (celui qui se trouve immédiatement devant lui dans la direction du mouvement).

Définition 4 : *Suiveur*

Tout véhicule dans le convoi qui n'est pas leader global est appelé suiveur. Le suiveur peut suivre une trajectoire de référence, le leader global, ou son leader local.

Définition 5 : Trajectoire de référence

Une trajectoire de référence est définie comme étant la trajectoire à suivre par le leader global. Les suiveurs calculent leurs trajectoires par rapport à la trajectoire de référence, en fonction de la configuration du convoi. Cette trajectoire peut être connue au préalable, communiquée aux véhicules ou mise à jour durant l'opération du convoi.

En générale les véhicules du convoi sont numérotés de 1 à n . Le véhicule 1 est le premier véhicule dans le sens du mouvement du convoi, c'est en général le leader global du convoi. Le véhicule i a comme leader local le véhicule $i - 1$. Dans certaines configurations plusieurs véhicules peuvent avoir un même leader local. dans ce cas on peut les désigner par un couple de nombres : le véhicule $i - 1$ est leader des véhicules $(i, 1)$, $(i, 2)$, ...

2.4 Les configurations

Les véhicules d'un platoon se déplacent en gardant une configuration géométrique prédéfinie, c'est à dire que les véhicules sont positionnés suivant une forme géométrique précise. La configuration du convoi peut différer selon son domaine d'utilisation. La figure 2.3 montre trois exemples de configuration.

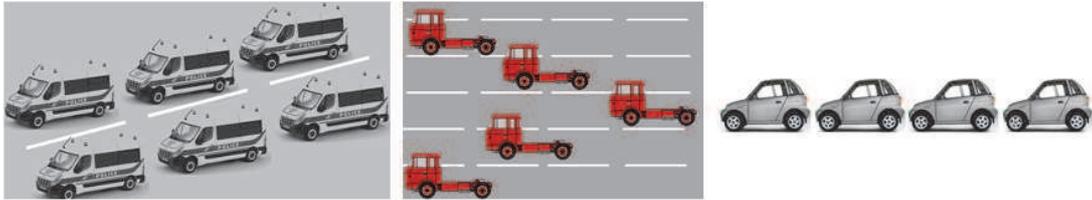


FIGURE 2.3 – Trois types de convois de véhicules avec des configurations différentes.

2.4.1 Caractérisation des configurations

Les différentes configurations peuvent être définies en donnant l'écart latéral et longitudinal de référence d'un véhicule relativement à son leader local.

Définition 6 : Axes d'un véhicule

Considérons le rectangle R qui circonscrit un véhicule (figure 2.4). L'axe longitudinale du véhicule est la droite axe de symétrie de R dans la direction avant-arrière. L'axe transversale est la droite perpendiculaire à l'axe longitudinale, par le centre géométrique de R (intersection de ses diagonales).

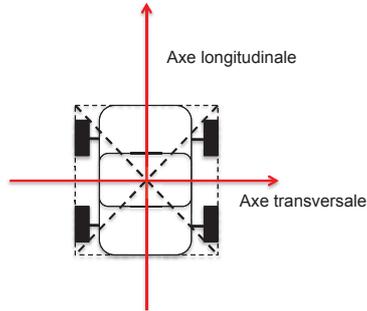


FIGURE 2.4 – Les axes d'un véhicule.

Définition 7 : Ecart latéral de référence

C'est la distance souhaitée entre l'axe longitudinale d'un véhicule et l'axe longitudinale de son leader local, en supposant que ces axes sont parallèles.

Définition 8 : Ecart longitudinal de référence

C'est la distance entre la droite qui fait le côté arrière du rectangle enveloppant le leader local et la droite qui fait le côté avant du rectangle enveloppant le véhicule suiveur, en supposant que les axes longitudinales sont parallèles.

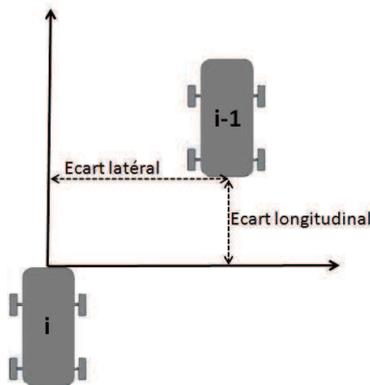


FIGURE 2.5 – Ecarts latéral et longitudinal entre deux véhicules d'un convoi.

Les écarts latéral et longitudinal mesurés sont calculés à partir de la distance entre véhicules, déterminée par la perception. La mesure de distance peut donner comme résultat un ou plusieurs vecteurs distance qui sont utilisés pour calculer les écarts, ce qui sera décrit plus loin.

2.4.2 Les configurations usuelles

Trois configurations sont considérées couramment utilisées dans la littérature : colonne, ligne et échelon.

Définition 9 : Configuration colonne

Les véhicules sont placés l'un derrière l'autre. Pour chaque véhicule, son leader local est son prédécesseur dans le convoi (cf. figure 2.6(a)). L'écart longitudinal de référence est supérieur à zéro et l'écart latéral de référence est nul. Cette configuration est connue aussi sous le nom de *train de véhicules*.

Définition 10 : Configuration ligne

Les véhicules sont placés l'un à côté de l'autre. Pour chaque véhicule, son leader local est soit le véhicule juste à sa droite, soit le véhicule placé juste à sa gauche (cf. figure 2.6(b)). L'écart longitudinal de référence est nul et l'écart latéral de référence est supérieur à zéro.

Définition 11 : Configuration échelon

Les véhicules sont placés sur une ligne diagonale. Pour chaque véhicule, son leader local est son prédécesseur dans le convoi (cf. figure 2.6(c)). Aussi bien l'écart longitudinal de référence que l'écart latéral de référence sont supérieurs à zéro.

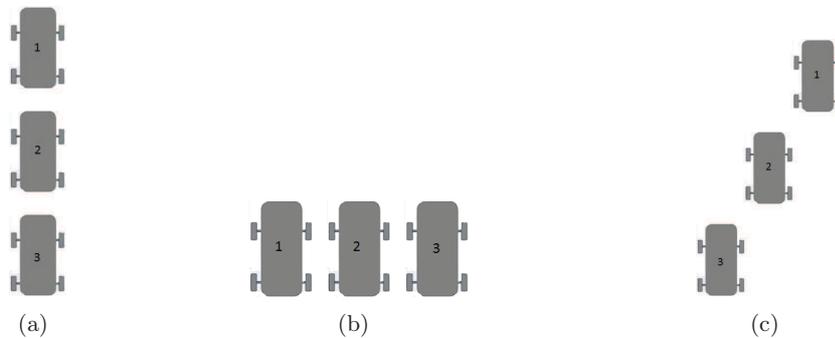


FIGURE 2.6 – Les trois configurations usuelles : Colonne (a), Ligne (b) et Echelon (c).

Toute autre configuration peut être considérée comme une composition de ces trois configurations. Par exemple, la configuration "L", montrée dans la figure 2.7(a), est la combinaison d'une configuration ligne et d'une autre colonne. De même, la configuration "Diamant", montrée dans la figure 2.7(b), est la combinaison de trois configurations échelons.

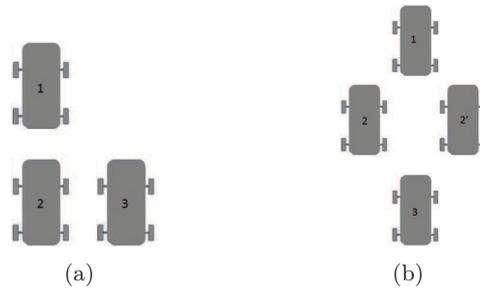


FIGURE 2.7 – Les deux configurations "L" (a) et "Diamant"(b).

Le tableau 2.1 présente les valeurs possibles de l'écart longitudinal de référence et de l'écart latéral de référence.

Configuration	Ecart latéral	Ecart longitudinal
Colonne	Null	> 0
Ligne	> 0	Null
Echelon	> 0	> 0

TABLE 2.1 – Ecarts latéral et longitudinal des configurations usuelles.

2.5 Perception, prise de décision et contrôle

Lors de l'évolution d'un convoi, les véhicules se déplacent en maintenant une configuration spatiale spécifique. Cette capacité suppose la mise en œuvre de fonctions de perception, de prise de décision et de contrôle, embarquées dans chaque véhicule. Un véhicule est donc considéré comme un système doté de ces capacités. L'architecture de ce système est représenté par la figure 2.8.

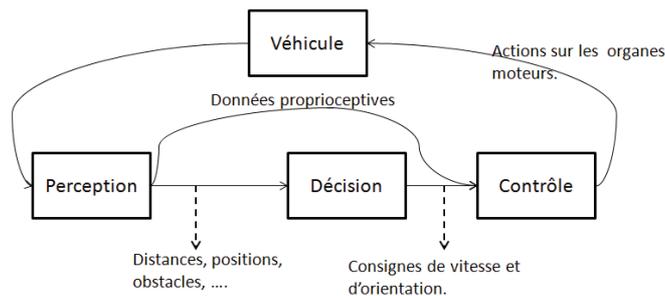


FIGURE 2.8 – Architecture du système représentant un véhicule.

- La perception permet au véhicule de se positionner dans l'environnement et d'y localiser les différents objets (véhicules, obstacles, points de la trajectoire, ...).

- La prise de décision permet au véhicule de calculer les consignes de vitesse et d'orientation, en s'appuyant sur ses perceptions.
- Le contrôle agit sur les organes moteurs, en appliquant les consignes calculées. Le contrôle, lui même, nécessite une mesure proprioceptive du mouvement.

2.5.1 La perception

La perception peut être définie comme étant la capacité du véhicule à localiser les objets dans son environnement.

Définition 12 : Localisation

Correspond à l'action de déterminer la position d'un objet, mobile ou fixe, par rapport à un repère connu [Gec03].

La localisation peut être absolue ou relative.

Définition 13 : Localisation absolue

Dans une localisation absolue, tous les véhicules localisent les objets de l'environnement dans un même repère global (cf. figure 2.9(a)).

Définition 14 : Localisation relative

Dans une localisation relative, chaque véhicule situe les objets de l'environnement dans son propre repère. Pour le repère local, nous adoptons la convention suivante : Le repère local d'un véhicule a comme origine le centre géométrique^a du véhicule et, ses directions sont les axes longitudinal et transversal (cf. figure 2.9(b)).

^a le centre géométrique est le point d'intersection des diagonales du plus petit rectangle qui enferme le véhicule.

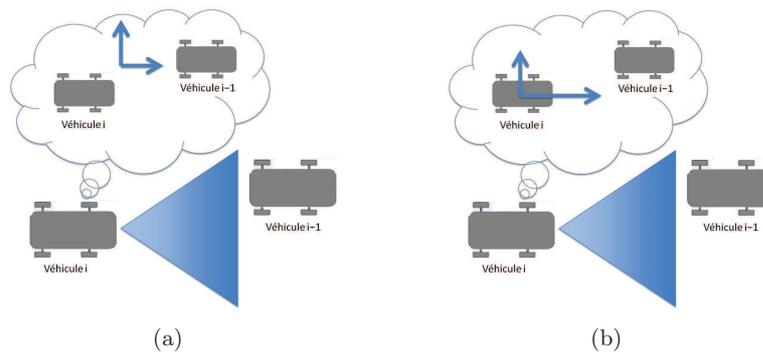


FIGURE 2.9 – Localisation absolue(a) et localisation relative (b).

Dans le cas absolu, la localisation du leader local est calculée par rapport au référentiel global, le même par tous les véhicules. Dans le cas relatif, la position du véhicule est définie dans le repère local.

2.5.2 Prise de décision et contrôle

A partir de la perception de l'environnement, les véhicules doivent se déplacer en préservant et/ou adaptant la configuration géométrique prédéfinie du convoi, en tenant compte des caractéristiques perçues : forme du terrain, obstacles, ... La prise de décision permet au véhicule, en utilisant les données de la perception, de calculer les consignes de vitesse et de direction. Le contrôle permet de réguler l'action des organes moteurs du véhicule, en fonction des consignes. Le contrôle nécessite aussi une mesure proprioceptive du mouvement.

Les approches de prise de décision trouvées dans la littérature peuvent être classées en deux catégories : décentralisées et centralisées.

Définition 15 : Approche décentralisée

Dans une approche décentralisée le comportement d'un véhicule résulte des informations dérivées à partir de sa perception de l'environnement et sa localisation. Chaque véhicule calcule lui même ses consignes de vitesse et de direction (cf figure 2.10(a)).

Définition 16 : Approche centralisée

Une approche de prise de décision est considérée comme centralisée s'il existe une unité de commande (généralement le leader global) responsable de la diffusion des consignes de vitesse et d'orientation à tous les véhicules du convoi (cf figure 2.10(b)). Dans certaines approches, le véhicule leader transmet des points de trajectoire dans un repère global et chaque suiveur se localise dans ce repère et peut élaborer une décision.

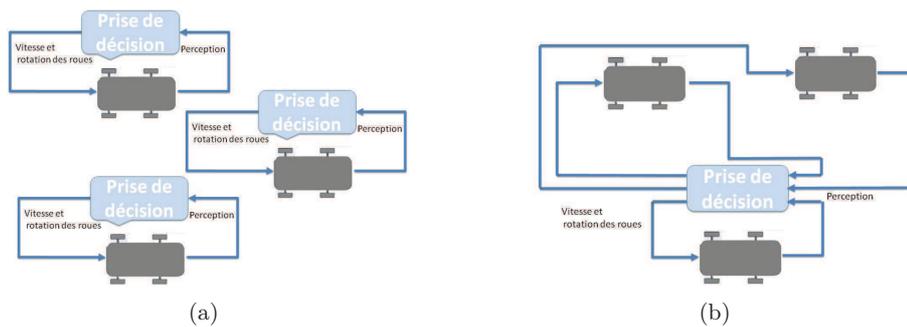


FIGURE 2.10 – Prise de décision décentralisée (a) et centralisée (b).

Une erreur est définie comme étant la différence entre l'écart de référence et l'écart mesuré à

un instant donné. Cette erreur est décomposée en deux composantes : longitudinale et latérale. Le rôle du contrôle est de minimiser cette erreur. Les deux composantes peuvent être contrôlées séparément.

Définition 17 : Contrôle longitudinal

Consiste à contrôler le frein et l'accélération afin de stabiliser l'écart longitudinal entre le véhicule et son leader local.

Définition 18 : Contrôle latéral

Consiste à contrôler l'orientation du véhicule, pour garder un écart latéral stable entre le véhicule et son leader local

2.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents termes et définitions utilisés dans le domaine des convois de véhicules. En s'appuyant sur ces définitions, un état de l'art sur les différentes approches de prise de décision des systèmes de convois de véhicules est présenté dans le chapitre suivant. Ces termes sont ensuite utilisés, dans le chapitre 4 pour la description de notre approche pour la conduite autonome en convoi colonne, et dans le chapitre 5 pour les autres configurations.

Chapitre 3

Décision et contrôle pour la conduite en convoi : état de l'art

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter un état de l'art des travaux de recherche proposés dans le domaine de convoi de véhicules. En particulier, nous abordons les aspects prise de décision et contrôle. La plupart des approches proposées dans ce domaine traitent les configurations colonnes. Les premiers travaux sur la problématique de la conduite en convoi concernaient le milieu routier. Les approches de prise de décision et contrôle peuvent être classées en deux catégories : décentralisée et centralisée (définies dans la section 2.5.2).

Il semble pertinent de revenir ici sur la distinction entre prise de décision et contrôle. Comme l'illustre la figure 3.1, la prise de décision se place en amont du contrôle. Elle prend en entrée des données de trajectoire, de position propre et de position d'autres entités (véhicules, obstacles), pour déterminer une vitesse et une direction pour le véhicule. Celles-ci sont les entrées de la fonction de contrôle qui calcule les signaux de commande adressés aux organes moteurs et de direction.

Cette architecture est adaptée à l'intégration des fonctions d'évitement d'obstacles, comme l'illustrent d'autres travaux de notre équipe [DGGK13]. Dans ce mémoire nous faisons abstraction de la fonction d'évitement d'obstacles. Ceci a comme conséquence le fait que la distinction entre décision et contrôle devient moins importante. Ainsi, l'état de l'art présenté dans ce chapitre ne met pas l'accent sur cette distinction et, de fait, donne plus de poids à l'aspect contrôle.

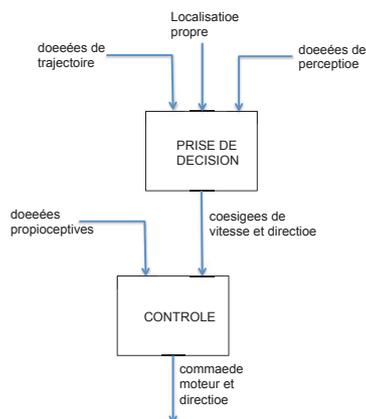


FIGURE 3.1 – Contrôle local

La première section de ce chapitre est dédiée pour la présentation des travaux sur les approches de convoi de véhicules. La seconde section montre une étude des approches utilisées en robotique mobile pour le problème de multi-configurations.

3.2 Prise de décision décentralisée

La plupart des propositions citées dans la littérature s'appuient sur des approches décentralisées. Dans ces approches, un véhicule calcule ses consignes en s'asservissant sur **un leader local**, sur le **leader global** ou sur une **trajectoire de référence**.

3.2.1 Asservissement sur le leader local

Dans ce type d'approche, chaque véhicule possède des capacités perceptives locales (cf. figure 3.2). Les capteurs mesurent la distance vectorielle par rapport aux objets de l'environnement (véhicule précédent, obstacles, ...). A partir de cette perception, un algorithme est appliqué pour calculer des consignes de vitesse et d'orientation. En mode de fonctionnement normal, aucune communication de véhicule à véhicule n'est requise.



FIGURE 3.2 – Contrôle local

La plupart des approches décentralisées, avec asservissements sur le leader local, utilisent des contrôleurs PID (Proportional Integral Derivative), comme dans [IX94, MH90, DP96]. D'autres

approches proposées sont basées sur des modèles d'interaction physique, où les véhicules du convoi calculent leurs commandes grâce à un lien d'interaction comme dans [GS01, YC05, CGGK11].

Approche basée sur le contrôle automatique

Dans [DP96], une approche de prise de décision décentralisée est proposée, où chaque véhicule s'asservit sur son leader local (son prédécesseur dans le convoi). Les véhicules suiveurs sont équipés d'un dispositif de mesure qui permet d'évaluer la distance, l'angle de brisure et la vitesse relative du véhicule par rapport à son leader local. Le dispositif est basé sur une approche de détection de cible par des caméras linéaires. Les cibles utilisées sont trois LED placées sur l'axe arrière du leader local.

Pour la prise de décision, la loi de contrôle/commande est décomposée en une loi pour le contrôle longitudinal et une autre pour le contrôle latéral. Les capteurs installés sur le véhicule permettent, au contrôle longitudinal, de recevoir comme entrée une estimation de l'état du véhicule leader local : sa position, sa vitesse et son orientation.

Une équation linéaire, reliant la position et la vitesse du véhicule (X_f et V_f) avec la position de son leader local (X_l) est utilisée :

$$X_l - X_f = d_{min} + h.V_f \quad (3.1)$$

Où d_{min} représente l'inter-distance initiale et h représente le temps.

La différentielle de cette équation peut être écrite sous la forme : $V_l - V_f = h.A_f$. En utilisant la transformation de Laplace, la vitesse de consigne peut être déduite selon l'équation suivante :

$$V_f = \frac{V_l}{1 + h.s} \quad (3.2)$$

La loi de contrôle latérale consiste, quant à elle, en la conservation d'un angle proche de zéro entre le véhicule précédent et le suivant.

D'autres méthodes de contrôle basées sur des approches inspirées de l'automatique peuvent être rencontrées. Par exemple, dans [SD93, SD92], un contrôle utilisant une méthode de linéarisation exacte est proposé. Dans [IX94], le frein et l'accélération sont contrôlés avec un asservissement par un contrôleur PID. Dans [LK02, LT03], une approche basée sur la logique floue est proposée.

Approche basée sur un modèle géométrique

Dans [Pal08], le mécanisme de perception utilisé permet au véhicule de mesurer la distance qui le sépare de son leader local, ainsi que l'angle de brisure entre les deux véhicules. On peut dire que la localisation du leader local est relative.

Deux points de références sont définis : R_{1r} et R_{2f} . R_{1r} est placé sur l'axe longitudinal du véhicule leader, à une distance l derrière son essieu arrière. R_{2f} est placé sur l'axe longitudinal du

véhicule suiveur, à une distance l devant son essieu avant. La distance l représente l'empattement du véhicule .

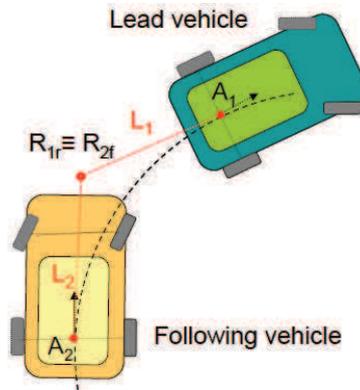


FIGURE 3.3 – Suivi idéal de suivi de trajet [Pal08].

Dans les cas idéaux de suivi de trajectoire, les deux points R_{1r} et R_{2f} sont confondus, comme le montre la figure 3.3. La différence entre ces deux points est l'erreur de suivi. Les coordonnées du point R_{2f} dans le référentiel (R_{1r}, x, y) sont exprimées de la façon suivante :

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{x_{R2f}} - F_{x_{R1r}} \\ F_{y_{R2f}} - F_{y_{R1r}} \\ \theta_2 - \theta_1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Où, $(F_{x_{R2f}}, F_{y_{R2f}}, \theta_2)$ et $(F_{x_{R1r}}, F_{y_{R1r}}, \theta_1)$ représentent respectivement les coordonnées des points R_{2f} et R_{1r} dans le référentiel inertiel F .

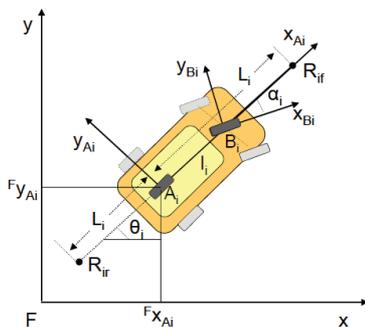


FIGURE 3.4 – Schéma du véhicule [Pal08]

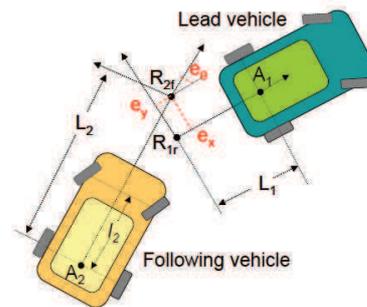


FIGURE 3.5 – Suivi autonome de deux véhicule [Pal08]

En dérivant l'équation 3.3 par rapport au temps et en utilisant des matrices de passage au référentiel inertiel. Les coordonnées de la vitesse de consigne sont déduites (cf. figure 3.4 et 3.5) :

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos e_\theta & -L_2 \sin e_\theta \\ \sin e_\theta & L_2 \cos e_\theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ W_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ W_1 \end{pmatrix} + \dot{\theta}_2 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Où, (V_2, W_2) et (V_1, W_1) sont respectivement les vitesses linéaires et angulaires du véhicule et de son leader local. Dans les cas des mouvements linéaires, cette équation peut être réduite à :

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos e_\theta & -L_2 \sin e_\theta \\ \sin e_\theta & L_2 \cos e_\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ W_2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Approche basée sur un lien mécanique virtuel

Dans [CGGK11], chaque véhicule du convoi est conçu comme un agent réactif capable de percevoir son environnement et de réagir en maintenant une distance prédéfinie avec le leader local. La conduite en convoi est le résultat des interactions directes entre un véhicule suiveur et son leader local(cf figure 3.6).

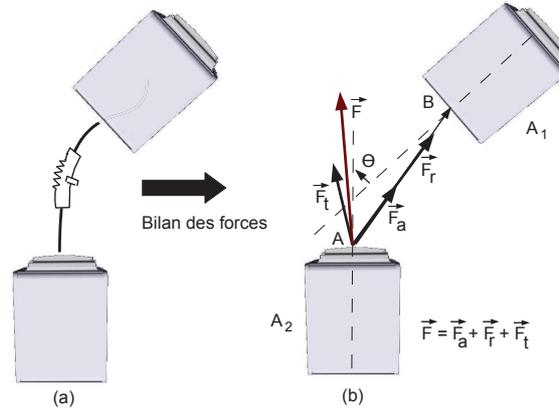


FIGURE 3.6 – Modèle de contrôle basé sur un lien virtuel [CGGK11].

Le véhicule perçoit son leader d'une façon locale, grâce à un télémètre laser installé sur le devant du véhicule suiveur. Ce télémètre mesure les distances vectorielles vers le leader local, en détectant des bandes réfléchissantes installées sur l'arrière du véhicule leader local.

Le véhicule calcule ses consignes de vitesse et d'orientation grâce à un modèle d'interaction inspiré de la physique. En effet, l'interaction entre le véhicule et son leader local, est matérialisée par un lien virtuel de type "masse-ressort", complété par un moment de torsion.

Un mécanisme de perception permet au véhicule de mesurer la distance vectorielle \vec{d} qui le sépare de son prédécesseur. Le véhicule calcule son accélération (\vec{a}) en utilisant les lois Newtoniennes :

$$m\vec{a} = \vec{F}_r + \vec{F}_a + \vec{F}_t \quad (3.6)$$

Où, m est la masse du véhicule, \vec{F}_r est la force produite par le ressort, \vec{F}_a est la force de l'amortisseur, et \vec{F}_t est la force de torsion ajoutée.

Les consignes de vitesse et d'orientation sont ensuite calculées par intégration.

D'autres approches utilisant le principe d'un lien mécanique virtuel peuvent aussi être rencontrées. Dans [GS01], une accroche immatérielle est construite en modélisant les véhicules comme étant des particules reliées par des ressorts et soumises à des forces. Dans [YC05], l'accrochage immatérielle est modélisé par un modèle d'impédance contrôle.

Avantages et inconvénients de l'asservissement sur un leader local

Le principal avantage des approches décentralisées avec asservissement sur le leader local, est le coût de mise en œuvre de l'approche. Généralement, des capteurs qui permettent de mesurer les distances sont suffisants. Un deuxième avantage, est le fait que dans une ce type d'approche, il n'y a pas d'entité avec un rôle critique comme dans les cas des approches centralisées.

Dans les trois approches [DP96], [Pal08] et [CGGK11] détaillées, le véhicule suiveur s'asservit sur un leader local : son prédécesseur dans le convoi. L'inconvénient majeur de ce type des approches, est qu'elles souffrent du problème d'anticipation, qui s'exprime par la présence d'un écart entre le trajet désiré et le trajet réellement suivi par le véhicule. Le problème d'anticipation est détaillé dans le paragraphe 4.2.1).

3.2.2 Asservissement sur un leader global et une trajectoire de référence

Dans ces approches décentralisées, tous les véhicules du convoi s'asservissent sur un ou plusieurs même(s) élément(s). Cet élément est, soit le leader global soit une trajectoire de référence.

Dans [ATM12], les véhicules sont représentés par un modèle cinématique bicycle, et le formalisme des systèmes chaînés est utilisé pour découpler de manière exacte les commandes latérale et longitudinale.

Les véhicules se localisent, d'une façon absolue, sur une trajectoire de référence fournie au préalable (convoi en mode automatique) ou calculée en temps réel par le véhicule leader et transmise aux véhicules suiveurs (convoi en mode semi-automatique). Un véhicule suiveur s'asservit latéralement sur la trajectoire de référence. Il s'asservit longitudinalement par rapport à l'abscisse curviligne du véhicule leader sur cette trajectoire. Dans le cas où l'environnement l'exige (obstacles, configuration du terrain, ...), il est possible de commuter d'un asservissement

sur le véhicule de tête à un asservissement sur le véhicule prédécesseur pour assurer la sécurité du convoi, comme dans les cas du freinage urgent.

L'architecture de la stratégie de contrôle adoptée dans [ATM12] est divisée en sept modules. La figure 3.7(a) montre l'architecture du véhicule leader. La figure 3.7(b) montre l'architecture du véhicule suiveur. Les sept modules constituant la stratégie de contrôle peuvent être décrits comme suit :

1. *Reconstruction de la carte* : Durant une étape préliminaire (hors-ligne), un véhicule est conduit manuellement dans l'environnement. Des séquences vidéos sont enregistrées. Une méthode de localisation par vision monoculaire est utilisée pour la construction d'une carte 3-D représentant la trajectoire parcourue. Cette trajectoire, nommée "trajectoire d'origine (Γ^*)", va être partagée avec tous les véhicules du convoi.
2. *Perception locale* : Les perceptions des véhicules suiveurs sont assurées à l'aide des caméra embarquées. Pour chaque véhicule suiveur $i + 1$, ces perceptions vont permettre de déduire :
 - O_i^v : les coordonnées du centre de l'essieu avant du véhicule suiveur i , exprimées dans le monde de vision.
 - θ_i^v : l'orientation du véhicule suiveur i dans le monde de vision.

Les données de perceptions avec celles déduites par proprioceptivité, permettent de déduire :

- v_i : la vitesse linéaire du véhicule au point O_i .
 - δ_i : l'angle du braquage du véhicule i .
3. *Création du trajet* : durant le convoi, le véhicule leader global communique ses positions successives, à chacun des véhicules suiveurs. Le trajet formé à partir de ces positions est appelé "trajectoire de référence Γ^v ".
 4. *Communication* : durant l'évolution du convoi, le leader transmet les mises à jour de la trajectoire de référence Γ^v aux véhicules suiveurs. Chaque véhicule suiveur va recevoir les données de perception du leader et de son prédécesseur dans le convoi. Il va, en même temps, transmettre ses données de perceptions à son suiveur direct.
 5. *Les états d'évolutions du convoi* : Un véhicule suiveur i est relié à son prédécesseur et au leader du convoi. Les variables exprimant l'état du véhicule i dans le monde de vision sont :
 - $s_{k \in \{1, i-1, i\}}^v$: la longueur d'arc entre véhicules, suivant la trajectoire de référence Γ^v .
 - $y_{k \in \{1, i-1, i\}}^v$ et $\tilde{\theta}_{k \in \{1, i-1, i\}}^v$: Les déviations latérale et angulaire par rapport à Γ^v .
 6. Les variables d'état du véhicule sont exprimées dans le monde métrique. Pour le i^{eme} véhicule, ces paramètres sont : $s_{k \in \{1, i-1, i\}}$, $y_{k \in \{1, i-1, i\}}$ et $\tilde{\theta}_{k \in \{1, i-1, i\}}$.
 7. *Contrôle* : Le contrôle latéral est conçu pour garantir une convergence vers zéro de y_i et θ_i . Le contrôle longitudinal est conçu pour réguler la distance $s_1 - s_i$ entre le i^{eme} véhicule et le véhicule leader. Cependant, pour des raisons de sécurité, si le véhicule prédécesseur est anormalement proche, les lois de contrôle sont modifiées pour réguler $s_{i-1} - s_i$: l'écart entre le véhicule et son prédécesseur.

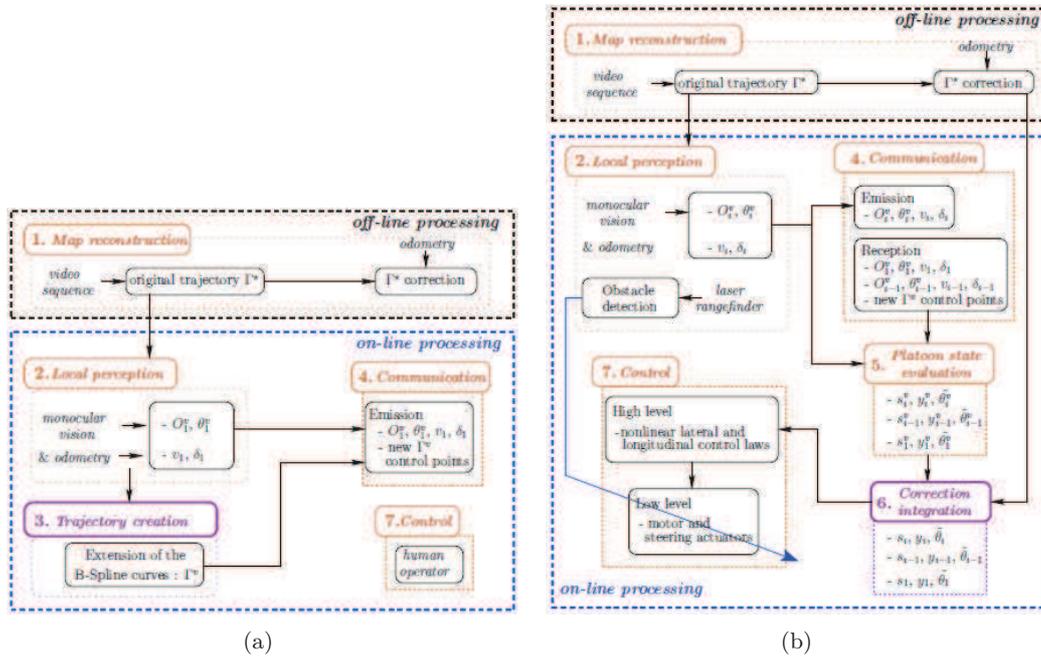


FIGURE 3.7 – Architectures du véhicule leader(a) et du véhicule suiveur(b) [ATM12].

Cette approche montre des résultats prometteurs en terme de suivi de trajet. Cependant, une communication fiable entre les véhicules est nécessaire. L'approche requiert aussi des équipements (caméra, GPS RTK,...) qui peuvent avoir des coûts élevés.

3.3 Prise de décision centralisée

Dans les approches centralisées, le véhicule leader du convoi transmet les informations nécessaires (accélération, orientation) aux autres véhicules du convoi. Généralement, les approches centralisées utilisent des systèmes de positionnement comme le GPS RTK (Real Time Kinematic), qui permet un positionnement global des véhicules, comme dans [WC01, PM06].

Approche basée sur un système de coordonnées généralisées

Dans [CVJ03], le convoi de véhicules est considéré comme un seul corps physique caractérisé par un ensemble de coordonnées généralisées q , décrivant sa position et son orientation. Le convoi

est décrit par son centre de masse x_c , et caractérisé par les distances $x_{i,j}$ entre les véhicules :

$$q = [x_c, x_{2,1}, \dots, x_{N,N-1}]^T \quad (3.7)$$

$$x_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N m_i x_i, \text{ avec } m = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3.8)$$

$$x_{i,j} = x_j - x_i \quad (3.9)$$

où $x_1 \dots x_n$ représentent les positions de chacun des véhicules. L'équation de mouvement du convoi est déterminée selon une approche de Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q \quad (3.10)$$

T représente l'énergie cinétique et Q représente les forces agissant sur le convoi. Une matrice R est ensuite définie, R permet le passage entre les coordonnées inertielles et les coordonnées généralisées. R va permettre de calculer T et d'exprimer Q , en fonction du vecteur de commande u . Une fois le calcul de T et Q est injecté dans les équations de Lagrange, on obtient un système dynamique de la forme :

$$M \ddot{q} = R u \quad (3.11)$$

On définit ensuite un profil désiré (q_{des}) du convoi. L'erreur est donc exprimée par $e = q - q_{des}$ ($\ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_{des}$). La dynamique de l'erreur est donnée par l'équation suivante :

$$M \ddot{e} = R u - M \ddot{q}_{des} \quad (3.12)$$

La loi de commande s'obtient finalement par inversion du système dynamique obtenu. L'évolution de l'erreur dépend de deux matrices de gain C et K :

$$u = R^{-1}(M \ddot{q}_{des} - C \dot{e} - K e) \quad (3.13)$$

$$M \ddot{e} + C \dot{e} + K e = 0 \quad (3.14)$$

La nécessité de disposer de la localisation de tous les véhicules, peut cependant devenir un obstacle technique, en particulier si le convoi est constitué de nombreux véhicules.

Avantages et inconvénients des approches centralisées

Le principal avantage de l'approche centralisée comparant à l'approche décentralisée est la qualité de suivi de trajet. Les approches centralisées ne souffrent pas du problème d'anticipation.

L'inconvénient majeur de l'approche est le coût élevé des matériels nécessaires pour le positionnement des véhicules, et la communication entre véhicules.

3.4 Convois de véhicules avec multi-configurations

Dans la littérature sur la multi-configuration, on peut difficilement trouver des approches appliquées sur des convois de véhicules. En revanche, beaucoup de travaux ont étudié ce problème pour les robots mobiles, un ensemble des robots pouvant se déplacer dans n'importe quelle direction tout en préservant une certaine configuration géométrique. Pour l'aspect multi-configurations du convoi de véhicule, nous nous sommes donc inspirés des travaux réalisés dans le domaine des robots mobiles.

Pour cette problématique, trois familles d'approches ont été proposées : des approches de type comportementales, des approches basées sur des structures virtuelles, et des approches basées sur le principe leader/follower.

3.4.1 Approche comportementale

Une approche comportementale [LBM03, FM02, SY99] est une approche auto-organisationnelle, où chaque robot agit d'une façon autonome en se basant sur ses perceptions et connaissances de l'environnement. Le maintien de la configuration émerge comme un résultat du comportement individuel de chacun des robots de la formation. Plusieurs comportements peuvent être attribués au robot : aller vers une cible, éviter un obstacle statique, maintenir la configuration,.... A chaque comportement est assigné un degré d'importance prédéfini. Chaque comportement produit une réponse (orientation et direction, vitesse...) différente. Le contrôle global est déduit en effectuant une somme des comportements, pondérés par leurs degrés d'importance et en normalisant le résultat.

L'avantage des approches comportementales est qu'elles ne nécessitent pas de communication entre les robots de la formation. Par contre, le comportement global du groupe de robots dans ces approches ne peut pas être défini explicitement, il est le résultat émergent du comportement de chacun des robots. En plus, le fait que chacun des robots possède différents comportements rend plus difficile de prouver la stabilité du système et la cohésion de la formation.

L'approche comportementale a été appliquée dans plusieurs domaines :

- Formations des convois des véhicules militaires [BA97].
- Formations des vaisseaux spatiaux [BSZX12].
- Système multi-robots organisé comme un système multi-agents [Gaz05] .

Dans [BA97], les auteurs utilisent des systèmes multi-robots pour étudier les convois des véhicules militaires. Les formations étudiées sont celles qui sont le plus utilisées par l'armée des Etats Unis : ligne, colonne, diamant et arc. Dans ces convois, le comportement global de chacun des véhicules robots est la composition des sous-comportements suivants : déplacement vers une cible, évitement d'obstacles, évitement de collision avec d'autres robots, et maintien de la position dans la formation.

Pour chaque sous-comportement est associé un contrôleur, qui génère un vecteur (direction et magnitude de mouvement) représentant le comportement désiré. Une valeur de gain est aussi

associée à chaque sous-comportement pour préciser son degré d'importance. Le comportement global, résulte de la multiplication de la sortie de chaque sous-comportement par le gain qui lui est attribué, l'addition puis la normalisation des résultats. Le tableau 3.1 montre un exemple d'attribution des gains aux sous-comportements :

Sous-comportement	Valeur du gain
Evitement des obstacles statiques	1.5
Evitement des robots	2.0
Déplacement vers le but	0.8
Maintien de la formation	1.0

TABLE 3.1 – Répartitions des gains entre les sous-comportements [BA97].

Pour le sous-comportement de maintien de la formation, une boucle de perception détermine la position du robot dans la formation. Le contrôleur, responsable du maintien de formation, génère des commandes de direction (un vecteur mouvement) qui dirige le robot vers sa position correcte dans la formation.

Pour déterminer la position du robot, une parmi les trois approches de perception suivantes est utilisée :

- Référentiel de l'unité centrale : une unité centrale est calculée, indépendamment par chaque robot, en moyennant les x et les y des positions des robots de la formation. Chaque robot détermine sa propre position dans la formation, relativement à cette unité centrale.
- Référentiel du leader : chaque robot détermine sa position par rapport au leader de la formation. Le leader ne s'intéresse pas à garder la formation, ce sont les autres robots qu'y sont responsables.
- Référentiel d'un voisin : chaque robot maintient une position relative à un autre robot de la formation.

Une fois que la position désirée est connue, le contrôleur génère un vecteur mouvement vers cette position. Le vecteur prend toujours la direction de la position désirée. La magnitude du vecteur dépend de la distance vers cette position. Pour cela, trois zones sont considérées, dont les rayons sont des paramètres définis : la zone balistique, la zone de contrôle et la zone morte (cf. figure 3.8). Si le robot est dans la zone balistique, la magnitude est fixée à son maximum possible. Si le robot est dans la zone de contrôle, la magnitude varie linéairement entre un maximum et un minimum définis. Si le robot est dans la zone morte, la magnitude est nulle.

3.4.2 Approche basée sur une structure virtuelle

Dans cette approche [LT97, YBK01, EKBLA09], les robots du système circulent comme étant une seule entité physique virtuelle. Chaque robot essaye de maintenir une position fixe sur la structure virtuelle. La structure virtuelle peut évoluer au cours du temps comme un corps rigide ayant sa direction et sa propre orientation (cf. figure 3.9).

Cette approche montre des résultats probants pour le maintien de la formation. Par contre, c'est une approche centralisée et nécessite une communication fiable entre les robots. L'approche

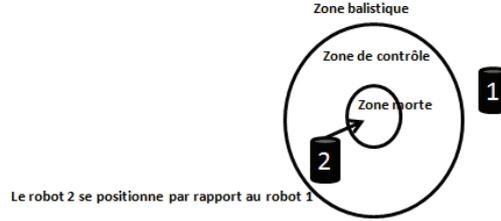


FIGURE 3.8 – Zones pour le calcul de la magnitude du vecteur généré par le contrôleur du maintien de la formation.

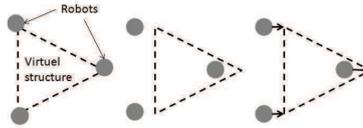


FIGURE 3.9 – Structure virtuelle.

de la structure virtuelle est utilisée dans plusieurs domaines, comme par exemple :

- Dans un système des vaisseaux spatiaux [RB04].
- Pour le contrôle des formations mono-cycle [VDBVDWN09].
- Dans un système des robots-véhicules non-holonomes [ZLX13].

[YBK01] présente une approche de contrôle de formation basée sur le principe de la structure virtuelle. Dans l'approche proposée, un contrôleur envoi, à chaque instant "t", une variable de coordination "ε" à tous les robots de la formation.

les équations cinématiques caractérisant le mouvement de chacun des robot sont les suivantes :

$$\dot{x} = v \cos(\theta) \quad (3.15)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) \quad (3.16)$$

$$\dot{\theta} = w \quad (3.17)$$

Où, (x, y) est la position du centre de gravité du robot, θ est son angle dans le référentiel inertiel, v est la vitesse du robot, et w est la vitesse angulaire (cf. figure 3.10).

La structure virtuelle est considérée comme un corps solide ayant son propre centre de gravité noté (x'_c, y'_c) . En déplaçant le centre de gravité, la formation subit une translation. L'orientation du corps virtuel est définie par θ'_c . La position du centre de gravité ainsi que l'orientation du corps virtuel forment un référentiel non-inertiel noté (x'_c, y'_c, θ'_c) . Le reste du corps solide se positionne dans ce même référentiel non-inertiel. Une position, dans le référentiel non-inertiel, est associée à chacun des robots de la formation. Le corps virtuel évolue dans le temps, la position désirée, pour chaque robot, trace alors un trajet désiré à suivre par le robot. Les points du trajet désiré sont notés (x'_{id}, y'_{id}) . La figure 3.10 montre une image du corps virtuel

avec les deux référentiels : inertiel et non inertiel.

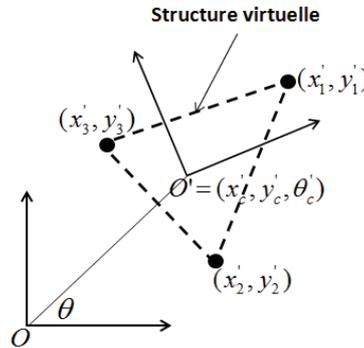


FIGURE 3.10 – La structure virtuelle.

Ainsi, la variable de coordination ϵ à envoyer à tous les robots sera :

$$\epsilon(t) = (x'_c(t), y'_c(t), \theta'_c(t), x'_d(t), y'_d(t)) \quad (3.18)$$

Où, $x'_d(t) = (x'_{1d}(t), \dots, x'_{Nd}(t))$, $y'_d(t) = (y'_{1d}(t), \dots, y'_{Nd}(t))$. En utilisant ces paramètres, on peut relier la position désirée de chaque robot dans le référentiel non-inertiel (celui du corps rigide) à celle désirée dans le référentiel inertiel.

3.4.3 Approche basée sur le principe leader/follower

Dans cette approche, [DFK⁺02, FDKO01, TK04, FGM10], un des robots est considéré comme leader et suit une trajectoire prédéfinie, les autres perçoivent ce leader, et le suivent en gardant les écarts longitudinaux et latéraux qui permettent de préserver la configuration géométrique prédéfinie (cf. figure 3.11).

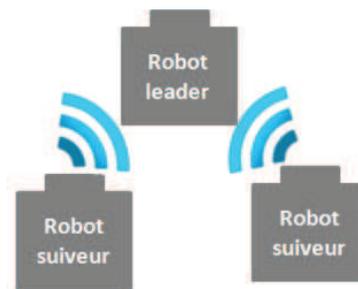


FIGURE 3.11 – Approche leader/follower.

L'approche de leader/follower présente des résultats probants au niveau du maintien de la configuration. Le problème principal de cette approche est que le rôle prépondérant est at-

tribué à une seule entité, le robot leader, avec les conséquences bien connues en terme de fiabilité.

L'approche de leader/follower est utilisée :

- Dans [YCLL08], pour le contrôle des formations des drones (UAV : Unmanned Aerial Vehicles).
- Dans [DTK09], pour les contrôles des formations des vaisseaux spatiaux.
- Dans [CGHC10], pour contrôler les formations des véhicules autonomes sous-marin (AUV : Autonomous Underwater Vehicle).

Dans [YCLL08], l'approche leader/follower est appliquée sur un système des multi-drones. Dans la figure 3.12, (x_l, y_l, z_l) représente la position du drone leader dans le référentiel inertiel. (x_w, y_w, z_w) représente la position du drone suiveur. Le vecteur \vec{R}_l est le vecteur allant de la position désirée du suiveur jusqu'à la position du leader. Le vecteur \vec{R}_w relie la position actuelle du drone suiveur avec sa position désirée. Le vecteur \vec{R}_{lw} relie la position actuelle du suiveur avec la position du leader. Les trois vecteurs sont définis dans le référentiel du drone leader. f , l et h représentent respectivement l'écart latéral, l'écart longitudinal et la différence d'altitude entre la position actuelle du suiveur et sa position désirée. Par suite, l'équation suivante peut être écrite :

$$\vec{R}_w = \vec{R}_{lw} - \vec{R}_l = \begin{pmatrix} f \\ l \\ h \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Où,

$$\vec{R}_l = \begin{pmatrix} f_c \\ l_c \\ h_c \end{pmatrix}, \quad \vec{R}_{lw} = C_B \begin{pmatrix} x_l - x_w \\ y_l - y_w \\ z_l - z_w \end{pmatrix}$$

Où C_B est la matrice de transformation du référentiel inertiel au référentiel non-inertiel du leader.

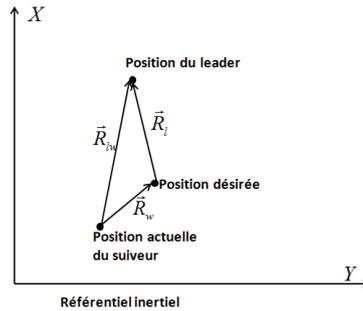


FIGURE 3.12 – Approche leader/follower appliquée sur les formations des drones.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art des différentes approches proposées pour la conduite en convoi en configuration colonne. Les approches proposées ont été classées en deux catégories : prise de décision centralisée et prise de décision décentralisée. Pour l'aspect multi-configuration, l'inspiration est tirée de ce qui est appliqué sur les robots mobiles. Les approches de multi-configurations ont été classées en trois catégories : approche comportementale, approche basée sur une structure virtuelle, approche basée sur le principe leader/follower.

Nous exposons, dans le prochain chapitre, l'approche que nous proposons pour la conduite en convoi autonomes. Cette approche est décentralisée, avec une localisation relative. Chaque véhicule perçoit son leader local, et le localise dans son repère local. Le comportement du véhicule et le résultat de ses propres perceptions. Pour maintenir la configuration, l'inspiration sera tirée de l'approche comportementale, où chaque véhicule doit maintenir une position relative dans la formation.

Chapitre 4

Approche locale pour la conduite en convoi en configuration colonne

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'approche que nous proposons pour la conduite en convoi en configuration colonne. L'approche de prise de décision proposée est une approche décentralisée avec une perception locale. Un véhicule suiveur est doté de capacité de perception et de prise de décision, qui lui permet de percevoir son environnement et de décider de ses mouvements.

La prise de décision correspond au calcul des consignes de vitesse et d'orientation. Pour calculer les consignes, on utilise un modèle d'interaction s'appuyant sur une liaison physique virtuelle entre deux véhicules [EZGGH11, EZCGG11a].

Ce chapitre présente, dans une première section, le modèle d'interaction proposé, ainsi que le mécanisme de perception. La section 4.3 expose le calcul des paramètres nécessaires pour le calcul des consignes. La section 4.4 montre comment le modèle sera utilisé pour calculer les consignes de vitesse et d'orientation. Finalement, la section 4.5 étudie la stabilité du modèle proposé, en utilisant le théorème de Lyapunov et le principe de "String stability".

4.2 Présentation de l'approche

L'approche que nous proposons pour la conduite en convoi est une approche auto-organisationnelle, où le maintien de la configuration émerge comme un résultat du comportement individuel de chacun des véhicules. Les véhicules sont dotés de capacités de perception et de prise de décision qui leurs permettent de réagir de façon autonome dans son environnement.

Pour éviter les contraintes imposées par les approches dites centralisées : le coût élevé et la présence d'une entité avec un rôle critique, nous adoptons une approche décentralisée. Chaque véhicule agit en se basant sur ses propres perceptions. Un véhicule suiveur perçoit son leader local, qui est son prédécesseur dans le convoi et calcule ses propres consignes de vitesse et d'orienta-

tion. Pour calculer ces consignes, le véhicule utilise un modèle d'interaction basé sur une liaison physique virtuelle.

4.2.1 Choix du modèle d'interaction

Modèle classique à un ressort et le problème d'anticipation

Comme expliqué précédemment, les approches décentralisées où chaque véhicule s'asservit sur son leader local, sont souvent confrontées au problème d'anticipation. L'erreur d'anticipation est l'erreur produite lors des virages, où le véhicule suiveur a tendance à couper en ligne droite au lieu d'effectuer le virage, comme le montre la figure 4.1.

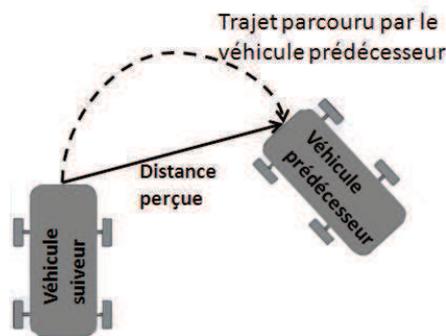


FIGURE 4.1 – Erreur d'anticipation produite dans les virages.

Des approches décentralisées, qui utilisent des modèles d'interaction à un seul ressort, corrigent cette erreur en introduisant des forces extérieures au système. Dans [CGGK11] par exemple, une force de torsion est ajoutée pour attirer le véhicule vers l'extérieur du virage. Le principe suivi dans cette thèse est de trouver un modèle d'interaction qui permet de réduire cette erreur sans avoir besoin d'introduire des forces extérieures au système.

Vers un modèle à deux ressorts

Le modèle d'interaction virtuel proposé est composé de deux ressorts et d'un amortisseur reliant les extrémités de l'essieu avant du véhicule avec les extrémités de l'essieu arrière de son prédécesseur (cf figure 4.2). L'hypothèse que nous cherchons à valider est que : "l'utilisation des deux ressorts permet de réduire l'erreur d'anticipation par ajustement de leurs raideurs. Au moment du virage, le ressort à l'extérieur de ce dernier a une longueur plus grande que celui à l'intérieur. En augmentant la raideur du ressort externe, on augmente davantage la force produite par ce ressort. Le véhicule est donc plus attiré vers l'extérieur du virage que vers son intérieur. Par conséquent, l'erreur d'anticipation se trouve réduite."

Les ressorts utilisés sont supposés être unidirectionnels : ils influent sur le véhicule suiveur, mais n'ont pas d'influence sur le leader local.

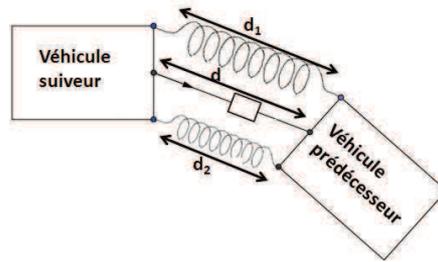


FIGURE 4.2 – Modèle d'interaction.

Le véhicule suiveur utilise le mécanisme d'interaction pour calculer des consignes de vitesse et d'orientation, selon les lois de la physique (ces calculs sont détaillés dans la section 4.3). Pour effectuer ces calculs, le suiveur a besoin de connaître les trois distances d , d_1 et d_2 de la figure 4.2. Ces trois distances sont déduites à partir du mécanisme de perception.

4.2.2 Mécanisme de perception

Le mécanisme de perception permet au véhicule suiveur de percevoir son leader local et de savoir les trois distances, d , d_1 et d_2 de la figure 4.2, dont il a besoin pour calculer ses consignes de vitesse et d'orientation.

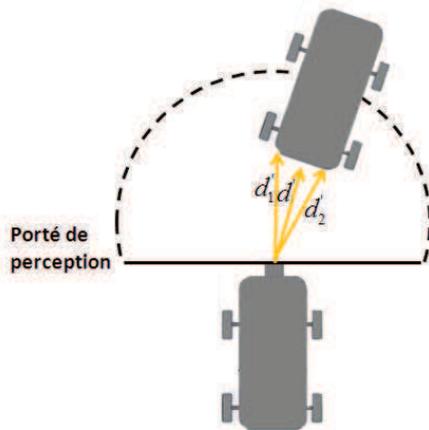


FIGURE 4.3 – Perception du véhicule suiveur.

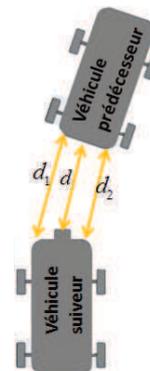


FIGURE 4.4 – Perception et calcul des trois distances.

On suppose que l'on dispose d'un capteur, placé sur le suiveur, capable de mesurer des distances vectorielles avec le leader local. Le mécanisme de perception permet de mesurer les trois distances d' , d'_1 et d'_2 (cf. figure 4.3). A partir de ces trois distances, le véhicule peut calculer les trois distances d , d_1 et d_2 (cf. figure 4.4)

4.2.3 Paramètres du modèle

Les paramètres intervenant dans ce modèle sont :

- m la masse du véhicule.
- L et l , respectivement la longueur et la largeur du véhicule.
- h le coefficient d'amortissement.
- k_1 et k_2 , les raideurs de chacun des deux ressorts. On définit k , la raideur globale qui est équivalente à la somme de deux raideurs k_1 et k_2 ($k = k_1 + k_2$).
- l_0 la longueur des ressorts au repos.
- μ le coefficient de frottement.
- \vec{v} et \vec{a} , respectivement la vitesse et l'accélération du véhicule.

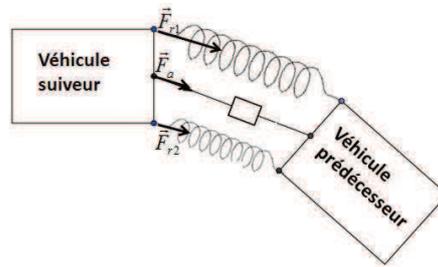


FIGURE 4.5 – Forces d'interaction.

Les forces agissant sur ce modèle (cf. figure 4.5) sont les suivantes :

- La force de chacun des deux ressorts : $\vec{F}_{r_i} = k_i \vec{X}_i$ où $i \in \{1, 2\}$, et $\|\vec{X}_i\| = d_i - l_0$.
- La force de l'amortisseur : $\vec{F}_a = h \vec{v}$.
- La force de frottement : $\vec{F}_f = -\mu R_n \frac{\vec{v}}{v}$, avec $R_n = m g$, μ est le coefficient de frottement et g est l'accélération de pesanteur. Lorsque $v \neq 0$, $f_f = \epsilon \mu m g$, avec $\epsilon = -1$ si $v > 0$ et $\epsilon = +1$ si $v < 0$.

4.3 Calcul des paramètres

Cette section expose la démarche suivie pour calculer les différents paramètres du modèle d'interaction en fonction des caractéristiques d'un véhicule donné. Les paramètres à calculer sont les trois raideurs k , k_1 et k_2 et le coefficient d'amortissement h .

Dans ce qui suit, \vec{X}_1 et \vec{X}_2 représentent respectivement les élongations du premier et du deuxième ressorts ($\|\vec{X}_1\| = d_1 - l_0$ et $\|\vec{X}_2\| = d_2 - l_0$). $\dot{\vec{X}}$ représente la différence instantanée de vitesse entre deux véhicules suiveurs et $\ddot{\vec{X}}$ représente la différence instantanée d'accélération entre deux véhicules qui se suivent.

4.3.1 Calcul de la raideur globale

La constante k représente la raideur globale ($k = k_1 + k_2$). Pour calculer la valeur de cette raideur, on se place dans le cas d'un mouvement linéaire, où les deux ressorts ont la même raideur $k_1 = k_2 = \frac{k}{2}$. Par conséquent, les ressorts peuvent être remplacés par un seul, situé au même endroit que l'amortisseur, et ayant une raideur k . C'est à dire, que le système de deux ressorts est remplacé par un modèle équivalent à un seul ressort et un amortisseur, comme le montre la figure 4.6.

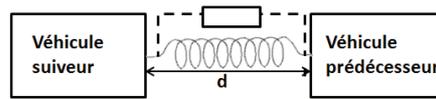


FIGURE 4.6 – Forces d'interaction avec un seul ressort.

Dans ce cas, la relation fondamentale de la dynamique peut être écrite de la manière suivante :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -K\vec{X} - h\vec{v} + \vec{f}_f \quad (4.1)$$

avec $\|\vec{X}\| = d - l_0$, et d est la longueur du ressort équivalent. La force de frottement \vec{f}_f est constante. Avant le démarrage du véhicule (à $\vec{v} = \vec{0}$) on a :

$$\vec{0} = -k\vec{X} + \vec{f}_f \quad (4.2)$$

En fait, le véhicule ne démarre pas tant que $k(d - l_0) < \mu m g$. Dans notre cas, nous voulons que le véhicule suiveur démarre lorsque la distance inter-véhicule devient plus grande que la distance souhaitée (cette distance est prédéfinie). Alors, la position d'équilibre où $k(d - l_0) = \mu m g$ est atteinte lorsque la distance inter-véhicule est égale à la distance souhaitée ($d_{souhaite}$), d'où :

$$k = \frac{\mu m g}{d_{souhaite} - l_0} \quad (4.3)$$

4.3.2 Calcul du coefficient d'amortissement

Le deuxième paramètre h du système "masse-ressort" est déduit d'une étude cinématique. Grâce au principe fondamental de la dynamique, nous établissons l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{X} + 2\xi\omega_0\dot{X} + \omega_0^2 X = \frac{\mu}{m} R_n \quad (4.4)$$

avec : $2\xi\omega_0 = \frac{h}{m}$ et $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

En fonction de la valeur du discriminant ($\Delta = \omega_0^2(\xi^2 - 1)$), on en déduit différents cas d'amortissement : critique, périodique et pseudo périodique.

L'amortissement critique a été choisi afin d'obtenir un amortissement rapide, i.e sans dépassement de consigne et non périodique (i.e sans oscillation). L'amortissement critique ($\Delta = 0 \Rightarrow \xi = 1$) permet de déduire une relation entre la raideur globale k et l'amortissement h :

$$\xi = \frac{h}{2\sqrt{k m}} = 1 \quad (4.5)$$

Connaissant le paramètre k , l'amortissement est défini par l'équation suivante :

$$h = 2\sqrt{k m} \quad (4.6)$$

4.3.3 Calcul des deux raideurs k_1 et k_2

L'erreur d'anticipation se réduit par réduction du phénomène de coupure en ligne droite dans les virages. Ce phénomène se diminue, en attirant le véhicule plus vers le côté externe du virage. Pour cela, le ressort à l'extérieur du virage doit exercer une force plus importante que celui à l'intérieur. Par conséquent, les raideurs des deux ressorts doivent changer dynamiquement de valeur au cours du mouvement du convoi.

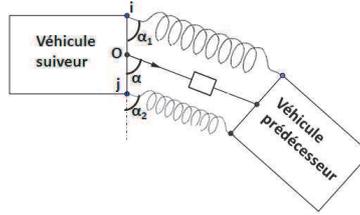


FIGURE 4.7 – Graphe de calcul.

Dans ce qui suit "P" est un point fixe dans le référentiel géocentrique. Les couples (torques) appliqués par chacune des quatre forces du système peuvent être écrits comme suit :

- $\vec{T}_P(\vec{F}_{r1}) = \vec{P}I \wedge \vec{F}_{r1}$
- $\vec{T}_P(\vec{F}_{r2}) = \vec{P}J \wedge \vec{F}_{r2}$
- $\vec{T}_P(\vec{F}_d) = \vec{P}O \wedge \vec{F}_d$
- $\vec{T}_P(\vec{F}_f) = \vec{P}O \wedge \vec{F}_f$

Le moment cinétique du véhicule suiveur en P est :

$$\vec{L}_P(\text{vehicle}) = m\vec{P}O \wedge \vec{V} \quad (4.7)$$

En appliquant le théorème du moment cinétique en P, on obtient :

$$\vec{M}_P = \frac{d\vec{L}_P}{dt} = \frac{d\vec{P}O}{dt} \wedge m\vec{v} + \vec{P}O \wedge m\vec{\gamma} \quad (4.8)$$

$\frac{d\vec{P}\vec{O}}{dt}$ et \vec{v} sont colinéaires, leur produit vectoriel est donc nul. L'équation 4.8 peut s'écrire de la façon suivante :

$$\vec{M}_P = \vec{P}\vec{O} \wedge m\vec{\gamma} = \vec{P}\vec{O} \wedge (\vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r2} + \vec{F}_a + \vec{F}_f) \quad (4.9)$$

D'autre part, le moment résultant est donné par :

$$\vec{M}_P = \Sigma \vec{T}_P = \vec{T}_P(\vec{F}_{r1}) + \vec{T}_P(\vec{F}_{r2}) + \vec{T}_P(\vec{F}_d) + \vec{T}_P(\vec{F}_f) \quad (4.10)$$

Les deux équations, 4.9 et 4.10, permettent de déduire que :

$$k_1\left(\frac{1}{2}\sin\alpha_1\right)\vec{X}_1 - k_2\left(\frac{1}{2}\sin\alpha_2\right)\vec{X}_2 = \vec{0} \quad (4.11)$$

L'équation 4.11 forme, avec l'équation des sommes des raideurs ($k = k_1 + k_2$), un système de deux équations à deux inconnues :

$$\begin{cases} k_1 + k_2 & = k \\ k_1\left(\frac{1}{2}\sin\alpha_1\right)\vec{X}_1 - k_2\left(\frac{1}{2}\sin\alpha_2\right)\vec{X}_2 & = \vec{0} \end{cases} \quad (4.12)$$

Ce dernier nous permet de déduire k_1 et k_2 en fonction de k :

$$\begin{cases} k_1 & = k \frac{(d_2-l_0)\sin\alpha_2}{(d_1-l_0)\sin\alpha_1 + (d_2-l_0)\sin\alpha_2} \\ k_2 & = k \frac{(d_1-l_0)\sin\alpha_1}{(d_1-l_0)\sin\alpha_1 + (d_2-l_0)\sin\alpha_2} \end{cases} \quad (4.13)$$

4.4 Calcul des consignes de vitesse et d'orientation

Le tableau 4.1 récapitule les équations qui calculent les différents paramètres du système. Une fois ces paramètres calculés, le véhicule suiveur peut en déduire ses consignes de vitesse et d'orientation.

Paramètre	valeur
Raideur globale	$\frac{\mu m g}{d_{souhaité} - l_0}$
Coefficient d'amortissement	$2\sqrt{Km}$
Raideur du premier ressort	$k \frac{(d_2-l_0)\sin\alpha_2}{(d_1-l_0)\sin\alpha_1 + (d_2-l_0)\sin\alpha_2}$
Raideur du deuxième ressort	$k \frac{(d_1-l_0)\sin\alpha_1}{(d_1-l_0)\sin\alpha_1 + (d_2-l_0)\sin\alpha_2}$

TABLE 4.1 – Paramètres du modèle d'interaction.

Le véhicule suiveur perçoit son leader local, et n'a aucune information concernant les états des autres véhicules. Les seuls données connues sont : sa vitesse actuelle, et les données déduites de ses perceptions. Le calcul des consignes, se fait dans le référentiel du leader local.

Pour le calcul des consignes, l'étude du régime stationnaire et du régime transitoire sont traités séparément.

4.4.1 Cas du régime stationnaire

Dans un premier temps, nous considérons que le leader local suit un mouvement linéaire uniforme, c'est à dire que son mouvement est toujours rectiligne et avec une vitesse constante. Dans ce cas, le référentiel du leader local est considéré comme Galiléen (inertiel)¹. Le véhicule suiveur calcule son accélération en appliquant directement la deuxième loi de Newton². L'accélération est donc donnée par l'équation suivante :

$$m\vec{a} = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r2} + \vec{F}_a + \vec{F}_f \quad (4.14)$$

La vitesse et l'orientation sont ensuite déduites par deux intégrations successives.

4.4.2 Cas du régime transitoire

Dans le cas où le véhicule leader local suit un mouvement avec des variations de vitesse, et/ou un trajet non linéaire, c'est à dire qu'il suit un régime transitoire, le référentiel qui y est associé n'est plus considéré comme Galiléen. Ce référentiel produit un effet inertiel exprimé par une pseudo force appelée force d'inertie. Cette force influe sur la réaction du véhicule, et doit être prise en compte pour le calcul de la vitesse.

D'après le principe fondamental de la dynamique, un référentiel non Galiléen possède un mouvement d'entraînement par rapport à R_g (le référentiel géocentrique). Par conséquent, le référentiel produit une force appelée force d'inertie, qui exprime le mouvement du référentiel non inertiel dans le référentiel géocentrique. La force inertielle est égale à :

$$\vec{F}_{ie} = -m\vec{a}_e \quad (4.15)$$

Où \vec{a}_e représente l'accélération du référentiel non inertiel dans le référentiel géocentrique.

Pour calculer la force d'entraînement, le véhicule suiveur estime l'accélération de son leader local. Cette estimation se fait de la manière suivante : à chaque itération i , le véhicule sauvegarde la dernière estimation de la vitesse du leader local v_{i-1}^l , ainsi que la dernière inter-distance mesurée (d_{i-1}). Il mesure la nouvelle inter-distance (d_i), en utilisant ses perceptions. La vitesse du leader est ainsi estimée en utilisant ces données et la vitesse actuelle du véhicule v_i^s par la fonction suivante :

$$d_i = d_{i-1} + v_i^l * t - v_i^s * t \Leftrightarrow v_i^l = \frac{1}{t} * (d_i - d_{i-1} + v_i^s * t) \quad (4.16)$$

L'accélération du véhicule leader local est ensuite estimée à partir de v_i^l et v_{i-1}^l . Le véhicule

1. (à partir de la première loi de Newton) Un référentiel Galiléen est un référentiel dans lequel un point matériel isolé a un mouvement rectiligne uniforme

2. Somme des forces est égale à la produit de masse et de l'accélération.

suiveur détermine ensuite son accélération en utilisant la formule suivante :

$$m\vec{a}_{v/R_i} = \vec{F} - \vec{F}_{ie} \text{ avec } \begin{cases} \vec{F} = \sum_i \vec{F}_{i \rightarrow v}, \text{ la somme des forces} \\ \vec{F}_{ie} = -m\vec{a}_e, \text{ la force d'inertie d'entrainement} \end{cases}$$

Les consignes de vitesse et d'orientation sont ensuite déduites par des intégrations.

4.5 Etude de stabilité

L'étude de stabilité est faite selon deux critères. Le premier vérifie qu'en absence de toutes perturbations extérieures, le système converge vers un état stable. Le second vérifie qu'une perturbation affectant un composant du système, ne s'amplifie pas en se propageant vers les autres composants. La première preuve suit une approche d'inspiration physique tandis que la seconde adopte une approche inspiré de l'automatique.

4.5.1 Stabilité de Lyapunov

Un train de véhicules est modélisé comme un système physique. Pour cela, chaque véhicule est considéré comme une particule de masse m soumise à plusieurs forces. Dans notre cas, chaque véhicule est soumis aux forces du système "masse ressort" qui le sépare du véhicule précédent. Il est important de rappeler que dans notre approche, les ressorts utilisés sont unidirectionnels, et le véhicule est influencé uniquement par le système "masse ressort" qui l'attache à son prédécesseur.

La preuve de stabilité d'un système de particules soumis à plusieurs forces peut être effectuée à partir d'une étude énergétique. L'énergie d'un système est une grandeur représentant l'état du système global. Ainsi, L'étude des variations de l'énergie permet de mesurer l'état d'équilibre du système.

Pour chaque véhicule, l'énergie peut être définie comme la somme des énergies potentielle et cinétique :

$$E = E_p + E_c \quad (4.17)$$

avec,

$$\begin{cases} E_p &= \frac{1}{2}k_1(\vec{X}_1\vec{X}_1) + \frac{1}{2}k_2(\vec{X}_2\vec{X}_2) \\ E_c &= \frac{1}{2}m(\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}}) \end{cases}$$

Le théorème de *Lyapunov* [Lya92, Hor87] établit que le système est stable si les conditions suivantes sont respectées, avec $A(x, y) = E = E_p + E_c$:

$$\begin{cases} A(x, y) &\geq 0 \\ \dot{A}(x, y) &< 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Dans notre cas, la première condition est respectée puisque $\|\vec{X}_1\|^2 \geq 0$, $\|\vec{X}_2\|^2 \geq 0$, et $\|\dot{\vec{X}}\|^2 \geq 0$.

Pour vérifier la deuxième condition, nous allons distinguer le cas de mouvement linéaire et le cas de mouvement non linéaire.

Cas du mouvement linéaire :

Dans ce cas, les deux ressorts peuvent être remplacés par un seul ayant une raideur k , et une élongation \vec{X} . L'énergie potentielle peut être écrite $E_p = \frac{1}{2}k(\vec{X}\vec{X})$.

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2}k(\vec{X}\vec{X}) + \frac{1}{2}m(\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}}) \quad (4.19)$$

et

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \dot{x}} \frac{\partial \dot{x}}{\partial t} = k\vec{X}\dot{\vec{X}} + m\dot{\vec{X}}\ddot{\vec{X}} \quad (4.20)$$

D'après la deuxième loi de Newton :

$$m\ddot{\vec{X}} = -k\vec{X} - h\dot{\vec{X}} + \epsilon\mu R_n \quad (4.21)$$

En remplaçant $m\ddot{\vec{X}}$ dans 4.20, on obtient :

$$\frac{dE}{dt} = -h\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}} + \epsilon\mu R_n\dot{\vec{X}} \quad (4.22)$$

- Si $\dot{\vec{X}} > 0$, alors $\epsilon = -1$, et par conséquent $\frac{dE}{dt} < 0$
- Si $\dot{\vec{X}} < 0$, alors $\epsilon = 1$, et par conséquent $\frac{dE}{dt} < 0$

Cette étude permet de vérifier que $\frac{dE}{dt}$ est toujours négatif dans les circulations linéaires du convoi, ce qui nous autorise à affirmer que le système tend vers un état stable lorsque le système évolue sans perturbation externe.

Cas du mouvement non linéaire :

Dans ce cas, l'énergie est écrite sous la forme suivante :

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2}k_1(\vec{X}_1\vec{X}_1) + \frac{1}{2}k_2(\vec{X}_2\vec{X}_2) + \frac{1}{2}m(\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}}) \quad (4.23)$$

Dans ce qui suit, nous supposons que les deux ressorts et l'amortisseur sont tous parallèles. Les trois angles α , α_1 et α_2 de la figure 4.7 sont tous égaux. On peut déduire alors que $X_1 = X - l\sin\alpha$ et $X_2 = X + l\sin\alpha$ (ou $X_1 = X + l\sin\alpha$ et $X_2 = X - l\sin\alpha$, selon le sens du virage), avec l la largeur du véhicule. De plus, les équations de k_1 et k_2 peuvent être réduites et elles deviennent : $k_1 = \frac{K}{2} \frac{X - l\sin\alpha}{X}$ et $k_2 = \frac{K}{2} \frac{X + l\sin\alpha}{X}$ (ou l'inverse selon le sens de virage). Remplaçant X_1 , X_2 , k_1 et k_2 par leurs valeurs, on obtient :

$$E = \frac{1}{2}k(\vec{X}\vec{X}) + \frac{1}{2}m(\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}}) - \frac{1}{2}kl^2\sin^2\alpha \quad (4.24)$$

et par conséquent :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \dot{x}} \frac{\partial \dot{x}}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = K\vec{X}\dot{\vec{X}} + m\dot{\vec{X}}\ddot{\vec{X}} - kl^2\sin\alpha\cos\alpha\frac{\partial\alpha}{\partial t} \quad (4.25)$$

En fait α correspond à l'angle de braquage du véhicule. Le véhicule tourne avec un angle α et avec une vitesse de rotation de : $\frac{\partial\alpha}{\partial t} = \frac{\vec{v}}{R_c}$, avec R_c = rayon de courbure = $\frac{X}{2\sin\alpha}$.

En remplaçant $m\ddot{\vec{X}}$ par sa valeur dans 4.25, on obtient :

$$\frac{dE}{dt} = -h\dot{\vec{X}}\dot{\vec{X}} + \epsilon\mu R_n\dot{\vec{X}} + \frac{K}{X}l^2\sin^2\alpha(1 - 2\cos\alpha)\dot{\vec{X}} \quad (4.26)$$

Pour un angle de braquage maximal de 30° (angle de braquage maximal des voitures utilisées dans les expérimentations), α varie entre $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, et par suite $0 \leq \cos\alpha \leq 0.5$, donc $(1 - 2\cos\alpha) \geq 0$

- Si $\dot{\vec{X}} < 0$, alors $\epsilon = 1$, et par conséquent $\frac{dE}{dt} < 0$.
- Si $\dot{\vec{X}} > 0$, alors $\epsilon = -1$, pour démontrer que $\frac{dE}{dt} < 0$ nous devons montrer que :

$$-\mu R_n\dot{x} + \frac{K}{X}l^2\sin\alpha(1 - 2\cos\alpha)\dot{x} < 0 \quad (4.27)$$

En fait, si cette équation est vraie alors :

$$\frac{K}{X}l^2\sin\alpha(1 - 2\cos\alpha)\dot{x} < \mu R_n\dot{x} \quad (4.28)$$

donc :

$$\frac{\mu R_n}{X_0 \cdot X}l^2\sin\alpha(1 - 2\cos\alpha) < \mu R_n \quad (4.29)$$

avec $X_0 = d_{souhaitee} - l_0$

alors :

$$\frac{l^2}{X_0 \cdot X}\sin\alpha(1 - 2\cos\alpha) < 1 \quad (4.30)$$

Or cette dernière équation est vraie, car $(1 - 2\cos\alpha) < 1$ et $\sin\alpha < 1$. En plus, $\dot{X} > 0$, donc $X > X_0$ et par suite $\frac{l^2}{X_0 \cdot X} < \frac{l^2}{X_0 \cdot X_0}$ donc pour que $\frac{l^2}{X_0 \cdot X}$ soit plus petit que 1, il suffit de choisir un $X_0 > l$ ($d_{souhaitee} > l + l_0$). Alors, on peut déduire que $\frac{l^2}{X_0 \cdot X}\sin\alpha(1 - 2\cos\alpha) < 1$, et par conséquent $\frac{dE}{dt} < 0$.

Cette étude nous a permis de vérifier que $\frac{dE}{dt} < 0$. Cette équation est vérifiée pour les cas où l'inter-distance souhaitée est plus grande que $l + l_0$ (la somme de la largeur du véhicule et de la distance à vide du ressort). On peut donc conclure que le système tend vers un état stable lorsque le système évolue sans perturbation externe.

4.5.2 String stability

La preuve de stabilité d'un train de véhicules reliés par des systèmes masse-amortisseur-ressort revient à un problème classique en automatique appelé *String stability*. Le problème de String stability étudié par Garrard et Caudill dans [GC77] mesure l'évolution d'un système composé d'entités reliées par des ressorts.

La stabilité au sens automatique se définit par : *sans aucune excitation extérieure au système, l'amplitude de l'erreur décroît en se propageant le long de train*. La preuve, que nous étudions, est appliquée sur l'erreur longitudinale, dans les cas des mouvements rectilignes. L'erreur est définie comme étant la différence entre la distance longitudinale nominale et la distance longitudinale mesurée (cf. figure 4.8).

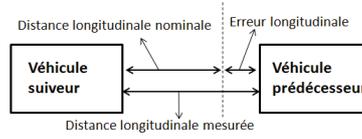


FIGURE 4.8 – Erreur longitudinale.

Une façon d'étudier la string stability, c'est à dire, voir comment l'erreur(ϵ) se propage dans le train, est de considérer une fonction de transfert $G_i(s)$, qui lie l'erreur du i^{eme} véhicule à l'erreur de son prédécesseur :

$$G_i(s) = \frac{\epsilon_i(s)}{\epsilon_{i-1}(s)} \quad (4.31)$$

où s représente la variable de Laplace.

La stabilité de convoi est atteinte si la fonction de transfert est inférieure ou égale à 1, pour toute pulsation w [yLP99, GH99] :

$$G_i(jw) = \left| \frac{\epsilon_i(jw)}{\epsilon_{i-1}(jw)} \right| < 1, \forall w > 0 \quad (4.32)$$

Selon Eyre dans [EYK97], la fonction de transfert de notre modèle peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{\epsilon_i(jw)}{\epsilon_{i-1}(jw)} = \frac{\frac{h}{m}jw + \frac{k}{m}}{-w^2 + \frac{h}{m}jw + \frac{k}{m}} = \begin{cases} = 1, & \text{si } w = 0 \\ < 1, & \text{si } w^2 > \frac{2k}{m} \\ \geq 1, & \text{autrement} \end{cases} \quad (4.33)$$

L'équation 4.33 montre que la stabilité du système est atteinte pour des pulsations au-dessous de $\sqrt{\frac{2k}{m}}$. On peut conclure que, pour avoir un système stable, la fréquence d'opération du contrôleur doit être plus grande que $\frac{\sqrt{2k/m}}{2\pi}$.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté notre approche pour la prise de décision dans un convoi de véhicules. L'approche est totalement décentralisée avec une perception locale. Chaque véhicule calcule ses propres consignes de vitesse et d'orientation, en se basant uniquement sur ses perceptions et en utilisant un mécanisme d'interaction virtuel inspiré de la physique. Les résultats des simulations et des expérimentations des convois utilisant l'approche proposée, sont exposés dans le chapitre 10 .

Le chapitre suivant propose une adaptation de ce modèle d'interaction sur d'autres types de formations, notamment sur les formations échelon et ligne.

Chapitre 5

Généralisation aux configurations échelon et ligne

5.1 Introduction

L'utilisation d'un convoi de véhicules autonomes ne se limite pas aux milieux urbains. [BA97] étudie les convois dans les domaines militaires. [TB08] étudie les convois dans les domaines agricoles. Dans ces domaines, les convois étudiés ne sont pas forcément en configuration colonne. Au contraire, dans les domaines militaires, une configuration quelconque augmente la sécurité des gens et des matériels. De même, en milieu agricole, un convoi avec une configuration ligne réduit significativement le temps de labour.

Dans ce chapitre, nous étudions la possibilité d'utiliser le modèle d'interaction, défini dans le chapitre 4, avec des configurations autre que la "colonne". Nous étudions, en particulier, les deux configurations : échelon et ligne.

Deux approches sont proposées pour le contrôle en multi-configurations. La première étudie la possibilité d'utiliser le même modèle d'interaction de "deux ressorts et un amortisseur", en changeant les points d'attache des ressorts [EZCGK12]. Dans la deuxième approche, le principe est d'appliquer le même algorithme développé pour la configuration colonne, en utilisant un véhicule virtuel, qui est une image du véhicule leader local. Le véhicule virtuel forme alors une configuration colonne avec le véhicule suiveur [EZDGC12].

5.2 Décomposition en configurations élémentaires

Dans les configurations colonne et échelon, le leader local d'un véhicule est son prédécesseur dans le convoi. Dans une configuration ligne, le leader local est le véhicule placé directement à droite ou directement à gauche. Dans les figures 5.1(a), 5.1(b) et 5.1(c), chaque véhicule suiveur i a comme leader local le véhicule $i - 1$.

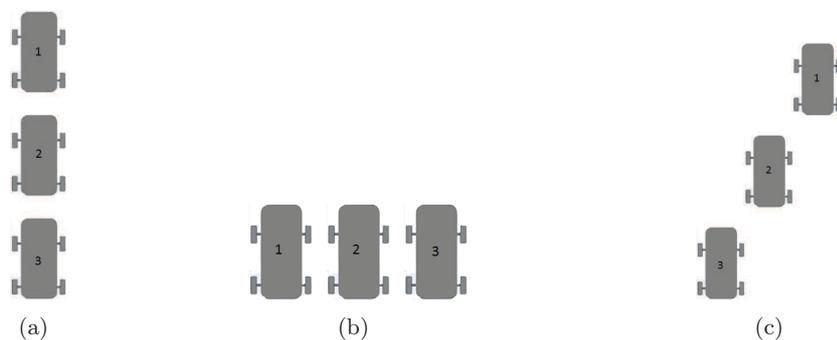


FIGURE 5.1 – Les trois configurations usuelles : Colonne (a), Ligne (b) et Echelon (c).

Les trois configurations : colonne, échelon et ligne sont considérées comme des configurations élémentaires. Toute autre configuration possible est en fait la composition de deux ou plusieurs de ces trois configurations. Une configuration diamant formée de quatre véhicules, peut être décomposée, soit en trois convois échelons de deux véhicules chacun (cf. figure 5.2(a)), soit en deux convois échelons et un convoi colonne, de deux véhicules chacun (cf. figure 5.2(b)).

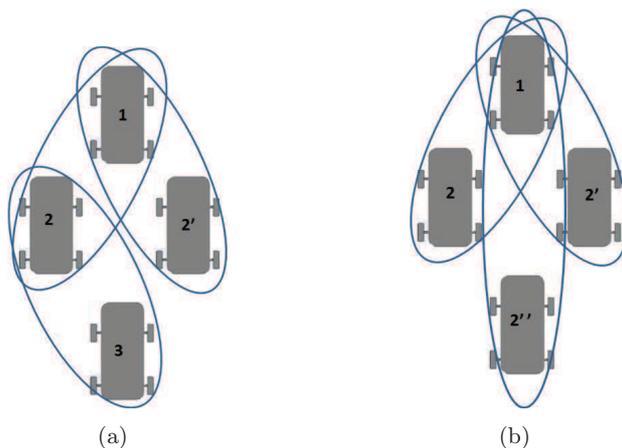


FIGURE 5.2 – Configuration diamant composée en trois convois échelons(a) ou en deux convois échelon et un convoi colonne(b).

5.3 Approche par changement des points d'attache

Dans le chapitre 4, nous avons montré un modèle d'interaction composé de deux ressorts et d'un amortisseur, utilisé pour la configuration colonne. L'objectif maintenant est d'appliquer ce même modèle à les configurations échelon et ligne, tout en changeant les points d'attache des ressorts et de l'amortisseur afin de conserver la configuration désirée.

Les avantages de cette approche sont :

- L'utilisation des deux ressorts avec des raideurs variables et différentes rend le système plus flexible.
- La conservation de la configuration se fait par ajustement des valeurs des raideurs des ressorts.
- Le modèle de deux ressorts est déjà utilisé pour les configurations colonnes. L'utilisation du même modèle d'interaction pour plusieurs configurations facilite la tâche de transition entre ces configurations. Pour passer d'une configuration à une autre, il suffit de changer les points d'attache des ressorts.

5.3.1 Application sur la configuration échelon

Le choix des points d'accrochage des deux ressorts, dans les configurations colonnes et lignes, semble être évident. Or, ce n'est pas le cas pour les configurations échelons. Pour ce type de configuration, nous allons étudier et comparer plusieurs possibilités d'attache des ressorts, afin de déduire la façon d'accrochage la plus adéquate.

Pour la configuration échelon, trois possibilités d'attache sont considérées. Ces possibilités sont étudiées et comparées, pour déduire la façon la plus efficace : celle qui donne les meilleurs résultats. Le tableau 5.1 montre ces trois possibilités.

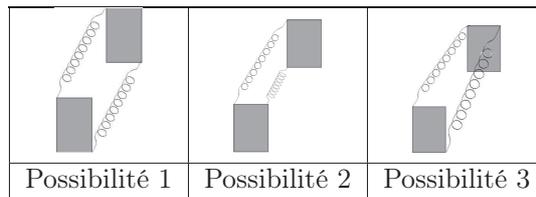


TABLE 5.1 – Trois possibilités d'accrochage du modèle d'interaction pour une configuration échelon.

Calcul des paramètres

Comme dans la configuration colonne, le véhicule suiveur utilise le modèle d'interaction pour calculer les consignes de vitesse et d'orientation. Les paramètres (k_1 , k_2 et h) du modèle doivent aussi être calculés. Le calcul est fait en utilisant la même méthode utilisée pour les configurations colonnes (cf paragraphe 4.3).

Dans les configurations colonnes, l'écart longitudinal souhaité et les longueurs souhaitées pour les deux ressorts sont égaux. Or, ce n'est pas le cas pour les configurations échelons. Comme le montre la figure 5.3, les longueurs souhaitées pour chacun des deux ressorts ne sont pas égales. Ces deux longueurs sont aussi différentes de l'écart longitudinal souhaité. Dans ce qui suit, $d_1^{souhaite}$ et $d_2^{souhaite}$ représentent les longueurs souhaitées pour le premier et deuxième

ressort. l_1^0 et l_2^0 représentent les longueurs à vide de chacun des deux ressorts.

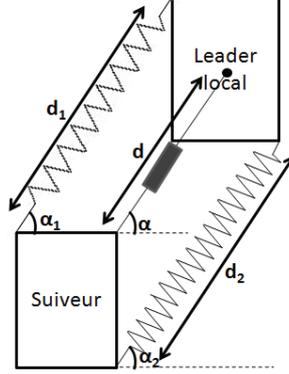


FIGURE 5.3 – Graphe de calcul.

L'équation 4.3 se réduit de la façon suivante :

$$k_1 (d_1^{souhaite} - l_1^0) + k_2 (d_2^{souhaite} - l_2^0) = \mu m g \quad (5.1)$$

Le système de deux équations 4.12 est donc remplacé par le système suivant :

$$\begin{cases} k_1 (d_1^{souhaite} - l_1^0) + k_2 (d_2^{souhaite} - l_2^0) = \mu m g \\ k_1 (\frac{1}{2} \sin \alpha_1) \vec{X}_1 - k_2 (\frac{1}{2} \sin \alpha_2) \vec{X}_2 = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Le système 5.2 permet de déterminer les équations calculant de k_1 et k_2 :

$$\begin{cases} k_1 = \mu m g \frac{(d_2 - l_2^0) \sin \alpha_2}{(d_2^{souhaite} - l_2^0)(d_1 - l_1^0) \sin \alpha_1 + (d_1^{souhaite} - l_1^0)(d_2 - l_2^0) \sin \alpha_2} \\ k_2 = \mu m g \frac{(d_1 - l_1^0) \sin \alpha_1}{(d_2^{souhaite} - l_2^0)(d_1 - l_1^0) \sin \alpha_1 + (d_1^{souhaite} - l_1^0)(d_2 - l_2^0) \sin \alpha_2} \end{cases} \quad (5.3)$$

Pour calculer la valeur du coefficient d'amortissement, le même raisonnement suivi dans le paragraphe 4.3.2 est utilisé. Le valeur de h est exprimée par l'équation suivante :

$$h = 2\sqrt{(k_1 + k_2)m} \quad (5.4)$$

Maintenant que les paramètres sont tous connus, le véhicule suiveur peut calculer son accélération en utilisant le principe fondamental de la dynamique :

$$m \vec{a}_{v/R_l} = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r2} + \vec{F}_a + \vec{F}_f - \vec{F}_{ie} \quad (5.5)$$

avec, \vec{a}_{v/R_l} l'accélération du véhicule suiveur dans le référentiel de son leader local, et \vec{F}_{ie} est la force d'inertie produite par le référentiel non inertiel du leader local. Les commandes de vitesse et d'orientation sont ensuite déduites par des intégrations.

Choix des points d'attache

Pour savoir laquelle parmi les trois façons d'attache possibles est la plus convenable pour une configuration échelon, des tests qui permettent d'évaluer la qualité du convoi sont faits. Deux tests en particulier sont réalisés : le premier évalue l'écart latéral au cours de temps et le deuxième évalue l'écart longitudinal. Les résultats de ces tests ainsi qu'une comparaison entre les trois possibilités d'attache seront dressés dans le chapitre 10.

5.3.2 Application pour la configuration ligne

Pour les configurations lignes, les véhicules sont placés l'un à côté de l'autre. Le premier ressort du modèle d'interaction relie l'extrémité gauche (droite) de l'essieu avant du véhicule suiveur à l'extrémité droite (gauche) de l'essieu avant de son leader local. Le deuxième ressort relie l'extrémité gauche (droite) de l'essieu arrière du véhicule suiveur à l'extrémité droite (gauche) de l'essieu arrière de son leader local. La figure 5.4 montre le modèle d'interaction dans une configuration ligne.

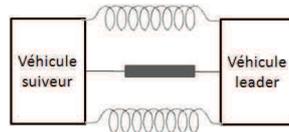


FIGURE 5.4 – Points d'attache dans une configuration ligne.

Calcul des paramètres

Pour calculer les paramètres du modèle (k , k_1 , k_2 et h), le même raisonnement suivi pour le calcul des paramètres en configuration colonne est utilisé. La valeur de raideur globale k est exprimée en fonction de l'écart latéral souhaité. L'équation calculant la valeur de k est donc :

$$k = \frac{\mu m g}{d_{\text{ecart lateral souhaité}} - l_0} \quad (5.6)$$

Les deux raideurs k_1 et k_2 ainsi que le coefficient d'amortissement h sont calculés avec les mêmes équations que dans les cas colonnes. L'accélération est calculée en utilisant le principe fondamental de la dynamique, décrit dans le paragraphe 4.4. Les consignes de vitesse et d'orientation sont ensuite déduites par intégrations.

Problématique de la configuration ligne

La configuration ligne est la configuration la plus délicate à paramétrer avec le modèle d'interaction proposé. Une évolution correcte d'un convoi en ligne consiste à *garder un écart longitudinal nul et un écart latéral égal à une distance souhaitée*. La différence entre une configuration colonne et une configuration ligne est que : dans une configuration colonne, le

modèle d'interaction attire le véhicule suiveur dans le sens du déplacement de convoi. Or, ce n'est pas le cas dans une configuration ligne, où le modèle d'interaction engendre une force normale à la direction du convoi.

Le véhicule suiveur agit en fonction de ses perceptions seulement. Les positions successives du leader local lui sont transmises avec une fréquence précise. Par conséquent, un délai de réaction apparaît. Ce délai se manifeste par un écart longitudinal non nul présent au cours de l'évolution du convoi. Cet écart peut diminuer en augmentant la raideur des ressorts, mais ne peut pas être éliminé. Le problème se résume à un manque d'anticipation de la trajectoire décrite par le leader local. Le modèle d'interaction tout seul est incapable de mener un convoi en ligne avec les résultats désirés.

Ce problème peut être compensé en utilisant un système de prédiction, comme un filtre de Kalman, qui permet d'estimer l'état courant d'un système en fonction de son état précédent et des mesures actuelles. Une telle prédiction permet au véhicule suiveur d'anticiper la future position de son leader local.

5.4 L'approche par véhicule virtuel

Le principe de cette approche est d'appliquer exactement, sans modifications, l'algorithme de conduite en convoi pour les configurations colonnes, sur d'autres configurations. Pour le faire, un véhicule virtuel est créé. Ce dernier est une image du véhicule leader local translaté pour former une configuration colonne. Une fois que la configuration colonne est formée, le véhicule suiveur et le véhicule virtuel seront reliés par le modèle d'interaction des deux ressorts. Le véhicule suiveur calcule ensuite les consignes de vitesse et d'orientation en appliquant l'algorithme pour les configurations colonnes.

La position du véhicule leader virtuel est calculée en utilisant l'équation 5.7 :

$$\begin{cases} x' = x + T_x \\ y' = y + T_y \end{cases} \quad (5.7)$$

où le vecteur (x, y) représente la position du leader local, (x', y') la position du leader virtuel et T_x et T_y sont respectivement les translations latérale (sur l'axe x) et longitudinale (sur l'axe y) qui doivent être appliquées pour obtenir la position du véhicule virtuel.

Le paramètre T_x est égale à l'opposé de la valeur de l'écart latéral de la configuration en question. Si l'écart longitudinal de la configuration est > 0 , alors $T_y = 0$, si non $T_y = \textit{inter - distance souhaitée}$. Le tableau 5.2 montre l'application du principe du véhicule virtuel sur les trois configurations : échelon, ligne et colonne.

Configuration	Perception du leader local	Définition du leader virtuel	Installation du modèle d'interaction	Translation latérale	Translation longitudinale
Echelon				-Ecart latéral	0
Ligne				-Ecart latéral	Inter-distance souhaitée
Colonne				0	0

TABLE 5.2 – Utilisation du principe de véhicule virtuel avec les configurations échelon, ligne et colonne.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté deux approches pour le contrôle des convois de véhicules en multi-configurations. Dans ces deux approches, le même modèle d'interaction à deux ressorts, présenté dans le chapitre 4 est utilisé. Dans la première approche, la configuration est maintenue grâce au changement des points d'attache des deux ressorts. Dans la deuxième approche, le véhicule suiveur est attaché à un véhicule virtuel. Ce dernier est une image du véhicule leader local, placé devant le suiveur pour former une configuration colonne avec lui.

La configuration ligne des convois de véhicules est considérée comme la plus délicate. Un convoi en ligne, utilisant une approche locale, nécessite un modèle de prédiction permettant d'anticiper les mouvements du leader local.

Des simulations qui permettent d'évaluer des convois en configurations échelon et ligne sont présentées dans le chapitre 10.

Deuxième partie

Vérification de la sûreté des convois de véhicules

"All our reasoning is nothing but the joining and substituting of characters, whether these characters be words or symbols or pictures, ... if we could find characters or signs appropriate for expressing all our thoughts as definitely and as exactly as arithmetic expresses numbers or geometric analysis expresses lines, we could in all subjects, in so far as they are amenable to reasoning, accomplish what is done in Arithmetic and Geometry."

Leibniz (1677)

Chapitre 6

La vérification

6.1 Introduction

La conduite en convoi fait partie du domaine des applications embarquées distribuées sujettes à des propriétés de sûreté. Idéalement, ces applications doivent faire l'objet d'une certification : on doit pouvoir garantir que les propriétés de sûreté (du moins celles considérées critiques) sont satisfaites. L'une des approches de certification les plus utilisées est celle basée sur la vérification. Cette dernière consiste à établir, avec la force d'une preuve mathématique, qu'un système S satisfait une ou plusieurs propriétés P . La vérification s'appuie sur un ensemble de formalismes, d'outils et de méthodes.

En général, les environnements de vérification incluent un langage pour construire un modèle formel des systèmes à vérifier, un langage fondé sur la logique, pour l'expression des propriétés et un ou plusieurs outils de vérification. Les recherches dans le domaine de la vérification ont fait des progrès énormes au cours des dernières années. Un certain nombre d'outils et de méthodes sont arrivés à maturité. Malgré les progrès effectués, la vérification reste une activité à coût calculatoire élevé, soumise à des contraintes liées à la complexité des modèles vérifiés. Ce constat a conduit au développement de méthodes de vérification permettant de maîtriser la complexité des modèles.

L'un des objectifs de cette thèse est d'explorer, en utilisant les outils de vérification disponibles, les conditions dans lesquelles la conduite en convoi peut satisfaire un ensemble de propriétés de sûreté.

Ce chapitre est voué à la présentation des principaux aspects conceptuels relatifs à la vérification : paradigmes et langages de modélisation, langages pour l'expression des propriétés, outils et des méthodes de vérification. Un état de l'art sur les outils et méthodes de vérification permet ensuite de justifier les choix effectués pour la vérification de propriétés de sûreté relatives à la conduite en convoi.

6.2 Les systèmes formels : un cadre pour la vérification

Les approches formelles en génie logiciel se basent sur la construction d'un modèle formel de l'application à développer. Le modèle est dit formel lorsqu'il est construit à l'aide d'un formalisme dont toutes les primitives ont été définies avec rigueur mathématique. En général, les modèles construits à l'aide de ces formalismes prennent la forme d'un système formel, tel qu'il sera défini dans la suite de cette section. Les modèles d'une application sous la forme d'un système formel sont, précisément, les types de modèles adaptés à l'intégration d'une étape de vérification dans le processus de conception.

Tout système formel comprend trois éléments de base $(\mathcal{L}, \mathcal{S}, f_s)$, où \mathcal{L} est un langage, défini en donnant sa syntaxe et utilisé pour construire des modèles formels de spécification. \mathcal{S} est un domaine sémantique, une structure mathématique constituée d'ensembles, fonctions, relations, opérateurs, ... La fonction f_s , dite fonction sémantique, établit une correspondance entre une entité syntaxique et une entité sémantique. Si la syntaxe de \mathcal{L} est définie par induction, on peut définir f_s de façon inductive.

Aux trois éléments de base, on ajoute une quatrième composante, \mathcal{T} , qui est une théorie du premier ordre (TPO), définie sur les entités du domaine sémantique, éventuellement augmentée d'autres domaines, si nécessaire. Une TPO est une structure de la logique formelle, qui comprend un ensemble de prédicats qui s'appliquent aux entités du domaine sémantique et un langage d'expressions logiques, défini à partir des prédicats, à l'aide d'opérateurs logiques classiques et/ou modaux. La TPO peut inclure également un système de déduction, constitué d'un ensemble d'axiomes et d'un ensemble de règles de déduction. Le rôle de la TPO est d'exprimer des propriétés relatives aux entités sémantiques. La présence d'un système de déduction introduit la possibilité de prouver les dites propriétés, relativement à des entités sémantiques. Il est à signaler que pour certains systèmes formels, le domaine sémantique et la TPO se confondent. C'est le cas des formalismes basés sur la logique du premier ordre et la théorie des ensembles.

La TPO \mathcal{T} associée à un système formel $(\mathcal{L}, \mathcal{S}, f_s)$ permet de formuler des propriétés relatives aux entités sémantiques. Une formule logique P peut être évaluée à partir d'une entité sémantique σ : cette dernière fournit des valeurs aux variables libres de P . La façon dont σ fournit des valeurs permettant d'évaluer la formule P , dépend de la nature de l'entité sémantique.

Prenons l'exemple des automates à états. Le langage est graphique et permet de construire des modèles comme celui de la figure 6.1. Il s'agit d'un système composé de deux automates : un compteur modulo 4 et un contrôleur.

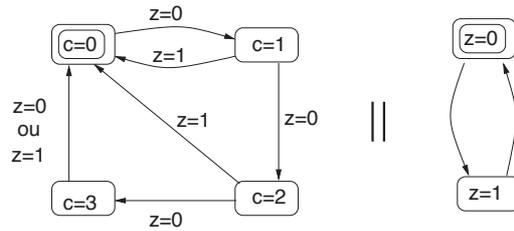


FIGURE 6.1 – Un modèle basé sur les automates.

Suivant l'état du contrôleur, le compteur est remis à zéro (si $z = 1$), ou bien compte modulo 4 (si $z = 0$). L'état global du système est un couple (c, z) constitué de l'état de chaque automate, lequel est donné par la valeur de sa variable d'état. Une entité sémantique peut être, par exemple, une suite infinie d'états globaux successifs que le système peut assumer. Une telle suite est appelée une chaîne. Ce domaine sémantique est adapté à la description du comportement du système : chaque chaîne en décrit une évolution possible. La figure 6.2 représente, sous forme d'un arbre enraciné à l'état global initial, toutes les chaînes possibles du système.

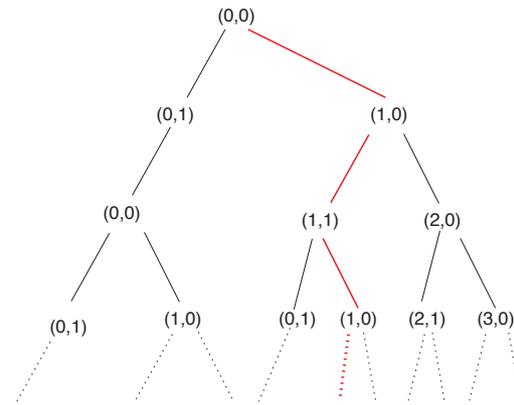


FIGURE 6.2 – Les chaînes du système compteur-contrôleur

La fonction sémantique pour le langage des automates pourrait prendre la forme d'un algorithme capable d'animer un automate, c'est à dire de simuler son fonctionnement pour produire l'une des chaînes de son comportement. Des lors que nous nous intéressons à un domaine sémantique qui décrit le comportement du système, la logique du premier ordre (LPO) que nous serions tentés d'adjoindre à notre système formel pourrait être la logique temporelle linéaire LTL¹. En effet, cette logique est adaptée à l'expression de propriétés relatives aux chaînes d'états d'un système d'automates. Ainsi par exemple, la propriété "aussi longtemps que $z = 0$ on peut tôt ou tard avoir $c = 3$ " s'écrit en LTL : $(z = 0) \mathcal{U} (c = 3)$, où \mathcal{U} dénote l'opérateur

1. Pour simplifier cette présentation, nous nous limitons ici aux opérateurs de la logique temporelle linéaire, laissant de côté les formules de la logique temporelle arborescente.

LTL "jusqu'à ". La propriété "si à partir d'un moment z reste toujours égale à 1, alors c prendra tôt ou tard la valeur 0 et y restera" s'écrit $\Box(\Box(z = 1) \Rightarrow \Diamond\Box(c = 0))$, où \Box dénote l'opérateur temporel "nécessairement" et \Diamond dénote l'opérateur temporel "éventuellement".

Au sein de la LTL nous pouvons distinguer les formules d'état, qui ne contiennent que des opérateurs logiques classiques ($\neg, \wedge, \vee, \Rightarrow, \dots$) et les formules temporelles qui contiennent des opérateurs temporels ($\Box, \Diamond, \bigcirc, \mathcal{U}, \dots$). Les formules d'état peuvent être évaluées dans les états globaux du système. Par exemple, la formule d'état $(z = 0) \wedge (c > 1)$ s'évalue à *vrai* dans les états $(2, 0)$ et $(3, 0)$ et à *faux* dans les autres. Les formules temporelles peuvent être évaluées par des chaînes que le modèle peut produire. Par exemple, la formule $(z = 0) \mathcal{U} (c = 3)$ s'évalue à *vrai* par la chaîne $(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), \dots$. Lorsque la formule d'état F s'évalue à *vrai* dans l'état s on dit que s satisfait F et on note $s \models F$. Lorsque la formule temporelle P s'évalue à *vrai* par la chaîne σ on dit que σ satisfait P et on note $\sigma \models P$.

Nous avons dit plus haut que dans beaucoup de cas, le langage formel \mathcal{L} s'intègre dans le langage de la TPO adoptée. C'est à dire que le modèle du système s'écrit comme un ensemble de formules logiques. C'est le cas des systèmes de transition. On peut dire que les systèmes de transitions constituent une notation logique des modèles basés sur les automates. Il s'agit donc de descriptions de l'aspect comportement. Si nous revenons à l'exemple du système compteur-contrôleur, la notation logique (système de transitions) est la suivante :

– état initial :

$$(c = 0) \wedge (z = 0). \quad (6.1)$$

– transitions :

$$(z = 0) \wedge (c < 3) \wedge (c' = c + 1) \quad (6.2)$$

$$(z = 0) \wedge (c = 3) \wedge (c' = 0) \quad (6.3)$$

$$(z = 1) \wedge (c' = 0) \quad (6.4)$$

$$(z = 0) \wedge (z' = 1) \quad (6.5)$$

$$(z = 1) \wedge (z' = 0) \quad (6.6)$$

où les transitions s'écrivent grâce à la notation "avant/après" : les variables non décorées (c, z) représentent la valeur dans l'état avant transition et les variables décorées (c' et z') représentent la valeur dans l'état après transition. Ainsi, les transitions sont décrites par des formules logiques qui énoncent une relation entre la valeur des variables avant transition et la valeur des variables après transition.

L'exemple précédent nous a permis de voir comment une formule de la LTL pouvait être évaluée par une chaîne appartenant au comportement du système. Dans la pratique, on s'intéresse à une évaluation plus générale. Les résultats recherchés sont les réponses à des questions telles que : "le modèle M satisfait-il la propriété temporelle P ?" ou "la propriété temporelle P est-elle valide relativement au modèle M ?" ou "la propriété d'état F est-elle un invariant du modèle M ?". La section suivante présente l'approche permettant d'y répondre.

6.3 La vérification

6.3.1 Cadre conceptuel

Définition 19 : vérification

C'est l'activité qui s'intéresse à établir une relation entre un modèle formel M d'un système et une formule P exprimant une propriété de M .

Dans la grande majorité des cas, la propriété à vérifier porte sur le comportement du système. C'est le cas des propriétés de sûreté, auxquelles nous nous intéressons. Soit $\mathcal{C}(M)$ le comportement du modèle M , c'est à dire l'ensemble de chaînes que M peut produire (par exemple, pour le modèle compteur-contrôleur de l'exemple, les chaînes présentées par la figure 6.2). Dans ce cas, la vérification consiste à décider des trois relations suivantes, entre la formule d'état F ou la formule temporelle P , et le modèle M :

- P est satisfaite par M s'il existe $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ telle que $\sigma \models P$.
- P est valide relativement à M si pour tout $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ on a $\sigma \models P$.
- F est invariant de M si pour tout état s accessible de M , on a $s \models F$.

Si P est satisfaite par M on note $M \models P$. La vérification permet de répondre par oui ou par non à la question de savoir si la propriété est satisfiable ou valide relativement à M ou bien si elle est un invariant de M . Il suffit de disposer d'un algorithme de vérification de la satisfiabilité car P sera valide relativement à M si $\neg P$ n'est pas satisfiable par M et F sera un invariant de M si $\Box F$ est valide relativement à M .

6.3.2 L'algorithmique de la vérification

La vérification s'inscrit dans le cadre de la logique mathématique. Il est donc naturel que les outils de vérification s'inspirent, du point de vue des algorithmes mis en œuvre, des deux versants procéduraux de la logique : les systèmes de déduction et l'algorithmique de la décision. Chacun de ces versants donne lieu à une famille d'outils de vérification. Ces deux familles sont constituées, d'une part, par les outils basés sur la preuve (theorem-proving) et d'autre part, par les outils de model checking.

La preuve semi-automatique

Définition 20 : Preuve semi-automatique

Elle se base sur un principe déductif. La validité d'une formule est établie grâce à des théorèmes mathématiques.

La preuve repose sur la présence du système de déduction associé à la TPO du système formel. Le modèle M est représenté par un ensemble de formules qui jouent le rôle d'hypothèses. Dans ce cas, on montre $M \models P$ en montrant, par une preuve de $M \vdash P$ qui se lit "on déduit

P à partir des hypothèses M ". Bien entendu, lors de la preuve, aux hypothèses fournies par M on ajoute, en général, un ensemble de prédicats, d'axiomes et des règles de déduction qui font partie de la TPO associée au système formel. Par exemple, si nous considérons le modèle compteur-contrôleur de notre exemple, les variables étant des nombres entiers, des propriétés générales de ces derniers peuvent intervenir dans la preuve.

Les méthodes basées sur la preuve ont donné de très bons résultats en ce qui concerne la vérification de l'invariance. En particulier, si le modèle est un système de transition, l'invariance peut être vérifiée par l'intermédiaire d'une règle de déduction inductive. Soit f_0 la formule logique qui définit l'état initial et, pour chaque transition τ_i , soit f_i la formule qui décrit τ_i , alors, pour prouver que la formule I est un invariant, il faut prouver :

1. $f_0 \Rightarrow I$
2. pour chaque transition τ_i , prouver que $(I \wedge f_i) \Rightarrow I'$ où I' est l'invariant quand chaque variable est notée dans sa forme primée.

La première règle exprime que l'invariant doit être satisfait par l'état initial. La deuxième énonce que si l'invariant est satisfait avant une transition, la relation de transition permet de constater que l'invariant est satisfait après la transition. Nous pouvons appliquer cette règle à l'exemple du système compteur-contrôleur, dans sa notation logique, donnée plus haut (équations 6.1 à 6.6). Pour montrer que la formule $c < 4$ est un invariant, nous devons prouver :

$$(c = 0) \wedge (z = 0) \Rightarrow (c < 4) \quad (6.7)$$

$$(c < 4) \wedge (z = 0) \wedge (c < 3) \wedge (c' = c + 1) \Rightarrow (c' < 4) \quad (6.8)$$

$$(c < 4) \wedge (z = 0) \wedge (c = 3) \wedge (c' = 0) \Rightarrow (c' < 4) \quad (6.9)$$

$$(c < 4) \wedge (z = 1) \wedge (c' = 0) \Rightarrow (c' < 4) \quad (6.10)$$

$$(c < 4) \wedge (z = 0) \wedge (z' = 1) \Rightarrow (c' < 4) \quad (6.11)$$

$$(c < 4) \wedge (z = 1) \wedge (z' = 0) \Rightarrow (c' < 4) \quad (6.12)$$

On peut constater facilement que chacune de ces formules est vraie. Par conséquent, la formule $c < 4$ est un invariant du système compteur-contrôleur.

Le model-checking

Définition 21 : Model-checking

Il est basé sur les procédures de décision de la validité ou de la satisfiabilité, c'est à dire la recherche de modèles, au sens logique du terme, par exploration de l'espace d'états.

Si nous considérons, par exemple, le cas des systèmes de transition, les modèles de P sont les chaînes σ telles que $\sigma \models P$. En général, les algorithmes de décision les plus efficaces sont ceux qui décident de la satisfiabilité (appelés SAT solvers). Dans ce cas, on essaye de vérifier

que $M \models P$ en cherchant à satisfaire $\neg P$. Si l'on trouve une chaîne $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ telle que $\sigma \models \neg P$, alors σ est un contre-exemple de la propriété étudiée (P). Si aucun contre-exemple n'est trouvé, on conclut que $M \models P$.

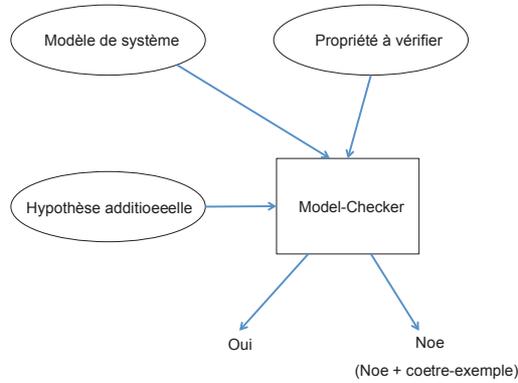


FIGURE 6.3 – Model-checkers : entrées et sorties.

L'outil de vérification par model-checking est le model-checker, qui opère conformément au schéma de la figure 6.3. Ses entrées sont : un modèle M du système, la propriété P à vérifier et, dans certains cas, une hypothèse auxiliaire H . Dans le cas avec hypothèse, la propriété P doit être satisfaite par les évolutions du système qui satisfont H . Formellement, $\sigma \models_H P$ si et seulement si $\sigma \in \text{Sat}(P \wedge H) \cap \mathcal{C}(M)$, où $\text{Sat}(F)$ est l'ensemble de chaînes qui satisfont la formule F .

Etant donné les entrées M et P (et éventuellement H), le model-checker, s'il termine, répond *Oui* ou *Non* selon si $M \models P$ ou pas. Certains model-checkers fonctionnent par réfutation, en cherchant une évolution du système qui met en défaut la propriété. Si une telle évolution est trouvée, la réponse est *Non* et la dite évolution est présentée comme un contre-exemple.

6.3.3 Limites et difficultés

Les outils de vérification : theorem-proving et model-checking, présentent des limitations qui, au fond, proviennent de la même cause : la complexité des systèmes modélisés.

Cas des outils basés sur le theorem-proving

Des résultats théoriques relatifs à la décidabilité de la preuve indiquent que l'outil de preuve universel, capable de construire toutes les preuves possibles sans intervention humaine n'est pas

à la portée des machines englobées dans l'hypothèse de Church-Turing^{2,3}. Par conséquent, la preuve ne peut être que semi-automatique : elle nécessite souvent l'aide d'un opérateur humain, à condition que celui-ci ait des idées susceptibles de faire avancer la démonstration. Cela n'empêche pas la puissance des algorithmes de preuve d'augmenter régulièrement. Mais on est forcé de constater que les outils de preuve aujourd'hui disponibles au sein des environnements de conception formelle ne sont pas totalement automatiques. A partir d'un niveau de complexité assez bas, la preuve des propriétés relatives à un modèle nécessite une participation humaine. La haute technicité de telles interventions est l'une des causes qui empêchent les approches formelles d'être considérées comme une méthode universelle pour la conception du logiciel. Un autre inconvénient de la preuve est qu'une réfutation de la propriété ne donne pas d'indication sur les modifications à apporter pour corriger le modèle. D'autre part, étant donné que la construction d'une preuve étant un processus exploratoire, on peut être confronté à des cas de non terminaison ou de coût calculatoire important. De plus, la puissance des outils de preuve dépend des théories intégrées dans la TPO associée. Ainsi, par exemple, rares sont les outils de preuve capables de traiter des modèles contenant des variables réelles.

Cas des outils basés sur le model-checking

Les difficultés du model-checking viennent de la nature exploratoire des algorithmes qui le mettent en œuvre [GL94]. En effet, ceux-ci reposent sur un parcours de l'espace d'états du système modélisé. Ce parcours est potentiellement exhaustif, dans le cas où la propriété est valide (car dans ce cas l'exploration ne sera pas arrêtée par la découverte d'un contre-exemple). Pour peu que le modèle incorpore des variables d'états à valeur prise dans des ensembles non finis, le nombre d'états possibles devient infini, et le model-checking peut, dans ces conditions, ne pas se terminer. Sans arriver au cas d'un espace d'états infini, des systèmes, dont le vecteur d'état global possède un nombre important de variables à valeur finie, peuvent également posséder un espace d'états de taille non-traitable. C'est la situation dite d'explosion combinatoire. La puissance des algorithmes n'a pas cessé d'augmenter au fil des recherches (" 2^{100} states and beyond" dit une phrase consacrée dans ce domaine). Malheureusement, des cas d'explosion combinatoire se présentent souvent dans la pratique réelle de la vérification.

6.4 Les méthodes de vérification

Pour contourner les difficultés relatives à la vérification, de nombreux travaux ont abordé la question au niveau méthodologique : peut-on concevoir des méthodes pour l'utilisation des outils de vérification qui permettent de gérer les difficultés ? Ces travaux ont porté très majoritairement sur la vérification par model-checking, pour laquelle une idée générale se présente facilement à

2. Thèse de Church-Turing : "Ce qui est effectivement calculable est calculable par une machine de Turing".

3. Une machine de Turing est un modèle abstrait du fonctionnement des appareils mécaniques de calcul, tel un ordinateur et sa mémoire, imaginé par Alan Turing en 1936 en vue de donner une définition précise au concept d'algorithme ou ní procédure mécanique z.

l'esprit : puisque le problème vient de la taille de l'espace d'états globaux à explorer, comment réduire ou simplifier cet espace ?

Deux concepts se sont imposés comme moyens de maîtriser, par l'aspect méthodologique de la vérification, le problème de l'explosion combinatoire : l'abstraction et la composition. La première consiste à appliquer une transformation à l'espace d'états global, pour produire un nouvel espace d'état simplifié, où l'on fait élimination des détails qui n'influent pas sur le résultat de l'exploration. La deuxième consiste à découper l'espace global en sous-espaces de taille maîtrisable, à vérifier des propriétés auxiliaires sur les sous-espaces et déduire après la propriété globale à partir des propriétés auxiliaires.

6.4.1 Les approches basées sur l'abstraction

L'idée est de simplifier l'état global du système en faisant abstraction des valeurs des variables qui n'ont pas d'influence sur la satisfiabilité de la propriété étudiée. L'application de cette technique passe par l'identification d'une fonction d'abstraction qui attribue un état abstrait à chaque état concret. Il est nécessaire d'établir que la dite fonction préserve la validité de la propriété étudiée : si elle est valide relativement au système abstrait, elle est valide relativement au système concret. Ceci constitue la difficulté principale de cette méthode.

La vérification par abstraction est proposée par **P. Cousot et R. Cousot** en 1977 [CC77]. [Sha02] montre une interprétation de la méthode d'abstraction en utilisant les treillis de Galois⁴. Si C est le modèle concret et A une abstraction de C , les deux modèles sont reliés par des connections de Galois (α, γ) , où α est la relation qui va de C vers A , et γ est la relation qui va de A vers C , tel-que $\forall a \in A$ et $c \in C$, $\alpha(c) \leq_A a \Leftrightarrow c \leq_C \gamma(a)$. En respectant les ordres partiels, $\gamma(a)$ est la plus grande concrétisation de a et $\alpha(c)$ est la plus petite abstraction de c . [Sha02] montre une application de ce principe : π est un programme ayant C comme espace d'états, x comme variable d'entrée et y comme variable de sortie. Le prédicat d'initialisation est donné par $y = 0$. La relation de transition entre l'état actuel (sans prime y) et l'état suivant (avec prime y') est donnée par la relation suivante :

$$(x \geq 0 \wedge y' = y + x) \vee (x \leq 0 \wedge y' = y - x)$$

La tâche de vérification consiste à vérifier l'invariant $y \geq 0$.

Le domaine des entiers C subit une abstraction de signe. Le domaine abstrait est défini par $A = \{0, +1, -1, T\}$, où $\gamma(0) = \{0\}$, $\gamma(+1) = [0, \infty[$, $\gamma(-1) =] - \infty, 0]$ et $\gamma(T) =] - \infty, \infty[$. Les opérateurs $+$ et $-$ appliqués sur des entiers sont remplacés par les opérateurs $\hat{+}$ et $\hat{-}$ dans A . Ces deux derniers sont définis en utilisant des fonctions d'abstraction. Cette abstraction permet de réduire significativement le nombre d'espace d'états à explorer, et par conséquent elle évite l'explosion combinatoire.

4. Un treillis (en anglais : lattice) est, en mathématiques, un ensemble partiellement ordonné dans lequel chaque couple d'éléments admet une borne supérieure et une borne inférieure. Un treillis de Galois est un treillis dont la construction est basée sur une correspondance de Galois.

Les limites de la méthode de vérification par abstraction réside dans la difficulté de définir la fonction d'abstraction qui permet de préserver les propriétés du modèle en question. Cette fonction peut être plus complexe selon le modèle à étudier.

La méthode de vérification par abstraction a été utilisé dans [HLOR11] pour prouver la propriété de non collision entre des voitures circulant sur une autoroute de plusieurs voies, durant les manœuvres de changement de voies. Elle a été utilisée aussi dans [SWDD09], pour la vérification des logiciels de navigation aérienne utilisés par airbus.

Méthode d'abstraction pour la vérification de la non collision entre véhicules pendant les manœuvres de changement de voie

Hilsher, Linker et al. [HLOR11] présentent une approche de vérification de la non collision entre véhicules sur une autoroute à plusieurs voies, durant les manœuvres de changement de voies.

Habituellement, les systèmes de trafic routier sont modélisés dynamiquement, où chaque véhicule a un trajet, défini par sa position, sa vitesse et son accélération. Or, pour effectuer une preuve de sécurité avec un modèle de plusieurs véhicules, et sur une autoroute à plusieurs voies, une telle modélisation semble être très détaillée. Les auteurs proposent alors un modèle abstrait basé sur une vue locale des véhicules comme le montre la figure 6.4. La figure montre une autoroute à trois voies (0, 1 et 2), et six véhicules (A ... F). A chaque véhicule correspond une position pos , une vitesse spd et une accélération acc . La figure montre aussi la vue locale du véhicule E.

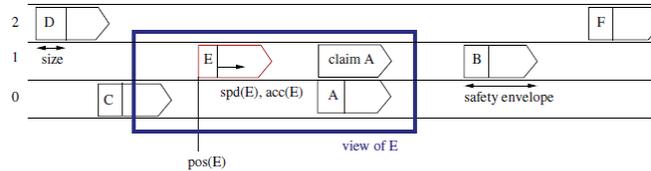


FIGURE 6.4 – Vue locale du véhicule E [HLOR11].

Les connaissances d'un véhicule sont les résultats de ses perceptions dans sa vue locale. Ces connaissances sont exprimées avec des formules provenant d'une logique spatiale dédiée, qui hérite de la logique temporelle. Une telle formule contient une liste finie des voies, où chaque voie est caractérisée par une séquence finie des segments. Un segment est soit occupé par un véhicule (exemple E), soit libre (*free*). Par exemple, dans la vue locale du véhicule E de la figure 6.4, la formule suivante ϕ est valide :

$$\phi \equiv \left\langle \begin{array}{c} free \frown E \frown cl(A) \frown free \\ C \frown re(A) \frown free \end{array} \right\rangle. \quad (6.13)$$

L'opérateur \frown joue le rôle d'un séparateur. Il sert à séparer les segments adjacents d'une

même voie. Avec cette logique, il est possible de distinguer si un véhicule A a une place réservée sur la voie ($re(A)$), ou s'il réclame une place pour une manœuvre de changement de voie ($claim$ a place : $cl(A)$).

La propriété de non collision entre les véhicules, à vérifier, est donc exprimée par la formule suivante :

$$Safe \equiv \forall c, d : c \neq d \Rightarrow \neg(re(c) \wedge re(d)) \quad (6.14)$$

Les auteurs montrent également une démonstration qui vérifie que cette abstraction préserve les propriétés du modèles à étudier.

6.4.2 Les approches compositionnelles

Les systèmes modélisés présentent, dans tous les cas non triviaux, une structure qui les organise en hiérarchie de modules ou composantes. L'état global résulte de la composition des états locaux des composants, dont la taille est inférieure. L'idée dans ce cas est de vérifier une série de propriétés auxiliaires locales aux composants, et d'appliquer ensuite une règle de composition qui permet de déduire la propriété globale à partir des propriétés locales (cf. section 7.3.3). Lors de la vérification de chaque propriété locale, le reste du système doit être pris en compte, car il interagit avec le composant sur lequel la vérification locale est effectuée. En général, on fait intervenir une propriété ou une hypothèse qui est supposée "représenter" le reste du système. La validité de cette hypothèse doit être prouvée [WS03, Cha93, AL93, Jon94].

Selon [BBSN08] et [KV98], l'approche compositionnelle s'applique en utilisant une règle de déduction, qui a généralement la forme suivante :

$$\frac{B_1 < \phi_1 >, B_2 < \phi_2 >, C(\phi_1, \phi_2, \phi)}{B_1 || B_2 < \phi >} \quad (6.15)$$

Si deux composants ayant deux comportements B_1 et B_2 , satisfont respectivement les deux propriétés ϕ_1 et ϕ_2 , et $C(\phi_1, \phi_2, \phi)$ est une condition qui relie les propriétés individuelles des composants à la propriété globale, en prenant en compte la sémantique de la composition parallèle. Alors le système $B_1 || B_2$ résultant de la composition de B_1 et B_2 va satisfaire la propriété globale ϕ .

L'essentielle difficulté dans l'application de la méthode compositionnelle est de trouver la bonne décomposition, tout en choisissant les hypothèses adéquates.

La méthode compositionnelle a été utilisée dans [CJT97] pour la vérification des systèmes basés sur les connaissances (knowledge-based systems), dans [MP10] pour la vérification des systèmes réactifs, dans [JT98] pour la vérification des systèmes multi-agents.

Méthode compositionnelle pour la vérification de la non collision entre avions.

Platzer et Clarke [PC09] présentent une approche compositionnelle pour vérifier l'absence de collision entre deux avions. Ils proposent d'étudier un modèle d'évitement de collision entre

deux avions, en utilisant des manœuvres de détournement du trajet de l'avion. Deux avions qui risquent de se heurter doivent détourner leurs trajets pour éviter la collision, comme le montre la figure 6.5.

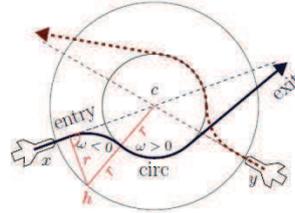


FIGURE 6.5 – Manoeuvre pour évitement de collision entre deux avions [PC09].

Pour vérifier la sûreté de fonctionnement du modèle, ce dernier va être divisé en des sous-modèles. A chaque modèle est associée une propriété. Les propriétés qui sont particulièrement étudiées sont : 1- La vitesse de l'avion, qui doit toujours rester entre une borne minimale et une borne maximale. 2- L'avion reprend son trajet initial après la manœuvre de détournement. 3- Les manœuvres de détournement respectent des conditions de temps. 4- La zone protégée d'un avion est toujours respectée. Une zone protégée est associée à chaque avion (cercle autour de l'avion). La présence d'un avion dans la zone protégée d'un autre indique la présence d'un risque de collision.

La sûreté de fonctionnement du modèle d'évitement de collision est ensuite déduite de l'ensemble des sous-modèles.

6.5 Outils de vérification

6.5.1 Contexte

Nous abordons dans ce paragraphe la description et l'évaluation d'outils correspondants aux deux approches de la vérification : la preuve et le model-checking. Nous ne présentons qu'une approche de vérification par la preuve qui, en fait, s'intègre dans un cadre formel de développement de logiciel, la méthode B, qui a atteint un haut degré de maturité technologique. Nous nous restreignons à la méthode B car, à notre connaissance, elle est la seule approche formelle de spécification-modélisation qui possède une maturité industrielle et qui intègre la vérification par la preuve. Le panorama est différent en ce qui concerne la vérification par model-checking, où un nombre considérable d'outils, avec des caractéristiques différentes, ont été proposés.

6.5.2 La méthode B

L'un des aspects de base de la méthode B [Abr96] est l'introduction d'une unité de modélisation bien structurée, la **machine abstraite**. Au cœur de la méthode B il y a un langage, l'Abstract Machine Notation (AMN). La méthode B inclut aussi un mécanisme de raffinement

permettant de concevoir en allant de l'abstrait vers le concret, pour obtenir in-fine une spécification dite concrète, proche d'un programme. D'autre part, la méthode B possède plusieurs mécanismes de structuration qui favorisent la modularité et la réutilisation. Un modèle B est composé d'un ensemble de machines abstraites de deux types : les machines proprement dites et les raffinements. Ces machines sont liées mutuellement, suivant un certain nombre de relations.

Une machine abstraite est constituée d'une série de sections. Chacune des sections peut contenir soit une liste d'identificateurs (sections **SETS**, **CONSTANTS**, **VARIABLES**), soit un prédicat (sections **CONSTRAINTS**, **PROPERTIES**, **INVARIANT**), soit des substitutions (sections **INITIALISATION**, **OPERATIONS**). La méthode B appartient à la famille des formalismes basés sur la notation formelle de la logique et de la théorie des ensembles et dès lors, se confond avec sa TPO et inclut un système de déduction.

Une autre caractéristique importante de la méthode B est la présence des substitutions généralisées comme formalisme de description des transformations opérées sur les données. Une substitution est un transformateur de prédicats. Si P est un prédicat et S_{op} la substitution qui décrit l'opération op , alors on note $[S_{op}]P$ le prédicat qui résulte de l'application de S_{op} à P . Il a été prouvé que le prédicat $[S_{op}]P$ est **la plus faible pré condition** que doit satisfaire un état du système auquel on applique l'opération op , pour que l'état qui en résulte satisfasse P . La preuve de propriétés relatives aux opérations d'un système s'inscrit ainsi dans une stratégie de déduction basée sur le concept de plus faible pré condition, ce qui en augmente l'efficacité et le degré d'automatisme (travail sans intervention de l'utilisateur).

Au sein de la méthode B, la vérification se présente par le biais d'une notion : la consistance des machines abstraites. Une machine abstraite est consistante si les sections constituées de prédicats où de substitutions satisfont les obligations de preuve qui y sont attachées. Les obligations de preuve peuvent être générées automatiquement à partir d'une machine donnée. En particulier, les obligations de preuve associées à l'invariant de la machine abstraite équivalent à une vérification, par une preuve inductive, de l'invariance effective du supposé invariant. Notre intérêt pour la méthode B se fonde sur le fait que les propriétés de sûreté, qui nous intéressent, s'expriment bien sous la forme d'invariants.

Considérons l'exemple suivant : la machine *Portes* qui, étant donné un ensemble de portes, maintient l'information relative à l'état (ouverte ou fermée) de chacune d'entre elles :

Section	Obligation
<i>INVARIANT</i>	$\exists p \bullet p \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT}$
<i>INITIALISATION</i>	$[\text{position} := \text{PORT} \times \{\text{fermee}\}](\text{position} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT})$
<i>OPERATION</i>	$(\text{position} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT}) \wedge (dd \in \text{PORT}) \Rightarrow$ $[\text{position}(dd) := \text{ouverte}](\text{position} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT})$
<i>OPERATION</i>	$(\text{position} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT}) \wedge (dd \in \text{PORT}) \Rightarrow$ $[\text{position}(dd) := \text{fermee}](\text{position} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT})$

TABLE 6.1 – Obligations de preuve de la machine *Portes*

MACHINE <i>Portes</i>
SETS <i>PORT</i> , <i>POSIT</i> = { <i>ouverte</i> , <i>fermee</i> }
VARIABLES <i>position</i>
INVARIANT <i>position</i> ∈ <i>PORT</i> → <i>POSIT</i>
INITIALISATION <i>position</i> := <i>PORT</i> × { <i>fermee</i> }
OPERATIONS
<i>ouvrir</i> (<i>dd</i>) ≡
PRE <i>dd</i> ∈ <i>PORT</i> THEN <i>position</i> (<i>dd</i>) := <i>ouverte</i> END;
<i>fermer</i> (<i>dd</i>) ≡
PRE <i>dd</i> ∈ <i>PORT</i> THEN <i>position</i> (<i>dd</i>) := <i>fermee</i> END
END

La section *SETS* introduit les noms de deux ensembles, *PORT* et *POSIT*. Ce dernier étant un ensemble contenant deux éléments seulement, sa définition in-extenso peut être donnée d'emblée, en donnant un nom à chacun des deux éléments. La section *VARIABLES* introduit le nom d'une variable. La section *INVARIANT* donne le type de la variable : il s'agit d'une fonction totale entre les deux ensembles introduits auparavant. La déclaration du type dans la section *INVARIANTS* garantit l'une des propriétés de base pour la consistance d'une application : le type d'une variable doit être préservé, toute valeur affectée à la variable doit appartenir à son type. La section *INVARIANTS* peut servir également à l'expression d'autres contraintes invariantes, telles que les propriétés de sûreté.

La table 6.1 présente les obligations de preuve que produit la machine *Portes*. Si chacune de ces obligations peut être prouvée, la machine *Portes* sera consistante. L'obligation *INVARIANT* dit que l'invariant peut être satisfait. Comme cette obligation ne contient pas de variable libre, elle doit s'évaluer à vrai. Pour cela, il suffit que les ensembles *PORT* et *POSIT* ne soient pas vides. L'obligation *INITIALISATION* dit que l'invariant est établi par l'opération d'initialisation. En effet, la substitution appliquée à l'invariant donne la plus faible pré condition sur l'état avant initialisation, pour que l'invariant soit satisfait après. Ce prédicat s'évalue à vrai, car la substitution produit le prédicat $\text{PORT} \times \{\text{fermee}\} \in \text{PORT} \rightarrow \text{POSIT}$, qui est vrai. Cela veut dire que l'initialisation établit l'invariant, quel que soit l'état la précédant. Les

obligations *OPERATION* dérivent des deux opérations *ouvrir* et *fermer* et sont satisfaites si, en supposant que l'état avant opération satisfait l'invariant, l'état après opération le satisfera aussi (les opérations préservent l'invariant). En fait, ce qui est orchestré n'est pas autre chose qu'une preuve inductive de l'invariant : l'initialisation l'établit et chaque opération le préserve.

La méthode B est, parmi les approches formelles, celle qui a atteint le plus haut niveau de maturité technologique [HG97]. En effet, deux environnements de niveau industriel sont disponibles, *Atelier-B*⁵ et *B-core*⁶, qui offrent l'ensemble d'outils nécessaires au déroulement de projets d'envergure : gestionnaires de projet, éditeurs, outils de preuve et d'animation, générateur d'obligations, générateurs de code. La preuve est orientée vers l'invariance, qui englobe les propriétés de sûreté, qui nous intéresse ici. Du côté des limitations, nous pouvons mentionner la prise en compte relativement basique des aspects comportementaux et l'absence de types prédéfinis correspondant aux valeurs numériques réelles. En ce qui concerne le premier aspect, lié au comportement, il existe désormais une variante de la méthode B, appelée *EventB*⁷ qui inclut la notion d'événement sous la forme d'un type particulier d'opération. Il est, dès lors en principe possible de modéliser des comportements par des machines abstraites qui représentent des automates d'état fini "plats". La deuxième limitation, l'inexistence de types numériques réels, prend une importance non négligeable lorsqu'il s'agit de modéliser des systèmes qui comportent des aspects physiques ou inspirés par la physique [CLKS08, Lan08, CLKS09, SSC08]. Dès lors, elle peut être appliquée à la modélisation de systèmes qui incluent des variables de ce type, au prix d'une discrétisation des dites variables et une simplification des modèles. Dans ces conditions, la confiance que l'on puisse attribuer aux résultats de la vérification est en relation inverse avec la distance entre le modèle et la réalité. Une autre difficulté est posée par la haute technicité de la preuve des invariants, en particulier du prouveur interactif.

Vérification de la sûreté d'un convoi de véhicule en utilisant le theorem proving et la méthode B

Simonin, Lanoix et al. [SLS⁺11] présentent une approche de vérification des systèmes multi-agent, qui utilise la méthode B. Le système multi-agents étudié adopte le modèle Influence/Reaction (I/R), proposé par Ferber et Muller dans [FM96]. Ils proposent une expression générique en B des modèles I/R, en utilisant une architecture basée sur des patterns. Deux patterns sont utilisés pour exprimer le cycle du modèle I/R. Un pattern est utilisé pour le comportement de l'agent et un pattern exprime l'évolution de l'environnement.

La méthode proposée est appliquée sur un système de convoi de véhicules autonomes, où l'environnement devient le véhicule physique et les agents sont les contrôleurs des véhicules. L'état du véhicule est représenté par sa position *xpos* et sa vitesse *speed*. La propriété de sûreté globale à vérifier est la non collision entre les véhicules du convoi. La propriété est exprimée en ajoutant l'expression suivante au INVARIANT du véhicule physique :

5. <http://www.atelierb.eu/>

6. <http://www.b-core.com/>

7. <http://www.event-b.org/>

$$\forall(ii).(ii \in \text{dom}(xpos) - \{0\} \wedge xpos_update(ii) = TRUE \wedge xpos_update(ii - 1) = TRUE) \Rightarrow xpos(ii - 1) - xpos(ii) \geq CRITICAL_DISTANCE)$$

L'expression exprime que la distance entre deux nouvelles positions de véhicules successifs doit être plus grande qu'une distance critique(CRITICAL_DISTANCE).

6.5.3 Outils basés sur le model-checking

De nombreux outils ont été développés pour la vérification par model-checking. Ils sont connus sous le nom de "model-checkers". Le tableau 6.2 présente cinq différents outils, en indiquant pour chacun le langage utilisé pour la modélisation et le langage utilisé pour exprimer les propriétés à vérifier. Certains génèrent un contre-exemple lorsque la propriété n'est pas satisfaite. Celui-ci peut être analysé pour déterminer les éventuels erreurs de conception qui conduisent à l'échec de la vérification.

Model checker	Langage de modélisation	Langage de propriété	Génère un contre-exemple
SPIN	PROMELA	LTL	Oui
PRISM	PRISM	CSL, PCTL	Non
Java PathFinder	Java	Non connu	Non
SAL	SAL-TSL	LTL	Oui
UPPAAL	TA + C	TCTL*	Oui

TABLE 6.2 – Différents outils de model-checking.

Pour vérifier les propriétés, les model checkers utilisent des algorithmes de décision. Il s'agit, généralement, de décision de la satisfiabilité, dont particulièrement, les solveurs SAT (Boolean satisfiability problem) et SMT (SAT Modulo theory). Parmi les solveurs SAT, on peut citer MiniSat [ES03], PicoSat [Bie08],... . Les solveurs SMT sont une généralisation des solveurs SAT qui incorporent des théories du premier ordre, telles que l'arithmétique linéaire avec soit des entiers soit des réels, des structures de données tel-que les arrays, vecteurs,... . Parmi les solveurs SMT on peut citer Yices [DM06] et Z3 [BBLM10]. Un fait particulièrement important est à signaler : la présence de variables réelles induit des espaces d'état infinis (et même, en principe, denses). Des mécanismes spécifiques doivent alors être incorporés dans les algorithmes de model-checking, pour éviter la non-terminaison systématique des explorations. Ainsi, Yices introduit un mécanisme dit de k-induction.

En ce qui concerne les langages de modélisation, la plupart des model-checkers s'intègrent dans des outils qui incluent un formalisme basé généralement sur le paradigme état/transition. Par exemple, UPPAAL⁸ inclut des automates temporisés (TA = Timed Automata), édités sous

8. <http://www.uppaal.org/>

forme de graphes état/transition, complétés avec des procédures en C. La toolbox SPIN inclut le langage PROMELA qui permet de construire des automates avec une représentation purement textuelle. La toolbox SAL inclut le Transition System Language (TSL), comme formalisme de modélisation.

En ce qui concerne l'expression des propriétés, la plupart des outils adoptent des langages de la logique temporelle :

- Linear Temporal Logic (LTL) : il s'agit de la logique temporelle linéaire dont nous avons parlé rapidement en section 6.2. Pour rappel, les principales modalités en sont la nécessité (notée \square ou bien **G**) et l'éventualité (notée \diamond ou bien **F**).
- Timed Computation Tree Logic (TCTL) : il s'agit de la logique temporelle la plus générale, qui inclut le cas linéaire dans le cadre arborescent (branching time). Les deux modalités correspondent à une quantification universelle des chaînes (**A**) et à une quantification existentielle des chaînes (**E**). Les algorithmes de model-checking sont très coûteux en temps, ce qui conduit à définir un sous langage, TCTL*, où les modalités sont **A** \square , **A** \diamond , **E** \square et **E** \diamond . Si F est une formule d'état, les seuls cas admis sont **A** $\square F$, **A** $\diamond F$, **E** $\square F$ et **E** $\diamond F$.
- Continuous time Stochastic Logic (CSL) et Probabilistic Computation Tree Logic (PCTL) : ces langages ont été conçus pour exprimer et soumettre à model-checking des propriétés relatives à des modèles de type chaînes de Markov à temps continu.

6.5.4 La boîte à outils SAL

Parmi les outils de model-checking mentionnés, nous distinguons la toolbox SAL, qui intègre plusieurs model-checkers. Parmi ceux-ci, le bounded model-checker (bmc) possède un certain nombre de caractéristiques intéressantes :

- model-checking basé sur le solveur SMT Yices, qui incorpore l'arithmétique linéaire parmi ses théories. Ceci permet de vérifier des modèles qui incluent des variables réelles.
- intégration du mécanisme de k-induction.
- possibilité d'injection d'hypothèses, qui est utile à la mise en pratique de la méthodologie de vérification compositionnelle, décrite dans la section 7.3.3.

Les model-checkers de SAL opèrent sur des modèles définis à l'aide du langage des systèmes de transition avec une syntaxe propre à SAL. Un modèle SAL est encapsulé par un *contexte* qui contient des définitions de constantes, de types et de fonctions. Un contexte contient également un ensemble de *modules*. Chaque module est un système de transition dont l'état est défini par un ensemble de variables locales, globales, d'entrée et de sortie. Les modules d'un contexte peuvent être composés de façon synchrone ou asynchrone. Une composition synchrone : $M_1 \parallel M_2$ est un module dont les transitions sont des compositions de transitions des modules M_1 et M_2 dont les gardes sont compatibles (c'est à dire, des transitions qui peuvent se déclencher simultanément). Une composition asynchrone : $M_1 [] M_2$ est un module dont le comportement résulte d'un entrelacement de transitions de M_1 avec des transitions de M_2 .

La présence des nombres réels ramène à un nombre infini d'états, ce qui conduit à des cas de non-terminaison de la vérification (explosion combinatoire). C'est pour cela qu'on utilise des model-checkers spéciaux tel que SAL bmc qui utilise Yices, un solveur SMT qui décide la satisfiabilité des formules arbitraires. Yices évite partiellement le problème de non-terminaison en introduisant un mécanisme de k-induction, où k est un entier qui représente la profondeur d'exploration. Ce mécanisme n'est pas garanti dans tous les cas, mais il évite la non-terminaison systématique. SAL inclut tout un éventail de model-checkers qui, étant donné un modèle \mathcal{M} et une formule F de la logique temporelle, sont capables de décider de la validité de F relativement à \mathcal{M} . En cas de réfutation, un contre-exemple est en général présenté. Les propriétés sont exprimées dans SAL à l'aide de la logique temporelle linéaire, par les deux modalités **G** (nécessité) et **F** (éventualité). Le model-checker décide de la validité et par conséquent, l'invariance de la propriété P est vérifiée par le model-checking de la formule **G** P .

6.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents outils et méthodes utilisés dans la vérification. L'objectif maintenant est d'utiliser ces derniers pour la validation du système de convoi des véhicules autonomes défini dans le chapitre 4.

Deux caractéristiques nous ont conduits à adopter la boîte à outils SAL en tant qu'outil de vérification par model-checking. Il s'agit premièrement de la capacité à effectuer le model-checking de modèles qui incluent des variables réelles, moyennant l'utilisation du model-checker borné SAL-bmc qui intègre le mécanisme de k-induction. Deuxièmement, SAL-bmc offre la possibilité d'injecter des hypothèses auxiliaires, ce qui est requis par la méthode de vérification compositionnelle décrite par la section 7.3.3.

Chapitre 7

Vérification de l'approche locale : méthode compositionnelle

7.1 Introduction

Dans le système de conduite en convoi autonome, que nous avons proposé dans le chapitre 4, les composantes informatiques sont essentielles. Le convoi de véhicule se déplace dans un environnement avec perturbations extérieures, et doit être soumis à des contraintes de sécurité. Avant de pouvoir envisager son utilisation dans un cadre grand public, il faut vérifier que certaines situations (comme la collision entre les véhicules du convoi, la collision avec un obstacle, \dots) ne se produisent pas, ou que leurs occurrences sont peu probables. Ceci revient à dire, qu'il faut s'assurer que certaines propriétés, qui décrivent le système, sont valides.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à étudier deux propriétés de sûreté. La première est la non-collision entre les éléments du convoi. La deuxième vérifie que le système évolue avec un certain niveau de confort des passagers.

Pour ce faire, nous avons défini un modèle formel qui permet de vérifier les propriétés de sûreté associées au modèle de conduite en convoi défini dans le chapitre 4. La méthode compositionnelle de vérification est utilisée, elle est choisie grâce à la structure hiérarchique du modèle de convoi de véhicule, où l'état global résulte de la composition des états locaux des composants. L'outil utilisé est le model checker SAL qui inclut un langage de modélisation adapté aux modèles comportementaux [EZCG⁺12, EZCGG11b].

7.2 Propriétés de sûreté

Le système de convoi de véhicule est soumis à plusieurs contraintes de sécurité. De ce fait, plusieurs propriétés de sûreté peuvent être définies, comme :

- Non-collision entre les véhicules du convoi.
- Bon suivi du trajet
- Non-collision avec des obstacles.

- Confort des passagers.
- ...

Parmi ces nombreuses propriétés de sûreté, nous avons choisi de donner la priorité aux propriétés de sûreté permettant d'assurer la sécurité des passagers et des véhicules : la non-collision entre les véhicules du convoi. La seconde propriété étudiée, concerne le confort des passagers durant l'évolution du convoi de véhicules.

7.2.1 Propriété de non-collision entre deux véhicules du convoi

La non-collision entre véhicules du convoi est l'une des propriétés de sûreté les plus importantes à vérifier pour assurer un déplacement fiable. Pour exprimer cette propriété, nous utilisons deux paramètres représentatifs des écarts entre les carrosseries des véhicules dans un convoi. Ainsi d_x représente l'inter-distance latérale entre carrosseries, c'est à dire la distance entre les points extrêmes de la projection de l'enveloppe des véhicules sur l'axe latéral. d_y représente l'inter-distance longitudinale entre carrosseries, donnée par la distance entre les points extrêmes de la projection des enveloppes sur l'axe longitudinal (cf. figure 7.1).

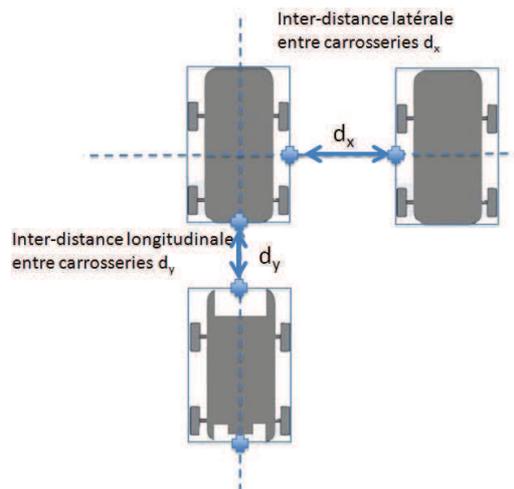


FIGURE 7.1 – Définition des deux paramètres d_x et d_y

La propriété de sûreté de non-collision entre deux véhicules du convoi peut être formulée de la façon suivante :

$$\text{Propriété de non-collision : } PS_1 : d_x > d_x^{security} \text{ ou } d_y > d_y^{security}$$

Où $d_x^{security}$ et $d_y^{security}$ sont respectivement les distances latérale et longitudinale de sécurité. Avec des distances inférieures, une collision entre les véhicules est considérée comme très probable.

7.2.2 Propriété de confort d'évolution du convoi

Il est également intéressant de vérifier que le convoi évolue en assurant une certaine qualité de confort. Pour vérifier cela, nous allons étudier la pseudo fréquence d'oscillations de la vitesse. La pseudo fréquence d'oscillation de la consigne de vitesse sera notée f . Elle correspond au nombre de fois par seconde où l'inter-distance longitudinale entre véhicules (d_y) alterne entre une valeur inférieure et une valeur supérieure à la valeur nominale fixée pour le convoi, avec une amplitude plus grande ou égale à 10% de la valeur nominale fixée.

La propriété de confort d'évolution du convoi peut être formulée de la façon suivante :

$$\text{Propriété de confort d'évolution du convoi : } PS_2 : f < f_{limit}$$

Avec f_{limit} une fréquence pour laquelle nous estimons que l'évolution du convoi peut entraîner un inconfort pour les passagers.

7.3 Approche méthodologique de vérification

7.3.1 Présentation générale

Cette section présente la méthode que nous avons adoptée pour la vérification de l'approche locale. Les éléments qui interviennent sont présentés sur la figure 7.2.

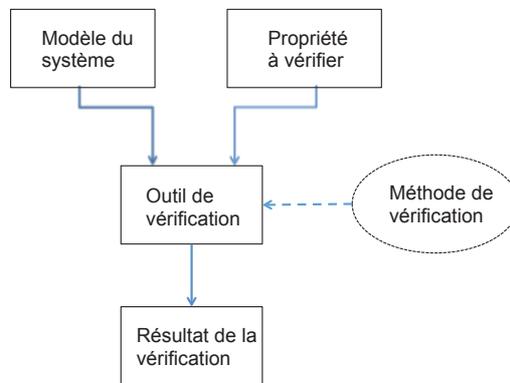


FIGURE 7.2 – Schéma descriptif de la vérification.

L'aspect méthode de vérification, plutôt qu'un outil intervenant dans la vérification est défini par un ensemble de règles organisant le processus de vérification. Nous allons donc décrire chacun de ces éléments, en commençant par la présentation de quelques aspects relatifs au modèle du système. Ensuite nous considérerons l'outil de simulation : la toolbox SAL. Finalement nous considérerons la formulation des propriétés à vérifier et la méthode de vérification.

7.3.2 Modèle d'un véhicule

Un modèle de véhicule est défini par la composition de trois comportements :

- *Perception* : modélise la fonction de perception d'un véhicule, qui lui permet de percevoir son leader local dans le convoi.
- *Contrôle* : calcule les consignes de vitesse et de direction à partir des données de la perception. Ces consignes permettent de contrôler les organes motrices et directrices du véhicule.
- *Modèle physique* : introduit dans le modèle de vérification une représentation du comportement dynamique du véhicule.

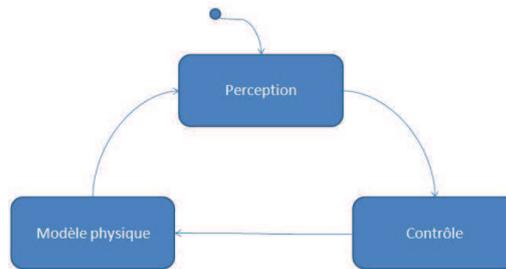


FIGURE 7.3 – Trois sous-comportements des véhicules du convoi.

Le comportement global résulte de la composition séquentielle et cyclique de ces trois sous-comportements, conformément à la figure 7.3.

7.3.3 La méthode de vérification

La méthode de vérification proposée est itérative, basée sur l'application d'une règle de déduction compositionnelle. La n -ième itération du processus de vérification concerne le model-checking d'un convoi de $n + 1$ véhicules, correspondant à une instance M_n du modèle. La méthode de vérification est compositionnelle car à chaque itération, on considère le comportement d'un seul composant (véhicule). Le reste du système est pris en compte sous la forme d'une propriété auxiliaire.

Règle de déduction pour une vérification compositionnelle

La règle de déduction s'applique à des instances M_i du modèle du système. L'instance M_i résulte de M_{i-1} par l'addition d'un nouveau composant C_i . La composition de M_{i-1} avec C_i est notée $M_i = C_i || M_{i-1}$. Généralement, C_i et M_{i-1} interagissent par l'intermédiaire d'un mécanisme de synchronisation ou de communication. Les systèmes composés de dispositifs physiques situés, peuvent comporter des interactions par l'intermédiaire de perceptions, sans aucun mécanisme explicite de communication ou synchronisation.

L'idée principale qui est exprimée par la règle de déduction est de simplifier la vérification de la propriété P_i en remplaçant le modèle M_{i-1} par la propriété auxiliaire T_{i-1} , introduite en tant

qu'hypothèse.

Etant donné les propriétés P_1, \dots, P_n , nous notons $M \models P_1, \dots, P_n$ lorsque les propriétés P_i sont valides relativement au modèle M . Les propriétés sont évaluées sur des séquences infinies σ d'états, qui représentent des évolutions causales du système. Notons $\mathcal{B}(M)$ l'ensemble de séquences produites par M et $Sat(P)$ l'ensemble de séquences qui satisfont la propriété P . Alors, $M \models P$ si et seulement si $\mathcal{B}(M) \subseteq Sat(P)$. Nous notons $M, H \models P$ si la propriété P est satisfaite par le modèle M sous l'hypothèse H . La méthode de vérification compositionnelle applique la règle suivante pour $i > 0$:

$$R_c : \frac{C_i, T_{i-1} \models T_i \quad C_{i+1}, T_i \models S_{i+1}}{C_{i+1} \parallel M_i \models S_{i+1}} \quad (7.1)$$

Une condition suffisante pour la consistance¹ de cette règle est que $\mathcal{B}(C_i \parallel M_{i-1}) \subseteq Sat(T_i)$, ce qui signifie que l'addition du composant C_i n'empêche pas M_{i-1} de satisfaire T_i . Cette condition est satisfaite si la présence de C_i dans le système n'a aucune influence sur le comportement de M_{i-1} .

La formulation des propriétés auxiliaires T_i dépendent des caractéristiques du problème. En général, on peut dire que T_i conditionne la satisfaction de S_i , éventuellement d'une façon indirecte. De plus, un ensemble de paramètres peut éventuellement intervenir dans la formulation de la propriété T_i . Donner des valeurs à ces paramètres est un aspect important de l'approche. Dans notre cas, le modèle M_i correspond au modèle formel d'un convoi de $i + 1$ véhicules dont le modèle est décrit au paragraphe 7.3.2. La condition de consistance pour l'application de la règle R_c est satisfaite dans le cas de l'approche locale, car aucun véhicule d'un convoi modélisé par M_{i-1} ne perçoit le véhicule C_i . Par conséquent, ce dernier n'a pas d'influence sur l'évolution du système M_{i-1} .

Processus de vérification

Le processus itératif de vérification, sur la base de la règle R_c , est illustré par la figure 7.4. La vérification commence avec $M_0 = C_0$, puis à chaque nouvelle itération, deux propriétés doivent être vérifiées par model-checking :

- Une propriété de sûreté, notée S_i , relative à l'instance M_i composée de l'instance M_{i-1} et du composant C_i . S_i est vérifiée pour M_i sous l'hypothèse T_{i-1} .
- La propriété auxiliaire T_i relative au système M_i . T_i est vérifiée sous l'hypothèse T_{i-1} .

1. Une règle de déduction est consistante si la conclusion est satisfaite dans tous les cas où les prémisses sont satisfaites

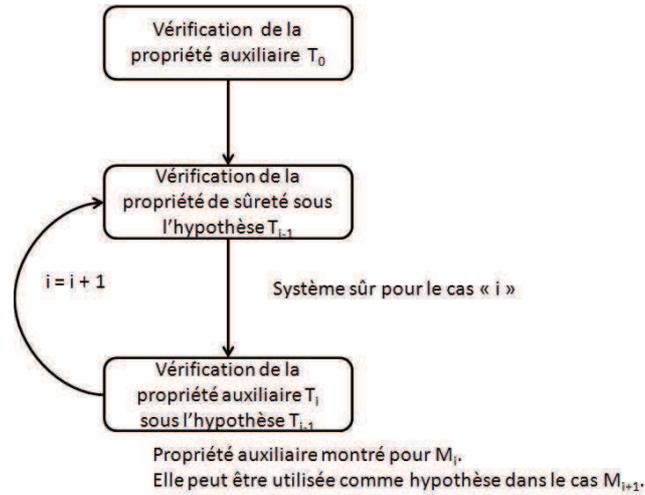


FIGURE 7.4 – Processus de vérification.

7.4 Implémentation en SAL du modèle du convoi de véhicule

7.4.1 Le contexte d'un véhicule

Le comportement du véhicule suiveur est décrit dans le contexte `Vehicle`. Ce dernier regroupe les trois modules : `Perception`, `Control` et `Physical Model`. Chacun des trois modules correspond à un des trois sous-comportements décrits dans la figure 7.3. Le contexte `Vehicle` est décrit comme suit :

```

Vehicle : CONTEXT =
BEGIN
Constants definition
Types definition
Variables declaration
Functions definition
Perception : MODULE
Control : MODULE
physicalModel : MODULE
vehicleBehavior : MODULE = Perception [ ] Control [ ] Physical Model;
END;
  
```

Les différents éléments du modèle sont :

- **Définitions des constantes** : Dans cette partie, des valeurs sont attribuées aux différentes constantes du système (par exemple, `safetyDistance`, `mass`, etc ...).

```

safetyDistance : REAL = 1.2; % distance de sécurité mesurée en mètres
minAcceleration : REAL = -1.3; % accélération minimale mesurée en m/s²
maxAcceleration : REAL = 1.3; % accélération maximale mesurée en m/s²
mass : REAL = 500; % masse du véhicule en kg
.....
  
```

- **Définition des types :** Cette partie introduit des types énumérés, qui représentent les états internes de chaque module (exemple : le module Perception peut avoir un des trois états : *idle*, *wait* et *read*).

```
PerceptionState : TYPE = {Pidle,Pwait,Pread};
VehicleControlState : TYPE = {Ridle,Rwait,Rcompute};
PhysicalModelState : TYPE = {PMwait,PMcompute,PMlimits};
```

- **Définition des fonctions :** Cette partie définit les différentes fonctions utilisées dans les calculs des modules. Par exemple, la fonction "computeAcceleration" est utilisée dans le module "Control" pour calculer l'accélération du véhicule.

```
computeAcceleration(_distance : REAL, _d1 : REAL, _d2 : REAL, _speed : REAL : REAL = (k1*( _d1 -
l0)+ (k2*( _d2 - l0) - (h*_speed)/mass);
....
```

L'accélération est calculée selon les équations détaillées dans le paragraphe 4.4.

- **Définitions des modules :** Chaque module représente un sous-comportement du véhicule. Un module utilise des variables partagées. Les variables peuvent être locales, globales, en entrées ou en sorties. Des variables booléennes sont utilisées pour synchroniser l'exécution des modules. Un module définit également les actions sur les variables et la modification de l'état du véhicule.

La dernière ligne du contexte exprime une composition asynchrone des modules $MODULE = Perception[]Control[]physicalModel$.

7.4.2 Les modules du contexte

Les trois modules : Perception, Control et PhysicalModel, expriment chacun un des sous-comportements du véhicule suiveur (cf. figure 7.3). Les échanges entre ces trois modules peuvent être représentées par la figure 7.5.

Le module Perception reçoit en entrée : le vecteur vitesse (\vec{v}) du véhicule, la vitesse de son leader local (V_{leader}) et l'angle de braquage de son leader local (α). Le vecteur vitesse est une sortie du modèle physique. Les sorties de Perception sont les trois vecteurs distance du modèle d'interaction (\vec{d} , \vec{d}_1 et \vec{d}_2 cf. figure 4.2).

Le module Control reçoit en entrée les trois vecteurs distance \vec{d} , \vec{d}_1 et \vec{d}_2 . Il calcule, en utilisant le modèle d'interaction à deux ressorts, et fournit un vecteur accélération \vec{acc} .

Le module PhysicalModel reçoit en entrée le vecteur accélération \vec{acc} . Il calcule le vecteur vitesse \vec{v} , et le fournit au module Perception.

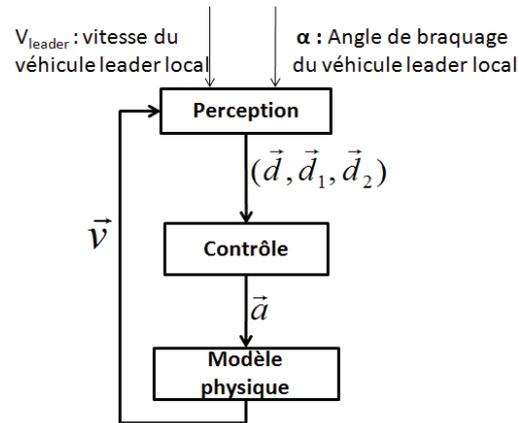


FIGURE 7.5 – Les données échangées entre les trois comportements d'un véhicule suiveur

Module Perception

Le module perception calcule les composants des trois vecteurs distance \vec{d} , \vec{d}_1 et \vec{d}_2 . Pour effectuer ces calculs, le module perception a accès au vecteur vitesse propre du véhicule et au vecteur vitesse de son leader local.

Le vecteur vitesse du leader local est représenté sous la forme d'une norme de vitesse et un angle de braquage, qui sont des variables d'états pour le model-checker : celui-ci leur attribue des valeurs au cours de l'exploration de l'espace d'états du système.

Le model checker choisit un angle de braquage (variable *turningAngle*) qui appartient à un intervalle précis $[\text{turningAngleMin}, \text{turningAngleMax}]$, où $\text{turningAngleMin} = 0$, c'est le cas où le véhicule ne tourne pas, et turningAngleMax correspond à l'angle de braquage maximal du véhicule.

Le choix de la valeur de la vitesse est contraint par les constantes *DeltaSpeedMin* et *DeltaSpeedMax*. Les variations des valeurs de la vitesse du prédécesseur donneront lieu à l'ensemble des états globaux exploré lors du model checking. Le choix des valeurs de *DeltaSpeedMin* et *DeltaSpeedMax* sera expliqué dans le paragraphe 7.4.4. Le script ci dessous montre les détails du module de perception.

```

Perception : MODULE =
BEGIN
  LOCAL vehicleState : PerceptionState
  LOCAL Deltadistance, DeltaSpeedPre, leaderSpeed : REAL
  GLOBAL start, endAction : BOOLEAN
  GLOBAL endPercept, endPhysicalModel : BOOLEAN
  INPUT  $v_x, v_y$  : REAL
  OUTPUT  $d, d_x, d_y, d1, d1_x, d1_y, d2, d2_x, d2_y$  : REAL
  Definition DeltaSpeedPre IN {x : REAL | x >= DeltaSpeedMinPre
    AND x <= DeltaSpeedMaxPre}
  Definition turningangle IN {x : REAL | x >= turningAngleMin
    AND x <= turningAngleMax}
  INITIALIZATION vehState = Pidle
  INITIALIZATION endPercept = FALSE
  INITIALIZATION START = FALSE; endPhysicalModel = TRUE
  INITIALIZATION D IN {x : REAL | x >= SafetyDistance
    AND x <= limitDistance}
  TRANSITION
  [
    vehicleState = Pidle And Start -- >
    start' = FALSE;
    vehicleState' = Pwait
  ]
  [
    vehicleState = Pwait AND endPhysicalModel
    vehicleState' = Pread
    leaderspeed' = ComputeSpeedLimit?(leaderSpeed + DeltaSpeedPre)
    endPhysicalModel' = FALSE
  ]
  [
    vehicleState = Pread
     $d_x' = d_x + v_x * delay + leaderSpeed * \cos?(turningAngle) * delay$ 
     $d_y' = d_y + v_y * delay + leaderSpeed * \sin?(turningAngle) * delay$ 
     $d' = computeLength?(d_x, d_y)$ 
     $d1_x' = d_x - \frac{width}{2} * \cos?(turningAngle) - \frac{width}{2}$ 
     $d1_y' = d_y + \frac{width}{2} * \sin?(turningAngle)$ 
     $d1' = computeLength?(d1_x, d1_y)$ 
     $d2_x' = d_x + \frac{width}{2} * \cos?(turningAngle) + \frac{width}{2}$ 
     $d2_y' = d_y - \frac{width}{2} * \sin?(turningAngle)$ 
     $d2' = computeLength?(d2_x, d2_y)$ 
    DeltaDistance' = ComputeDistance?(speed, DeltaSpeed)
    intervalSpeed' = DeltaDistance / delay
    vehicleState' = Pwait
    endPercept' = TRUE
  ]
END;

```

Pour les configurations échelon et ligne, le principe du véhicule virtuel (défini dans le chapitre 5) est utilisé. Par conséquent, le même modèle sera utilisé tout en ajustant les trois vecteurs distances \vec{d} , \vec{d}_1 et \vec{d}_2 pour prendre en compte les décalages latéraux et longitudinaux appropriés.

Module Control

Ce module applique le modèle d'interaction à deux ressorts, défini pour les convois dans les approches locales, pour calculer l'accélération du véhicule. Ce module nécessite, comme entrée, les trois vecteurs distances \vec{d} , \vec{d}_1 et \vec{d}_2 de la figure 4.2, qui sont les sorties du module Perception. La sortie de ce module sera le vecteur accélération $a\vec{c}$. k_1 , k_2 et h représentent, respectivement,

les raideurs des deux ressorts et le coefficient d'amortissement de l'amortisseur, utilisés dans le modèle d'interaction.

```

Control : MODULE =
BEGIN
  LOCAL vehicleState : VehicleControlState
  GLOBAL start, endAction : BOOLEAN
  GLOBAL endPercept, endPhysicalModel : BOOLEAN
  INPUT d, dx, dy, d1, d1x, d1y, d2, d2x, d2y : REAL
  OUTPUT accx, accy : REAL
  INITIALIZATION vehState = Ridle
  TRANSITION
  [
    vehicleState = Ridle -- >
    start' = TRUE;
    vehicleState' = Rwait;

  []
    vehicleState = Rwait AND endPercept AND
    d < safetyDistance -- >
    acceleration' = safetyStop?();
    vehicleState' = Act;
    endPercept' = FALSE;

  []
    vehicleState = Rwait AND endPercept AND
    d >= safetyDistance -- >
    Acc'x = computeAccelerationx?(dx, d1x, d2x, vx);
    Acc'y = computeAccelerationy?(dy, d1y, d2y, vy);
    Acc' = computeAcceleration?(Acc'x, Acc'y);
    vehicleState' = Rcompute;
    endPercept' = FALSE;

  []
    vehicleState = Rcompute -- >
    endAction' = TRUE;
    vehicleState' = Rwait;

  ]
END;

```

Module Physical Model

Ce module permet de calculer la réaction du véhicule en fonction des caractéristiques dynamiques du véhicule. Il nécessite, comme entrée, le vecteur accélération du véhicule, qui est calculé dans le module Control. Le module émet, comme sortie, le vecteur vitesse de consigne \vec{v} . Ce dernier va servir comme entrée pour le module perception. Ce module est détaillé ci-dessous :

```

PhysicalModel : MODULE =
BEGIN
  LOCAL vehicleState : PhysicalModelState
  GLOBAL start, endAction : BOOLEAN
  GLOBAL endPercept, endPhycalModel : BOOLEAN
  INPUT acc, acc_x, acc_y : REAL
  OUTPUT v_x, v_y : REAL
  INITIALIZATION vehState = PMwait
  TRANSITION
  [
    vehState = PMwait -->
    start' = TRUE;
    vehState' = PMcompute
  ]
  [
    vehicleState = PMcompute
    Orientation = arctang?(acc_y, acc_x)
    v' = IF acc > MaximalAcceleration THEN v + MaximalAcceleartion * Delay
    ELSE IF acc < MinimalAcceleration THEN v + MinimallAcceleartion * Delay
    ELSE v + acc * Delay ENDIF ENDIF
    vehState' = PMlimits
  ]
  [
    vehicleState = PMlimits
    v' = computeSpeedLimits?(v)
    v'_x = v * cos?(orientation)
    v'_y = v * sin?(orientation)
    vehState' = Pwait
  ]
END;

```

Contraintes imposées par le model checker

SAL utilise Yices, un solveur SMT, qui décide de la satisfiabilité des formules contenant des symboles, des fonctions, des nombres entier et réel, des vecteurs, des tableaux,....

En revanche, Yices ne permet pas des gérer certaines fonctions, comme les fonctions trigonométriques et les équations contenant des arithmétiques non linéaires (carrés des nombres, multiplication de deux variables, division par des variables, ...). Pour contourner ce problème, des fonctions pré-calculées basées sur le principe de linéarisation par morceaux (piecewise linearization) ont été introduites. Comme exemple, la fonction suivante permet de calculer la fonction sinus de façon approchée.

```

sinus(alpha : REAL) : REAL =
IF (alpha < 1) THEN 0
IF (alpha >= 1 AND alpha < 2) THEN 0.017
IF (alpha >= 2 AND alpha < 3) THEN 0.034
....

```

7.4.3 Traduction des propriétés de sûreté en SAL

Les deux propriétés de sûreté sont introduites dans le contexte *Vehicle* comme des théorème à vérifier. Elles sont traduites en LTL. La propriété de sûreté de non-collision est exprimée par :

```
SafetyCondition : THEOREM Behavior |- G(d_x > safety_x OR d_y > safety_y)
```

La propriété de confort est exprimée par :

$$\text{ComfortCondition} : \text{THEOREM Behavior} \mid - G(f < f_{limit})$$

Où G , un opérateur de la logique temporelle exprimant l'invariance.

7.4.4 Application de la méthode compositionnelle sur le modèle de convoi de véhicule

Nous allons maintenant appliquer la procédure de vérification compositionnelle, décrite dans le paragraphe 7.3.3, à la vérification des propriétés *SafetyProperty* et *ComfortProperty* relativement au système de convoi de véhicules. Comme déjà dit, la propriété auxiliaire T_i réfère au modèle M_i (la composition de i véhicules). Elle exprime les limites de la variation de vitesse de M_i . La propriété auxiliaire est donc donnée par l'équation :

$$T_i \equiv \text{DeltaSpeedMin}_i \leq \text{deltaSpeed}_i \leq \text{DeltaSpeedMax}_i \quad (7.2)$$

Les valeurs de DeltaSpeedMin_0 et de DeltaSpeedMax_0 , correspondant au cas T_0 , sont des données constructeurs correspondant à un véhicule.

Pour exprimer les propriétés auxiliaires T_i et T_{i+1} , des nouvelles constantes sont déclarées dans le contexte *Vehicle* :

```
%% Constants definition
DeltaSpeedMinPre : REAL = ... ;
DeltaSpeedMaxPre : REAL = ... ;
DeltaSpeedMinPost : REAL = ... ;
DeltaSpeedMaxPost : REAL = ... ;
%% Global variable declaration
deltaSped : REAL ;
```

où les valeurs des constantes DeltaSpeedMinPre , DeltaSpeedMaxPre sont utilisées dans la formulation de T_i et DeltaSpeedMinPost , DeltaSpeedMaxPost dans la formulation de T_{i+1} :

```
CurrentAuxiliaryProperty : THEOREM Vehicle \mid - G (DeltaSpeed >= DeltaSpeedMinPre AND DeltaSpeed
<= DeltaSpeedMaxPre);
NextAuxiliaryProperty : THEOREM Vehicle \mid - G (DeltaSpeed >= DeltaSpeedMinPost AND DeltaSpeed
<= DeltaSpeedMaxPost);
```

On commence le processus de vérification en effectuant le model checking de la propriété de sûreté :

```
sal-inf-bmc -depth=50 -induction -l CurrentAuxiliaryProperty Vehicle SafetyCondition
```

L'option *sal - inf - bmc* précise que c'est le model checker SAL-bmc qu'on veut utiliser. L'option *-depth = 50* exprime la profondeur à explorer par le model checker. L'option *-l* permet d'inclure la propriété auxiliaire *CurrentAuxiliaryProperty*, comme hypothèse de vérification. Ensuite, on vérifie les propriétés auxiliaires qui vont servir pour le cas suivant (*NextAuxiliaryProperty*) :

```
sal-inf-bmc -depth=50 -induction -l CurrentAuxiliaryProperty Vehicle NextAuxiliaryProperty
```

A partir de cette vérification, on transfère la valeur des constantes *DeltaSpeedMinPost* et *DeltaSpeedMaxPost* à *DeltaSpeedMinPre* et *DeltaSpeedMaxPre*.

Les itérations s'arrêtent soit parce qu'on arrive au nombre de véhicules souhaités, soit parce qu'un contre exemple est trouvé par le modèle checker.

7.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'approche de vérification que nous proposons pour la vérification du modèle de convoi de véhicule présenté dans le chapitre 2. L'approche proposée est compositionnelle. Cette dernière est choisie grâce à la structure hiérarchique du modèle de convoi de véhicule. L'outil utilisé est le model checker SAL. SAL permet de décrire les systèmes de transition. Deux propriétés sont principalement étudiées. Une propriété de sûreté qui exprime la non-collision entre les véhicules du convoi. Une deuxième propriété de confort, qui vérifie que le convoi évolue avec un certain niveau de confort. Les résultats de vérification de ces deux propriétés seront dressés dans le chapitre 9.

Troisième partie

Evaluation de l'approche : Vérifications, simulations et expérimentations

"No amount of experimentation can ever prove me right ; a single experiment can prove me wrong."

Albert Einstein

Chapitre 8

Démarche d'évaluation

8.1 Introduction

Au cours de ces travaux, nous avons mis en place une démarche d'évaluation de notre approche s'appuyant sur la vérification, sur la simulation et sur l'expérimentation.

La vérification a pour but de prouver que l'algorithme utilisé n'induit pas d'erreur par rapport au modèle théorique utilisé, c'est à dire vérifier que l'algorithme répond aux exigences de sûreté. La vérification couvre tous les cas possibles, contrairement à la simulation ou l'expérimentation qui ne testent qu'un ensemble de cas définis pas des scénarios. Cependant, la vérification ne donne pas des indications sur la qualité du convoi, ni sur son comportement.

La simulation donne une première idée sur le comportement du système. Elle permet aussi de tester des situations dangereuses ou interdites à expérimenter réellement, ou impossible par manque de matériel (simuler le comportement d'un convoi de dix véhicules par exemple). Cependant, les résultats produits par les simulations restent préliminaires et non réels. Ceci est généralement dû à la simplicité de certains modèles implantés dans le simulateur utilisé : les modèles physiques des voitures, la perception idéale, la prise en compte simpliste de la réaction roue-sol, etc

Les expérimentations donnent l'évaluation réelle du comportement des véhicules. Cependant, les tests faits par expérimentations reste limités.

De ce fait, les trois activités : vérification, simulation et expérimentation, sont complémentaires pour la validation de l'approche proposée pour la conduite en convoi. Nous exposons dans ce chapitre la démarche suivie pour chacune de ces activités ainsi que les outils utilisés par chacune.

8.2 Vérification de propriétés de sûreté du convoi

La vérification cherche à s'assurer du bon fonctionnement du système. Ceci revient à étudier la validité et la satisfiabilité des propriétés qui y sont associées. Pour notre système de conduite en convoi, deux propriétés de sûreté sont principalement étudiées : une propriété qui garantit que le convoi évolue sans risque de collision entre ses éléments. Une propriété qui garantit que le convoi évolue avec un certain degré de confort, sans incommoder les passagers.

Le but de la vérification est de connaître les limites du système qui garantissent son fonctionnement : le nombre maximal de véhicules, la vitesse maximale, l'inter-distance minimale, le rayon

de braquage maximal, l'accélération/décélération maximale

Dans cette thèse, pour une configuration colonne, nous cherchons à savoir :

- La taille du convoi (nombre des véhicules) maximale, qui garantie les deux propriétés.
- La vitesse maximale, q'un convoi de cinq véhicules peut atteindre, tout en satisfaisant les propriétés.
- L'inter-distance minimale qui garantie la satisfaction des deux propriétés.

Pour les configurations échelon et ligne, nous cherchons à savoir si un convoi de trois véhicules roulant à 15 km/h satisfait les propriétés ou non.

Pour la vérification des propriétés, nous utilisons la méthode compositionnelle définie dans le chapitre 7 de la partie II, ainsi que l'outil de vérification SAL (cf. chapitre 7 et annexe A).

8.3 Evaluation de la qualité du système

8.3.1 Les indicateurs

Nous définissons un bon convoi, comme étant le convoi où les véhicules : (1) respectent les inter-distances entre eux, et (2) suivent le trajet désiré. Pour évaluer la qualité de notre approche, nous étudions deux indicateurs principaux :

- **L'écart longitudinal** : L'étude de cet écart consiste à évaluer l'écart longitudinal entre deux véhicules suiveurs en fonction de l'écart longitudinal souhaité.
- **Le bon suivi du trajet** : L'étude du bon suivi de trajet consiste à évaluer l'écart entre les trajets suivis par les véhicules en fonction de l'écart latéral désiré. Pour mesurer l'écart entre deux trajets, on prend un point sur l'un des deux trajets et on mesure la distance la plus courte vers le deuxième. Ceci revient à mesurer, pour un point P sur le premier trajet, la distance (d) allant de P vers l'intersection de la normale à la tangente en P et le deuxième trajet (cf. figure 8.1).

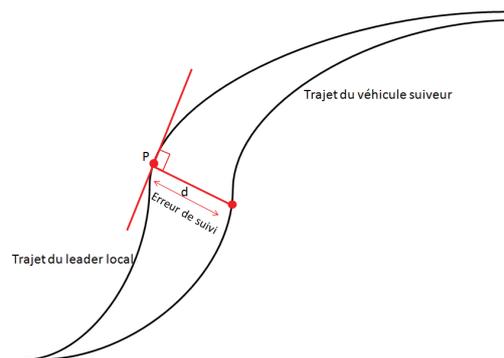


FIGURE 8.1 – Mesure de l'erreur de suivi de trajectoire.

8.3.2 La simulation

La simulation permet d'avoir une idée préliminaire sur le comportement du convoi. Elle permet d'étudier les cas difficiles à expérimenter. Dans cette thèse, les simulations sont faites avec des convois de trois et de dix véhicules. Le simulateur utilisé est le simulateur VIVUS.

Plate-forme de simulation



FIGURE 8.2 – Environnement de simulation VIVUS.

L'outil de simulation utilisé est le simulateur VIVUS¹ (Virtual Intelligent Vehicle Urban Simulator) [LGCG10], développé dans le cadre des projets CRISTAL puis SafePlatoon. L'outil a été entièrement réalisé au sein du laboratoire IRTES-SeT (Systèmes et Transports). Le simulateur VIVUS est un environnement de simulation 3D adapté à la fois pour la visualisation et pour la simulation des véhicules en convoi. La figure 8.2 montre une image prise du simulateur VIVUS.

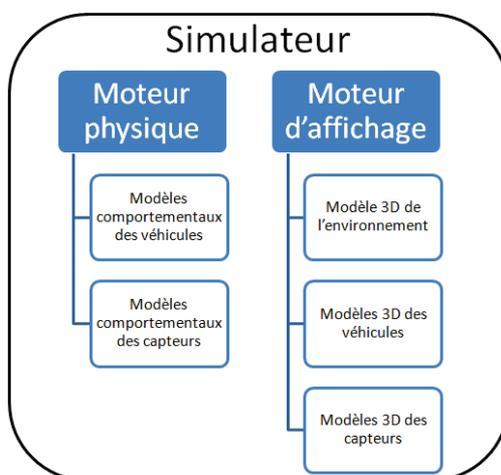


FIGURE 8.3 – Architecture du simulateur VIVUS.

1. http://www.vivus-simulator.org/Main_Page

La figure 8.3 montre l'architecture de VIVUS. Le simulateur englobe deux moteurs : un pour l'affichage et un pour les modèles physiques. Le moteur d'affichage permet d'importer et d'afficher des modèles 3D de l'environnement, les véhicules et les capteurs. Le modèle physique permet de simuler les interactions entre les différents constituants d'un véhicule (roues, amortisseurs, ...) et d'une scène (nature du sol,...) à partir de leurs propriétés physiques (coefficient de frottement,...).

VIVUS contient un environnement 3D représentant le Technopôle de la ville de Belfort, montré dans la figure 8.2. VIVUS incorpore aussi les modèles physiques des véhicules, la figure 8.4 montre un modèle des véhicules simulés. Les véhicules sont aussi équipés par des capteurs : des caméras, des systèmes de positionnement (GPS), des capteurs de mesure de distances (LMS, IBEO).



FIGURE 8.4 – Véhicule simulé en VIVUS.

Le but essentiel de cet environnement est de simuler et d'étudier d'une manière aussi fine que possible le fonctionnement de la solution de conduite en convoi autonome proposée. Il s'agit également d'un outil de communication permettant de visualiser l'évolution d'un train de véhicule en milieu urbain dense (cf.figure 8.2).

8.3.3 L'expérimentation

Les expérimentations montrent le comportement réel du convoi. Dans cette thèse, les expérimentations sont réalisées avec des convois de deux véhicules, dont dispose le laboratoire Systèmes et Transports.

Plate-forme d'expérimentation

Le laboratoire SeT dispose de quatre voitures électriques : deux de type GEM (cf.figure 8.5(a)) et deux de type Little-car (cf.figure 8.5(b)). Ces véhicules sont automatisés et peuvent être contrôlés par un système informatique embarqué.



FIGURE 8.5 – Véhicules du laboratoire SeT : GEM (a) et Little-car (b).

L'asservissement est réalisé à l'aide d'un contrôleur qui commande l'accélération, le freinage et la direction du véhicule.

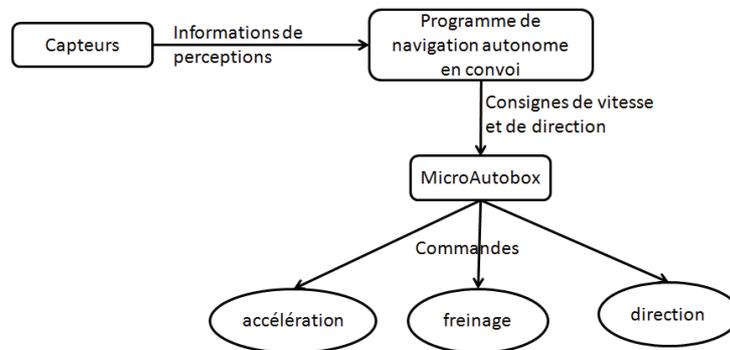


FIGURE 8.6 – Architecture du système embarqué utilisé sur les véhicules GEM

La figure 8.8 montre l'architecture du système embarqué utilisé sur les véhicules GEM. Un capteur envoie les données de perception au programme de navigation. Ce dernier calcule les consignes de vitesse et de direction et les envoie à la carte de contrôle temps réel *MicroAutoBox* qui commande les actionneurs du véhicule.

Capteurs

Deux types de capteurs sont utilisés pour la conduite en convoi :

- Des télémètres laser installés sur les véhicules. Ces capteurs permettent à un véhicule de percevoir son environnement. Des télémètres laser à balayage sont utilisés. Un tel capteur envoie une "nappe" de lumière. La lumière se réfléchit sur les obstacles rencontrés dans sa zone de portée. La lumière réfléchie atteint le récepteur du capteur avec un angle α . La distance d , entre l'obstacle et le télémètre, est ensuite mesurée par méthode de triangulation ($d = b \tan \alpha$, avec b est la distance entre l'émetteur et le récepteur du capteur (cf.figure 8.7)).

- Un système de positionnement global (GPS) est aussi utilisé pour le positionnement des véhicules. Le GPS n'a pas d'utilité pour le fonctionnement autonome du convoi, mais pour l'acquisition des données à évaluer.

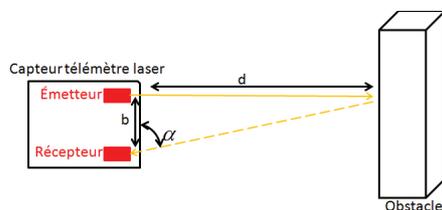


FIGURE 8.7 – Fonctionnement d'un télémètre laser.

Chacun des véhicules suiveurs est équipé de deux télémètres laser, installés sur son avant (cf. figure 8.8). Le premier est un capteur IBEO² (le télémètre noir dans la figure). Les capteurs IBEO sont spécialement adaptés aux applications automobiles. Ils offrent tous les avantages de la numérisation des systèmes LIDAR (LIght Detection and Ranging) (cf. annexe B). Le deuxième capteur est un LMS, c'est un capteur industriel permettant une perception très large (180°) (cf. annexe B). Ces deux capteurs ont été choisis pour permettre une perception complète et redondante.



FIGURE 8.8 – Capteurs installés sur les véhicules GEM du laboratoire SeT.

Les télémètres assurent la perception de la distance et de l'angle entre véhicules. Pour améliorer cette perception, nous avons installé des balises réfléchissantes sur l'arrière des véhicules suivis (cf. figure 8.9). Ces balises permettent un meilleur réfléchissement des rayons

2. <http://ibeo-as.com/index.php/en>

émis par le télémètre laser.



FIGURE 8.9 – Balises réfléchissantes installées à l'arrière d'un véhicule suivi.

Le GPS utilisé est de type RTK. Il assure une localisation au centimètre près dans la zone de couverture radio de la base (cf . annexe B).

8.4 Conclusion

Les trois activités : vérification, simulation et expérimentation sont complémentaires pour l'évaluation et la validation de notre approche de conduite en convoi. La vérification vérifie le bon fonctionnement de l'algorithme utilisé, alors que la simulation et l'expérimentation évaluent la qualité du convoi. La simulation permet de tester des cas difficiles à expérimenter alors que l'expérimentation montre le vrai comportement du système.

Les trois chapitres suivants montrent les résultats produits par chacune de ces trois activités. Le chapitre 9 montre les résultats de vérification. Le chapitre 10 montre les résultats de la simulation et de l'expérimentation de la configuration colonne. Le chapitre 11 montre les résultats de simulation de la configuration échelon.

Chapitre 9

Résultats de vérification

9.1 Les cas de vérification

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats de vérification des propriétés de sûreté et de confort définies dans le chapitre 7. Le modèle formel utilisé correspond à celui détaillé dans le chapitre 7. Les cas à vérifier sont regroupés sous cinq cas de vérification : Colonne-cas1, Colonne-cas2, Colonne-cas3, Echelon-cas1 et Ligne-cas1, récapitulés dans le tableau 9.1. Dans les trois premiers cas, la configuration à vérifier est une configuration colonne. Colonne-cas1 cherche à savoir le nombre de véhicule maximal qu'un convoi peut atteindre avec une vitesse de 25 km/h. Colonne-cas2 cherche à savoir la vitesse maximale qu'un convoi de cinq véhicule peut atteindre. Colonne-cas3 cherche à savoir l'inter-distance minimale qui garantie les propriétés de sûreté. Le quatrième et le cinquième cas, cherchent à savoir si des convois de trois véhicules en configuration échelon et ligne respectivement, sont sûrs pour une vitesse de 15 km/h.

Cas de vérification	Nombre de véhicule	Formation	d_x	d_y	Vitesse
Colonne-cas1	Variable	Colonne	0	3 m	25 km/h
Colonne-cas2	5	Colonne	0	3 m	variable
Colonne-cas3	5	Colonne	0	Variable	25 km/h
Echelon-cas1	3	Echelon	3 m	2 m	25 km/h
Ligne-cas1	3	Ligne	0 m	2 m	15 km/h

TABLE 9.1 – Cas de vérification

Pour chaque cas de vérification, les résultats sont rassemblés dans des tableaux qui contiennent :

- Le **nombre des véhicules** du convoi.
- Le **rayon de courbure** (en mètres) du trajet suivi par le véhicule leader.
- La **profondeur d'exploration** minimale nécessaire pour obtenir une réponse du model checker. Il arrive parfois que l'étape d'induction échoue à cause d'une profondeur d'exploration non suffisante. Le model checker répond dans ces cas par "échec d'induction", en demandant d'augmenter la profondeur d'exploration. La profondeur d'exploration affichée

dans les tableaux correspond donc à la profondeur minimale qui permet d'avoir une réponse du model checker.

- Le **nombre des nœuds explorés**. C'est une valeur statistique donnée par le model checker à la fin du processus de vérification. Elle représente le nombre des états explorés jusqu'à ce qu'un nœud qui contredit la propriété de sûreté soit trouvé, ou jusqu'à ce que l'espace de tous les états soit vérifié.
- Le **temps d'exécution** (en secondes). Ce temps est donné par le model checker à la fin de la vérification. Il est ajouté à titre indicatif. Le temps d'exploration peut changer selon la machine ou le cluster sur laquelle sont faits les tests, et selon son état (chargé ou pas).
- Le **résultat de l'exploration**. Ce résultat peut prendre deux formes. Le model checker répond par : 1 - "prouvé" s'il réussit à montrer que la propriété à vérifier est valide pour toutes les évolutions du système. 2- "contre-exemple", si un cas qui contredit la propriété à vérifier apparaît, le model checker s'arrête et affiche le contre-exemple.

D'autres paramètres peuvent éventuellement s'ajouter aux tableaux selon les cas à vérifier. Comme par exemple, la vitesse maximale du convoi. Cette vitesse est ajoutée dans le tableau si, selon le cas à vérifier, elle varie durant les tests.

Les vérifications sont réalisées avec deux types de trajets : trajet linéaire où le véhicule leader effectue un mouvement linéaire, et avec des trajets circulaires où le véhicule effectue un trajet d'un rayon de courbure donné.

Le tableau récapitule les caractéristiques des véhicules utilisés dans les différentes vérifications :

Masse du véhicule	500 <i>kg</i>
Accélération maximale	1 <i>m/s²</i>
Décélération maximale	-1 <i>m/s²</i>
Distance de sécurité	1 <i>m</i>

TABLE 9.2 – Paramètres des véhicules utilisés durant les expérimentations.

9.2 Colonne-cas1

9.2.1 Description du cas

Dans le cas de vérification Colonne-cas1, les véhicules sont placés dans une configuration colonne. L'objectif de ce test est de faire varier le nombre de véhicules d'un convoi en colonne avec une vitesse de 25 km/h et une distance inter-véhicule souhaitée de 3 m, pour déterminer le nombre maximum de véhicule qui vérifie les propriétés de sûreté et de confort.

9.2.2 Résultats de vérification de la propriété de sûreté

Le tableau 9.3 récapitule les résultats obtenus lors de la vérification de la propriété de sûreté de non collision. Les résultats obtenus montrent que la propriété de sûreté de non collision a été validée pour un convoi de cinq véhicules à 25 km/h (pas de contre exemple).

Le premier contre-exemple apparaît pour un rayon de courbure de 5 m avec un convoi de 6 véhicules. Pour les trajets linéaires et circulaires avec des rayons de courbure supérieurs ou égaux à 10 m, les contre-exemples sont rencontrés à partir du treizième véhicule.

Nombre de véhicules	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2 à 12	Infini	25	242265	950.17 s	prouvé
2 à 12	30	25	244396	950.17 s	prouvé
2 à 12	10	25	242013	950.17 s	prouvé
2 à 5	5	25	242013	950.17 s	prouvé
13	Infini	25	242265	42.5 s	contre-exemple
13	30	25	244396	42.5 s	contre-exemple
13	10	25	242013	42.5 s	contre-exemple
6	5	25	242013	42.5 s	contre-exemple

TABLE 9.3 – Bilan des résultats de vérification pour le scénario Colonne-cas1.

La figure 9.1 montre le contre-exemple rencontré avec le treizième véhicule en trajet linéaire. La cause de cette collision revient au fait que les oscillations de la distance entre véhicules augmentent avec l'augmentation du nombre des véhicules, ce qui peut conduire à un cas où la distance entre véhicules devient inférieure à la distance de sécurité et par conséquent une collision.

```

1  Yices 1.0.34
2  Counterexample:
3  =====
4  Path
5  =====
6  Step 0:
7  --- System Variables (assignments) ---
8  LateralDistance = 0
9  LongitudinalDistance = 3
10 Vx = 6/5
11 Vy = 144/25
12 leaderSpeed = 7
13 dx = 0
14 dy = 3
15 d2x = 0
16 d2y = 3
17 -----
18 .
19 .
20 .
21 -----
22 Step 11:
23 --- System Variables (assignments) ---
24 LateralDistance = 143/8
25 LongitudinalDistance = 7/8
26 Vx = 0
27 Vy = 27/4
28 leaderSpeed = 25/4
29 dx = 1/50
30 dy = 7/8
31 d2x = -1/50
32 d2y = 7/8
    
```

L'écart longitudinal est inférieur à la distance de sécurité de 1 mètre.

FIGURE 9.1 – Un contre-exemple rencontré avec un convoi de 13 véhicules dans une configuration colonne.

9.2.3 Résultats de vérification de la propriété de confort

Dans ce test, on s'intéresse à savoir la longueur maximale du convoi qui garantit un convoi confortable à une vitesse maximale de 25 km/h. Le tableau 9.4 montre les fréquences maximales d'oscillations de l'écart longitudinal entre deux véhicules du convoi. Ce tableau montre que, pour le deuxième véhicule du convoi (premier suiveur) la fréquence d'oscillation est inférieure à 2 Hz. Pour le troisième véhicule, la fréquence d'oscillation est inférieure à 3 Hz. Pour le quatrième jusqu'au huitième véhicule, la fréquence d'oscillation maximale est de 4 Hz. Pour le neuvième véhicule, cette fréquence maximale augmente jusqu'à 6 Hz. Ces résultats montrent qu'à partir du neuvième véhicule, le convoi est considéré comme non-confortable.

Nombre de véhicules	f_y	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2	1	Infini à 15 m	50	490921	26.81 s	contre-exemple
2	2	Infini à 15 m	50	491308	58.39 s	prouvé
3	1	Infini à 15 m	50	490921	44.28 s	contre-exemple
3	2	Infini à 15 m	50	490921	36.67 s	contre-exemple
3	3	Infini à 15 m	50	491308	99.9 s	prouvé
4 à 8	1	Infini à 15 m	50	490921	28.33 s	contre-exemple
4 à 8	2	Infini à 15 m	50	490921	31.83 s	contre-exemple
4 à 8	3	Infini à 15 m	50	490921	23.32 s	contre-exemple
4 à 8	4	Infini à 15 m	50	491308	221.43 s	prouvé
9	1	Infini à 15 m	70	687221	772.35 s	contre-exemple
9	2	Infini à 15 m	70	687221	759.94 s	contre-exemple
9	3	Infini à 15 m	70	687221	1032.49 s	contre-exemple
9	4	Infini à 15 m	70	687221	925.7 s	contre-exemple
9	5	Infini à 15 m	70	687221	611.13 s	contre-exemple
9	6	Infini à 15 m	70	687808	1037.21 s	prouvé

TABLE 9.4 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas1

9.3 Colonne-cas2

9.3.1 Description du cas

Dans le cas de vérification Colonne-cas2, les véhicules sont placés dans une configuration colonne. L'objectif de ce test est de déterminer la vitesse maximale d'un convoi en colonne, de 5 véhicules avec une inter-distance souhaitée de 3 m, vérifiant les propriétés de sûreté et de confort.

9.3.2 Résultats de vérification pour la propriété de sûreté

Le tableau 9.5 récapitule les résultats obtenus lors de la vérification de la propriété de sûreté de non collision pour un convoi de 5 véhicules qui roule à 40 km/h et 45 km/h. Pour une vitesse maximale de 40 km/h, pas de contre-exemple rencontré. Par contre, pour une vitesse de 45 km/h, un convoi de 5 véhicules n'est plus sûr, un contre-exemple est rencontré lors de l'ajout du cinquième véhicule. Une trace de ce contre-exemple est montrée dans la figure 9.2.

Nombre de véhicules	Vitesse maximale	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2 à 5	40 km/h	Infini	25	238859	950.17 s	prouvé
2 à 5	40 km/h	30	25	239159	887.12 s	prouvé
2 à 5	40 km/h	10	25	239159	902.36 s	prouvé
2 à 4	45 km/h	Infini	25	242265	1025.14 s	prouvé
5	45km/h	Infini	25	244396	42.36 s	Contre-exemple

TABLE 9.5 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de sûreté pour le scénario Colonne-cas2.

```

1  Yices 1.0.34
2  Counterexample:
3  -----
4  Path
5  -----
6  Step 0:
7  --- System Variables (assignments) ---
8  DeltaSpeedPre = 1/10
9  LateralDistance = 0
10 LongitudinalDistance = 3
11 leaderSpeed = 12
12 Vx = 0
13 Vy = 11
14 dx = 0
15 dy = 3
16 d2x = 0
17 d2y = 3
18 -----
19 .
20 .
21 .
22 -----
23 Step 18:
24 --- System Variables (assignments) ---
25 DeltaSpeedPre = -1/10
26 LateralDistance = 0
27 LongitudinalDistance = 1
28 Vx = 0
29 Vy = 4
30 leaderSpeed = 2
31 dx = 0
32 dy = 2
33 d2x = 0
34 d2y = 1

```

Le véhicule leader décélère pour passer d'une vitesse de 11m/s à une vitesse de 2m/s. Le véhicule suiveur ne décélère pas assez rapidement. L'écart Longitudinal devient inférieur à la distance de sécurité

FIGURE 9.2 – Un contre-exemple rencontré avec un convoi de 5 véhicules dans une configuration colonne qui roule à 45 km/h.

9.3.3 Résultats de vérification de la propriété de confort

Le but de ce test est de connaître la vitesse maximale qu'un convoi de 5 véhicules peut atteindre tout en restant confortable. Les fréquences maximales d'oscillation de l'écart longitudinal pour un convoi de 5 véhicules à 25 km/h sont montrées dans le tableau 9.4. Ces résultats montrent que la fréquence d'oscillation maximale est de 2 Hz pour le deuxième véhicule, de 3 Hz pour le troisième véhicule et de 4 Hz pour les quatrième et cinquième véhicules.

Le tableau 9.6 montre les résultats de ce test. Ce tableau montre que le comportement du convoi avec des vitesses allant de 30 à 40 km/h reste similaire aux résultats obtenus avec un convoi à 25 km/h.

Par contre, pour une vitesse de 45 km/h, ces oscillations augmentent. La fréquence maximale d'oscillation de l'écart longitudinal devient de 3 Hz pour le deuxième véhicule, 4 Hz pour le troisième véhicule, 5 Hz pour le quatrième véhicule et de 6 Hz pour le cinquième véhicule. On peut

donc dire qu'un convoi de 5 véhicules devient moins confortable lorsqu'il roule à une vitesse de 45 km/h. Les oscillations de l'écart longitudinal sont plus importantes, surtout pour le cinquième véhicule.

Nombre de véhicules	f_y	Vitesse maximale	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2,3,4,5	1	30 km/h	Infini à 15 m	50	490921	22.58 s	contre-exemple
2	2	30 km/h	Infini à 15 m	50	491308	96.18 s	prouvé
3,4,5	2	30 km/h	Infini à 15 m	50	490921	27.02 s	contre-exemple
3	3	30 km/h	Infini à 15 m	50	491308	18.2 s	prouvé
4,5	3	30 km/h	Infini à 15 m	50	490921	19.38 s	contre-exemple
4,5	4	30 km/h	Infini à 15 m	50	491308	157.76 s	prouvé
2,3,4,5	1	35 km/h	Infini à 15 m	50	687221	83.79 s	contre-exemple
2	2	35 km/h	Infini à 15 m	50	687808	81.01 s	prouvé
3,4,5	2	35 km/h	Infini à 15 m	50	490921	42.25 s	contre-exemple
3	3	35 km/h	Infini à 15 m	50	491308	110.77 s	prouvé
4,5	3	35 km/h	Infini à 15 m	50	490921	59.29 s	contre-exemple
4,5	4	35 km/h	Infini à 15 m	50	491308	59.14 s	prouvé
2,3,4,	1	40 km/h	Infini à 15 m	50	490921	19.93 s	contre-exemple
2	2	40 km/h	Infini à 15 m	50	491308	50.83 s	prouvé
3,4,5	2	40 km/h	Infini à 15 m	50	490921	29.16 s	contre-exemple
3	3	40 km/h	Infini à 15 m	50	491308	96.87 s	prouvé
4,5	3	40 km/h	Infini à 15 m	50	490921	30.58 s	contre-exemple
4,5	4	40 km/h	Infini à 15 m	50	491308	162.66 s	prouvé
2,3,4,5	1	45 km/h	Infini à 15 m	70	687221	127.68 s	contre-exemple
2,3,4,5	2	45 km/h	Infini à 15 m	70	687221	84.42 s	contre-exemple
2	3	45 km/h	Infini à 15 m	70	687808	1409 s	prouvé
3,4,5	3	45 km/h	Infini à 15 m	70	687221	161.78 s	contre-exemple
3	4	45 km/h	Infini à 15 m	70	687808	243.59 s	prouvé
4,5	4	45 km/h	Infini à 15 m	70	687221	166.43 s	contre-exemple
4	5	45 km/h	Infini à 15 m	70	687808	294.89 s	prouvé
5	5	45 km/h	Infini à 15 m	70	687221	227.29 s	contre-exemple
5	6	45 km/h	Infini à 15 m	70	687808	227.96 s	prouvé

TABLE 9.6 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas2.

9.4 Colonne-cas3

9.4.1 Description du cas

Dans le cas de vérification Colonne-cas3, les véhicules sont placés dans une configuration colonne. L'objectif de ce test est d'évaluer l'inter-distance entre carrosseries pour un convoi de 5 véhicules avec une vitesse maximale de 25 km/h qui vérifie les propriétés de sûreté et de confort.

9.4.2 Résultats de vérification de la propriété de sûreté

Les vérifications faites pour le cas Colonne-cas1 montrent que lorsque l'écart longitudinal entre les véhicules est de 3 m et la distance de sécurité est de 1 m, un convoi de 5 véhicules avec une vitesse maximale de 25 km/h peut être considéré comme sûr. Le tableau 9.7 montre les résultats de vérification pour un convoi de 5 véhicules à 25 km/h, en changeant l'écart longitudinal souhaité

Nombre de véhicules	f_y	écart longitudinal	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2, 3, 4, 5	1	2 m	Infini à 15 m	50	490921	34.76 s	contre-exemple
2, 3, 4, 5	2	2 m	Infini à 15 m	50	490921	26.59 s	contre-exemple
2	3	2 m	Infini à 15 m	50	491308	83.85 s	prouvé
3, 4, 5	3	2 m	Infini à 15 m	50	490921	40.29 s	contre-exemple
3, 4, 5	4	2 m	Infini à 15 m	50	491308	348.27 s	prouvé
2, 3, 4, 5	1	1 m	Infini à 15 m	50	490921	60.19 s	contre-exemple
2, 3, 4, 5	2	1 m	Infini à 15 m	50	490921	91.72 s	contre-exemple
2, 3, 4, 5	3	1 m	Infini à 15 m	50	490921	99.23 s	contre-exemple
2, 3	4	1 m	Infini à 15 m	50	491308	182.63 s	prouvé
4, 5	4	1 m	Infini à 15 m	70	687221	458.56 s	contre-exemple
4, 5	5	1 m	Infini à 15 m	70	687221	491.36 s	contre-exemple
4	6	1 m	Infini à 15 m	70			Pas de réponse
5	6	1 m	Infini à 15 m	70			Pas de réponse

TABLE 9.8 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour le scénario Colonne-cas3.

Les fréquences des oscillations avec un écart longitudinal de 3 m sont montrées dans le tableau 9.4. Avec un écart longitudinal de 2 m, les fréquences maximales des oscillations restent proches de celles obtenues avec un écart longitudinal de 3 m. Des modifications sont aperçues pour le deuxième véhicule, où la fréquence maximale augmente jusqu'à 3 Hz et le troisième véhicule où la fréquence augmente jusqu'à 4 Hz. Avec un écart de 1 m, les fréquences maximales d'oscillations augmentent jusqu'à 4 Hz pour les deuxième et troisième véhicules, et plus de 6 Hz pour les quatrième et cinquième véhicules. Par conséquent, un convoi avec 1 m d'écart longitudinal est considéré comme non-confortable.

9.5 Echelon-cas1

9.5.1 Description du cas

Dans ce cas, on s'intéresse à vérifier un convoi en configuration échelon. L'algorithme de conduite en convoi utilisé correspond à la méthode de véhicule virtuel présentée dans la section 5.4. Echelon-cas1 se déroule avec 3 véhicules, un écart longitudinal entre carrosseries de 3 m, et un écart latéral entre carrosseries de 2 m, et avec une vitesse maximale de 15 km/h. L'objectif est de vérifier la sûreté et le confort de ce type de convoi.

9.5.2 Résultats de vérification de la propriété de sûreté

Cas du mouvement linéaire :

Le tableau 9.9 montre les résultats de vérification avec une configuration en échelon où le véhicule leader suit un trajet linéaire. Comme montre le tableau, un convoi de 3 véhicules qui roule à 15 km/h en configuration échelon, ne montre pas des contre-exemples. On peut donc dire qu'un tel convoi est sûr pour des trajets linéaires.

Propriété à vérifier	Nombre des véhicules	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
$d_y > safetydistance$	2	50	482950	17.63 s	prouvé
	3	50	484753	18.29 s	prouvé
$d_x > safetydistance$	2	50	482950	902.5 s	prouvé
	3	50	484753	907.5 s	prouvé

TABLE 9.9 – Bilan des résultats de vérification pour le scénario Echelon-cas1 pour des mouvements linéaires.

Cas du mouvement circulaire :

Deux mouvements circulaires, avec des rayons de 30 m et de 15 m ont été étudiés. Pour les mouvements circulaires, deux cas se présentent :

- Le cas où le véhicule suiveur est à l'extérieur du virage (cf. figure 9.4) : dans ce cas, pas des contre-exemples rencontrés pour les deux rayons de courbure 30 et 15 m (cf. tableau 9.10).

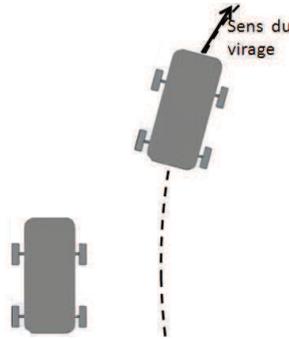


FIGURE 9.4 – Un véhicule suiveur à l'extérieur du virage dans un convoi échelon.

Propriété à vérifier	Nombre de véhicules	Rayon de courbure	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
$d_y > safetydistance$	2	30	25	244090	33.24 s	prouvé
	3	30	25	244090	33.19 s	prouvé
$d_x > safetydistance$	2	30	50	485153	4251 s	prouvé
	3	30	50	485153	2338.32 s	prouvé
$d_y > safetydistance$	2	15	25	244090	39.25 s	prouvé
	3	15	25	244090	24.94 s	prouvé
$d_x > safetydistance$	2	15	50	485153	4067.61 s	prouvé
	3	15	50	485153	2200.46 s	prouvé

TABLE 9.10 – Bilan des résultats de vérification pour le scénario Echelon-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage.

- Le cas où le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage (cf. figure 9.5) : dans ce cas, la

propriété de sûreté n'est plus valide, un contre-exemple est rencontré. Le contre-exemple apparaît lorsqu'en tournant, le véhicule leader décélère. Etant à l'intérieur du virage, le véhicule suiveur doit décélérer plus vite que le leader, sinon une collision risque de se produire. Ce phénomène représente le cas rencontré dans le contre exemple rencontré. Le tableau 9.11 et la figure 9.6 montrent une trace de ce contre-exemple donnée par le model checker.

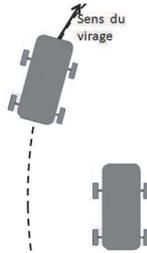


FIGURE 9.5 – Un véhicule suiveur à l'intérieur du virage dans un convoi échelon.

Propriété à vérifier	Nombre de véhicules	Rayon de courbure	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution ¹	Résultat
$d_y > safetydistance$ AND $d_x > safetydistance$	2	30 m	50	489268	13.85 s	Contre-exemple

TABLE 9.11 – Résultats de vérification de Echelon-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'intérieur du virage.

```

1  Vices 1.0.34
2  Counterexemple:
3  -----
4  Path
5  -----
6  Step 0:
7  --- System Variables (assignments) ---
8  DeltaSpeedPre = 3/5000
9  leaderSpeed = 1
10 LateralDistanceEchelon = 2
11 LateralDistance = 0
12 LongitudinalDistance = 3
13 Vx = 0
14 Vy = 1
15 dx = 0
16 dy = 3
17 dz = 0
18 ddx = 3
19 -----
20 .
21 .
22 .
23 -----
24 Step 11:
25 --- System Variables (assignments) ---
26 DeltaSpeedPre = -3/5000
27 leaderSpeed = 2/5
28 LateralDistanceEchelon = -3/1250
29 LateralDistance = 0
30 LongitudinalDistance = 200/100
31 Vx = 0
32 Vy = 0
33 dx = 1/200
34 dy = 203/100
35 dz = -1/200
36 ddx = 197/100
    
```

Le véhicule leader décélère jusqu'à une vitesse de 0.4 m/s. Le véhicule suiveur ne décélère pas assez rapidement. Les écarts latéral et longitudinal sont inférieurs aux distances de sécurité.

FIGURE 9.6 – Contre-exemple produit dans le cas d'un convoi en configuration échelon. Lorsque le véhicule leader tourne sur un cercle de rayon de 20 m. Le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage.

9.5.3 Résultats de vérification de la propriété de confort

Le tableau 9.12 montre les fréquences maximales des oscillations de l'écart longitudinal. Pour les trajets non linéaires, le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage.

Nombre de véhicules	f_y	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2, 3	1	Infini à 15 m	50	492679	86.14 s	contre-exemple
2	2	Infini à 15 m	50	493061	385.61 s	prouvé
3	2	Infini à 15 m	50	492679	90.13 s	contre-exemple
3	3	Infini à 15 m	50	493061	126.11 s	prouvé

TABLE 9.12 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour l'écart longitudinal pour le scénario Echelon-cas1.

Le tableau 9.12 montre que la fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal est toujours inférieure ou égale à 3 Hz. Elle est de l'ordre de 2 Hz, pour le deuxième véhicule du convoi et de 3 Hz pour le troisième. Par conséquent, un convoi échelon de 3 véhicules à 15 km/h est considéré comme confortable.

Pour les cas où le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage, la fréquence d'oscillation augmente jusqu'à plus de 5 Hz pour le deuxième véhicule. Ces cas sont considérés comme non-confortables.

9.6 Ligne-cas1

9.6.1 Description du cas

Dans ce cas, on s'intéresse à vérifier un convoi en configuration ligne. Comme dans le cas de la configuration échelon, l'algorithme de conduite en convoi utilisé correspond à la méthode de véhicule virtuel présentée dans la section 5.4. Ce cas étudie un convoi de 3 véhicules, qui roule à une vitesse maximale de 15 km/h. L'écart longitudinal souhaité est de 0 m, l'écart latéral souhaité est de 2 m. L'objectif est de vérifier la sûreté et le confort dans le fonctionnement de ce type de convoi.

9.6.2 Résultats de vérification de la propriété de sûreté

Cas du mouvement linéaire :

Le tableau 9.13 montre les résultats de simulation avec une configuration en ligne où le véhicule leader suit un trajet linéaire. Le tableau montre qu'il n'y a pas de contre-exemple rencontré pour ce type de trajet. Un convoi de 3 véhicules en configuration ligne, et qui roule à 15 km/h sur un trajet linéaire est considéré comme sûr.

Nombre de véhicules	Rayon de courbure	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2	Infini	50	483753	1095 s	prouvé
3	Infini	50	483753	1099.36 s	prouvé

TABLE 9.13 – Bilan des résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1, dans le cas où le véhicule leader suit un trajet linéaire.

Cas du mouvement circulaire :

Pour les mouvements circulaires d'un convoi en configuration ligne, deux cas se présentent :

- Le cas où le véhicule suiveur est à l'extérieur du virage (cf. figure 9.7) : le tableau 9.14 récapitule les résultats obtenus pour ce cas de vérification pour deux rayons de courbure 30 m et 15 m. Le tableau montre qu'il n'y a pas de contre exemple rencontré, donc pas de collision.

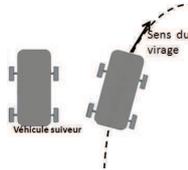


FIGURE 9.7 – Un véhicule suiveur à l'extérieur du virage dans un convoi ligne.

Nombre de véhicule	Rayon de courbure	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2	30 mètres	50	484153	539 s	prouvé
3	30 mètres	50	484153	533.96 s	prouvé
2	15 mètres	50	483546	541.37 s	prouvé
3	15 mètres	50	484153	540.09 s	prouvé

TABLE 9.14 – Bilan des résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1, dans le cas où le véhicule leader suit un trajet linéaire.

- Le cas où le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage (cf. figure 9.8) : dans ce cas, la propriété de sûreté n'est plus valide, un contre-exemple est rencontré. Le tableau 9.15 et la figure 9.9 montrent une trace de ce contre-exemple donnée par le model checker.

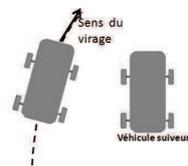


FIGURE 9.8 – Un véhicule suiveur à l'intérieur du virage dans un convoi ligne.

Nombre de véhicules	Rayon de courbure	Profondeur	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2	30 m	50	484153	49.3 s	Contre-exemple

TABLE 9.15 – Résultats de vérification pour le scénario Ligne-cas1. Le véhicule leader tourne avec un rayon de courbure précis. Le véhicule suiveur est placé à l'intérieur du virage.

```

1  Yices 1.0.34
2  Counterexample{
3  =====
4  Path
5  =====
6  Step 0:
7  --- System Variables (assignments) ---
8  leaderSpeed = 1
9  lateralDistance = 0
10 lateralDistanceLigne = 2
11 longitudinalDistance = 3
12 longitudinalDistanceLigne = 0
13 Vx = 7/100
14 Vy = 99/100
15 dx = 0
16 dy = 3
17 d2x = 0
18 d2y = 3
19 -----
20 .
21 .
22 .
23 -----
24 Step 21:
25 --- System Variables (assignments) ---
26 DeltaSpeedPre = -693/290000
27 leaderSpeed = 0
28 lateralDistance = 0
29 lateralDistanceLigne = -8613047531/2900000
30 longitudinalDistance = 0
31 longitudinalDistanceLigne = 5909501/2900000
32 Vx = 0
33 Vy = 1
34 dx = 1/200
35 dy = 20449/10000
36 d2x = -1/200
37 d2y = 4963/2500
    
```

Le véhicule leader décélère jusqu'à une s'arrêter. Le véhicule suiveur ne décélère pas assez rapidement. Les écarts latéral et longitudinal sont inférieurs aux distances de sécurités.

FIGURE 9.9 – Contre-exemple produit dans le cas d'un convoi ligne. Lorsque le véhicule leader tourne sur un cercle de rayon de 30 mètres. Le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage.

9.6.3 Résultats de vérification de la propriété de confort

Le tableau 9.16 montre les fréquences maximales des oscillations de l'écart longitudinal. Pour les trajets non linéaires, le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage.

Nombre de véhicules	f_y	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des nœuds explorés	Temps d'exécution	Résultat
2, 3	1	Infini à 15 m	50	493681	11.89 s	contre-exemple
2	2	Infini à 15 m	50	494058	4317.97 s	prouvé
3	2	Infini à 15 m	50	493681	5206.67 s	contre-exemple
3	3	Infini à 15 m	50	494058	7102.25 s	prouvé

TABLE 9.16 – Bilan des résultats de vérification de la propriété de confort pour l'écart longitudinal pour le scénario Ligne-cas1.

Le tableau 9.16 montre que la fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal est toujours inférieure ou égale à 3 Hz. Elle est de l'ordre de 2 Hz, pour le deuxième véhicule du convoi et de 3 Hz pour le troisième. Un convoi ligne de 3 véhicules à 15 km/h est donc considéré comme

confortable.

Pour les cas où le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage, les fréquences des oscillations sont plus grandes que 5 Hz. Ces cas sont considérés comme non-confortables.

9.7 Synthèse des résultats

Les résultats présentés dans les paragraphes 9.2, 9.3 et 9.4 permettent de déduire les limites de fonctionnement d'un convoi en configuration colonne, qui utilise l'approche locale et le modèle d'interaction des deux ressorts.

Le scénario Colonne-cas1 permet de déduire qu'un convoi qui roule à 25 km/h reste sûr (pas de risque de collision) jusqu'à une taille de 12 véhicules. Par contre, à partir du neuvième véhicule le convoi est considéré comme moins confortable.

Le scénario Colonne-cas2 permet de déduire qu'un convoi de 5 véhicules reste sûr et confortable jusqu'à une vitesse inférieure à 45 km/h. A partir d'une vitesse de 45 km/h, un risque de collision entre le quatrième et le cinquième véhicules apparaît. Le convoi est aussi considéré comme moins confortable à 45 km/h qu'à des vitesses inférieures.

Le scénario Colonne-cas3 permet de déduire qu'un convoi de 5 véhicules roulant à 25 km/h reste sûr et confortable jusqu'à un écart longitudinal de 1 m. A partir de cet écart, des risques de collision apparaissent, et le convoi est considéré comme non-confortable, même pour un convoi de deux véhicules.

Le tableau 9.17 récapitule les résultats obtenus pour une configuration colonne.

Nombre des véhicules	Vitesse	Ecart longitudinal	Sûr	Confortable
2 à 9	25 km/h	3 m	oui	oui
9 à 12	25 km/h	3 m	oui	Non
≥ 13	25 km/h	3 m	Non	Non
2 à 5	< 45 km/h	3 m	oui	oui
2 à 5	≥ 45 km/h	3 m	Non	Non
2 à 5	25 km/h	> 1 m	oui	oui
2 à 5	25 km/h	≤ 1 m	Non	Non

TABLE 9.17 – Tableau récapitulatif des résultats de vérification de la propriété de sûreté et de la propriété de confort.

Dans les paragraphes 9.5 et 9.6, nous avons étudié la sûreté et le confort d'un convoi de 3 véhicules, qui roule à 15 km/h avec des configurations échelon et ligne. La sûreté et le confort de ces convois sont prouvés dans les cas des mouvements linéaires. Pour les cas des mouvements circulaires, les propriétés ont été validées uniquement dans les cas où le véhicule suiveur est à l'extérieur du virage.

Chapitre 10

Configuration colonne : simulations et expérimentations

10.1 Introduction

Nous avons défini, dans le chapitre 4 de la partie I, une approche locale pour la conduite autonome en convoi, basée sur l'utilisation d'un modèle d'interaction inspiré de la physique. Le but de ce chapitre est d'évaluer la qualité de cette approche en étudiant les deux indicateurs : l'écart longitudinal et le bon suivi du trajet (détaillé dans le chapitre 8). Cette évaluation passe par deux étapes, une étape de simulation donnant une première idée sur le comportement du convoi, et une étape d'expérimentation montrant le comportement réel du convoi.

Le chapitre est structuré comme suit : la section 10.2 montre le protocole ainsi que les résultats de simulation. La section 10.3 présente le protocole et les résultats d'expérimentation. Un bilan des résultats des simulations et des expérimentations est dressé dans la section 10.4. La section 10.5 montre une étude sur l'effet de la force inertielle du leader local, produite lors des mouvements transitoires (cf. section 4.4).

10.2 Les simulations

Cette section montre le protocole ainsi que les résultats de simulation. Les simulations sont réalisées avec le simulateur VIVUS. Elles évaluent les deux indicateurs : écart longitudinal et bon suivi du trajet (cf. chapitre 8).

10.2.1 Protocole de simulation

Les simulations sont réalisées sur un modèle 3D du site Technopole de la ville de Belfort.

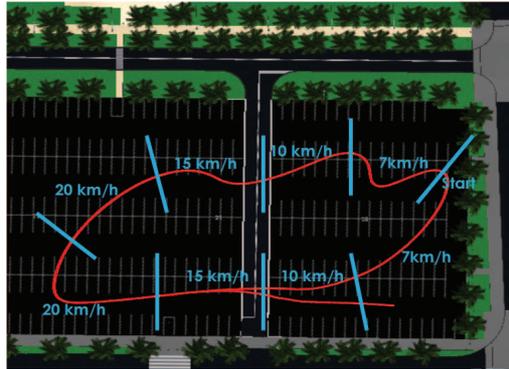


FIGURE 10.1 – Circuit suivi durant les simulations.

La figure 10.1 présente le circuit utilisé pour les simulations. A chaque partie du circuit est associée une vitesse différente. Ceci permet de tester le convoi avec des vitesses différentes et avec des rayons de courbures différents. Ce chemin nous permet aussi d'étudier l'influence de la vitesse et du rayon de courbure sur la qualité du suivi du trajet.

Des premiers tests montrent des simulations d'un convoi de trois véhicules. Dans le but d'étudier la propagation de l'erreur dans le convoi, nous montrons aussi des simulations produites par un convoi de dix véhicules. Nous dressons ensuite une comparaison entre les résultats produits par chacun des deux convois. Le tableau 10.1 récapitule les paramétrages utilisés pendant les simulations.

Masse de la voiture	500 kg
Inter-distance souhaitée	3 m
Distance de sécurité	1 m
Décélération minimale	-3 m/s^2
Accélération maximale	3 m/s^2
Vitesse maximale	40km/h

TABLE 10.1 – Paramètres utilisés lors de la simulation des convois.

L'accélération et la décélération maximales choisies correspondent à celles des véhicules utilisés lors des expérimentations.

10.2.2 Évaluation par simulation de l'écart longitudinal

Cette section présente les résultats de l'évaluation de l'écart longitudinal par simulation d'un convoi de trois véhicules. Pour étudier la propagation de l'erreur longitudinale, nous montrons aussi les résultats de simulation pour un convoi de dix véhicules.

Convoi de trois véhicules

La figure 10.2 montre l'évolution de l'écart longitudinal pour un convoi de trois véhicules, qui répète plusieurs fois (6 fois) le trajet de la figure 10.1. Dans ce qui suit, la ligne continue (bleue) représente l'écart longitudinal entre le premier et le deuxième véhicule. La ligne discontinue (rouge) représente l'écart longitudinal entre le deuxième et le troisième véhicule.

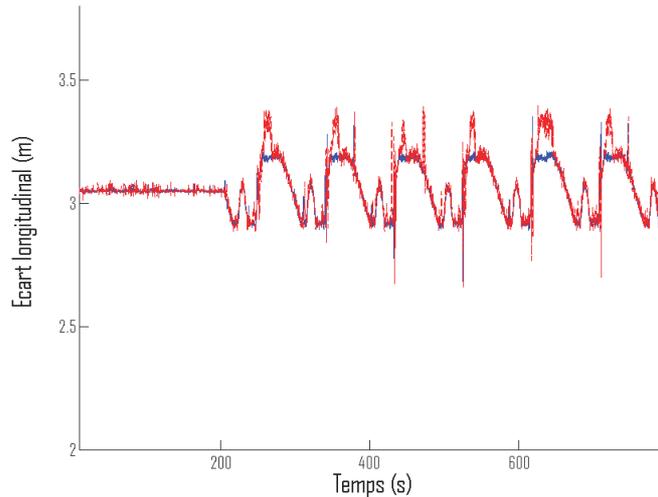


FIGURE 10.2 – Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules.

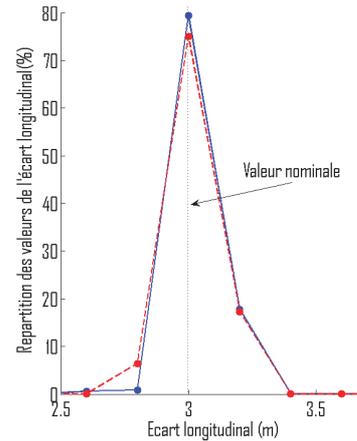


FIGURE 10.3 – Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules.

La figure 10.1 montre que pour un écart longitudinal nominal de 3 m, l'erreur entre le premier et le deuxième véhicule ne dépasse pas les 20 cm, et l'erreur entre le deuxième et le troisième véhicule ne dépasse pas les 30 cm. L'écart longitudinal est toujours au dessus de la distance de sécurité, ce qui indique qu'il n'y a pas de collision entre les véhicules du convoi. La figure 10.3 montre la répartition de l'écart longitudinal durant 15 minutes de circulation. Ce graphe montre que toutes les valeurs de l'écart longitudinal sont entre 2.7 m et 3.3 m. Plus de 75% des valeurs obtenues sont égales à la valeur nominale de l'écart longitudinal.

L'erreur maximale correspondant à 30 cm est rencontrée lors des variations de la vitesse du leader local. Nous remarquons que cette erreur diminue après la stabilisation de la vitesse du leader local. Ce phénomène est lié au fait que pour le calcul de sa consigne de vitesse, le véhicule suiveur doit connaître l'accélération/décélération de son leader local. Cette dernière est estimée en fonction des perceptions et de la variation de la distance perçue (cf. section 4.4.2). Par conséquent, l'augmentation/diminution de l'écart longitudinal est due au temps nécessaire avant que l'accélération/décélération du leader local soit prise en compte.

Convoi de dix véhicules

Pour étudier la propagation de l'erreur en écart longitudinal, nous répétons les mêmes tests avec un convoi de dix véhicules. La figure 10.4 montre l'évolution de l'écart longitudinal pour un convoi de dix véhicules, qui répète plusieurs fois (6 fois) le trajet de la figure 10.1.

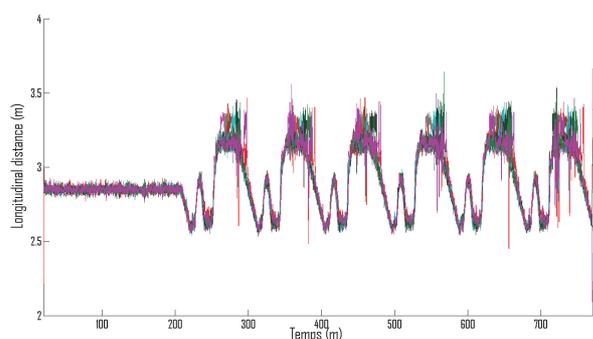


FIGURE 10.4 – Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules.

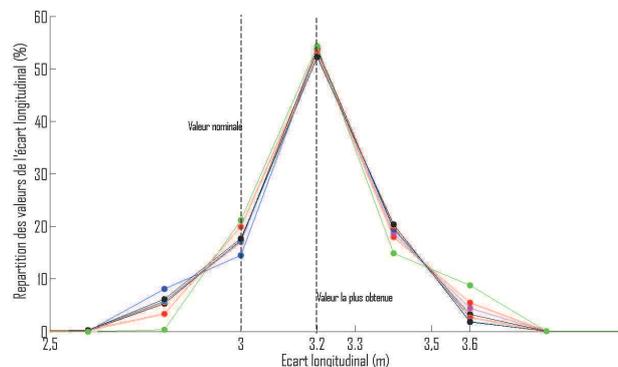


FIGURE 10.5 – Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules.

La figure 10.4 montre que l'erreur moyenne est de 20 cm et l'erreur maximale est de 60 cm. Comme dans les cas d'un convoi de trois véhicules, l'erreur maximale est rencontrée avec la variation de la vitesse du convoi. L'écart longitudinal reste toujours au dessus de la distance de sécurité. La figure 10.5 montre la répartition des valeurs obtenues pour l'écart longitudinal durant 15 minutes de circulation. Ce graphe montre que toutes les valeurs obtenues sont entre 2.7 m et 3.6 m. Les graphes confondus de la figure 10.5 montrent que les véhicules du convoi possèdent des comportements très proches.

Bilan des résultats obtenus pour l'évaluation de l'écart longitudinal

Les erreurs maximales de l'écart longitudinal atteignent les 30 cm dans les cas d'un convoi de trois véhicules et 60 cm dans les cas d'un convoi de dix véhicules. Ces erreurs sont obtenues avec les variations de la vitesse du convoi. Elles sont dues à la connaissance locale du véhicule suiveur et au délai nécessaire avant la prise en compte des variations.

Le tableau 10.2 montre la propagation de l'erreur longitudinale. Cette propagation peut être considérée comme négligeable dans les cas des mouvements uniformes : l'erreur avec dix véhicules ne dépasse pas les 20 cm. La propagation de cette erreur devient plus importante avec les changements de vitesse du convoi. L'erreur passe de 20 cm entre les deux premiers véhicules pour atteindre 60 cm entre le neuvième et le dixième véhicules. Ce phénomène résulte du fait qu'il y a un délai de temps nécessaire avant que le véhicule suiveur prenne en compte la variation de la vitesse du convoi. Comme dans notre approche, chaque véhicule s'asservit sur son prédécesseur, le délai requis par un véhicule "i" pour prendre en compte la variation de la vitesse du convoi, est plus important que le délai requis par le véhicule "i-1".

	Entre premier et deuxième véhicules	Entre deuxième et troisième véhicules	Entre neuvième et dixième véhicules
Erreur moyenne	10 cm	15 cm	20 cm
Erreur maximale	20 cm	35 cm	60 cm

TABLE 10.2 – Propagation de l’erreur longitudinale.

10.2.3 Evaluation du suivi de trajet

Cette section présente les résultats de l’évaluation de la qualité de suivi de trajet pour des convois de trois véhicules et dix véhicules. Pour le faire nous évaluons les écarts entre les trajets suivis par les véhicules. Les véhicules suivent une trajectoire qui commence par une partie linéaire sur 500 m suivie par le trajet de la figure 10.1.

Convoi de trois véhicules

La figure 10.6 représente les traces suivies par chacun des trois véhicules. La trace continue (bleue) correspond au trajet de leader global, la trace discontinue (rouge) correspond au trajet du premier suiveur, et la trace pointillée (noire) correspond au trajet du deuxième suiveur). La figure 10.7 montre les écarts entre les trajets sur les points désignés dans la figure 10.6. Les croix (bleues) montrent les écarts entre le trajet du véhicule leader global et le trajet du premier suiveur. Les ronds (rouges) montrent les écarts entre les trajets des deux suiveurs.

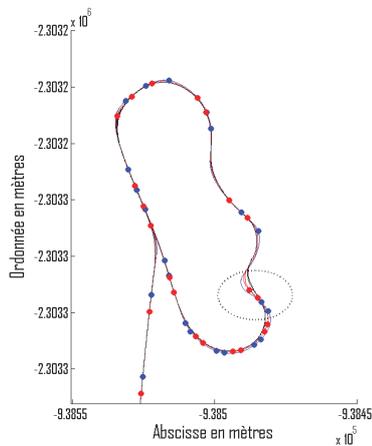


FIGURE 10.6 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules.

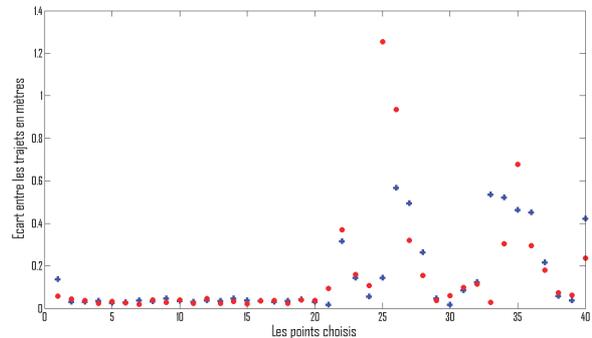


FIGURE 10.7 – Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules.

Les deux figures, 10.6 et 10.7, montrent que pour les points de 1 à 15 correspondant au trajet linéaire, l’écart entre les trajets ne dépassent pas les 10 cm (largeur d’un pneu). Pour les trajets non linéaires, les écarts entre les trajets augmentent pour avoir une moyenne de 30

cm, et un maximum de 60 cm entre le premier et le deuxième véhicules, et de 80 cm entre le deuxième et le troisième véhicules. La zone encadrée sur la figure 10.6, montre la partie de la trajectoire qui a produit les écarts les plus élevés.

Le tableau 10.3 récapitule la variation de l'erreur latérale en fonction du rayon de courbure.

Points	Rayon de courbure	Erreur latérale entre premier et deuxième véhicule	Erreur latérale entre deuxième et troisième véhicule
P1	15 m	10 cm	15 cm
P2	45 m	5 cm	5 cm
P3	6	23 cm	32 cm
P4	3	60 cm	80 cm

TABLE 10.3 – variation de l'erreur latérale en fonction du rayon de courbure.

Ce tableau permet de déduire que l'erreur latérale maximale est produite avec le rayon de courbure le plus petit (4.5 m).

Convoi de dix véhicules

La figure 10.8 montre les traces suivies par un convoi de dix véhicules. La figure 10.9 montre les valeurs des écarts obtenus. Les croix (bleues) représentent les écarts entre le trajet du leader global et le trajet du premier suiveur. Les ronds (rouges) représentent les écarts entre les deux derniers suiveurs.

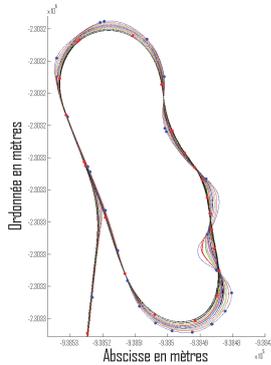


FIGURE 10.8 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de dix véhicules.

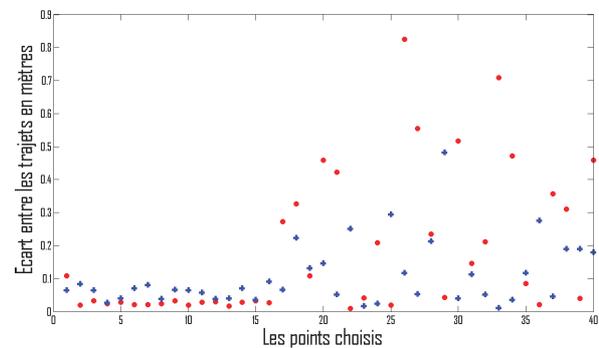


FIGURE 10.9 – Ecarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de dix véhicules.

Les deux figures montrent, que pour les 15 premiers points correspondant au trajet linéaire, l'écart entre les deux trajets ne dépasse pas les 10 cm. Pour les trajets contenant des virages, les écarts entre les trajets augmentent, pour atteindre un maximum de 50 cm entre le premier et le deuxième véhicule, et de 85 cm entre les deux derniers véhicules suiveurs.

Bilan des résultats obtenus pour l'évaluation du suivi de trajet

Le tableau 10.4 récapitule les écarts obtenus entre les trajets pour des convois de trois et dix véhicules. Les résultats obtenus permettent de dire que la propagation de l'erreur est négligeable. L'erreur maximale pour un trajet de trois véhicules est de 80 cm, et l'erreur maximale pour un trajet de 10 véhicules est de 85 cm.

	Entre premier et deuxième véhicules	Entre deuxième et troisième véhicules	Entre neuvième et dixième véhicules
Erreur dans les trajets linéaires	≤ 10 cm	≤ 10 cm	≤ 10 cm
Erreur moyenne dans les virages	30 cm	35 cm	35 cm
Erreur maximale dans les virages	60 cm	80 cm	85 cm

TABLE 10.4 – Propagation de l'erreur de suivi de trajet.

En comparant les résultats de suivi de trajet avec d'autres approches comme [CGGK11] et [DP96], on peut constater que le modèle de deux ressorts a réduit significativement l'erreur produite dans les virages. Cependant, des erreurs de suivies sont toujours présentes surtout avec les petits rayons de courbure.

10.3 Les expérimentations

Dans cette section, nous exposons le protocole ainsi que les résultats d'expérimentation. Les expérimentations sont réalisées avec les véhicules GEM (cf. chapitre 8 et Annexe B). Elles évaluent les deux indicateurs : écart longitudinal et le bon suivi du trajet (cf. chapitre 8).

10.3.1 Protocole d'expérimentation



FIGURE 10.10 – Trajet suivi durant les expérimentations.

Les expérimentations sont faites sur le site de Technopole. Le véhicule leader global est conduit manuellement, le trajet suivi est celui montré en noir dans la figure 10.10. La vitesse du véhicule leader varie de 8 km/h à 15 km/h. Ce trajet permet d'évaluer l'influence de la vitesse et des rayons de courbure sur la qualité du convoi.

Les expérimentations sont faites avec des convois de deux véhicules de type GEM. Le tableau 10.5 récapitule les paramétrages utilisés pendant les expérimentations.

Masse de la voiture	500 kg
Inter-distance souhaitée	4 m
Distance de sécurité	2 m
Décélération minimale	-3 m/s ²
Accélération maximale	3 m/s ²
Vitesse maximale	15 km/h

TABLE 10.5 – Paramètres utilisés lors des expérimentations.

10.3.2 Evaluation par expérimentation de l'écart longitudinal

La figure 10.11 montre l'évolution de l'écart longitudinal pendant les expérimentations. Ce graphe montre que pour un écart souhaité de 4 m, l'écart longitudinal varie entre un minimal de 3 m et un maximal de 5 m, mais reste toujours au delà de la distance de sécurité. L'erreur moyenne est de 40 cm. L'erreur maximale atteint le 1 m.

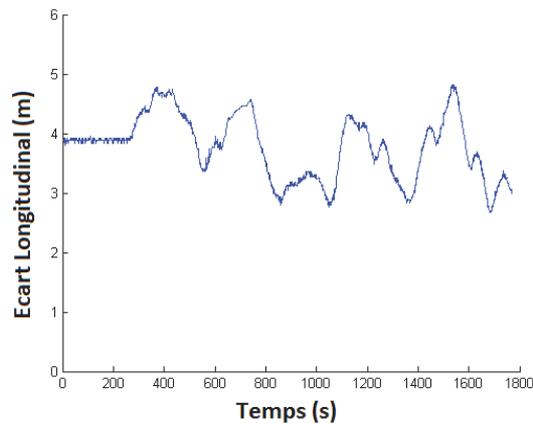


FIGURE 10.11 – Evolution de l'écart longitudinal lors des expérimentations.

L'erreur longitudinale en expérimentation est plus élevée que celle produite en simulation : l'erreur moyenne en simulation est de 20 cm, tandis que, en expérimentation elle est de 40 cm. Cette augmentation est due au délai de réponse nécessaire par la micro-autobox utilisée et aux paramètres qui ne sont pas pris en compte dans les simulations : effet des batteries déchargées, effet des pneus usés, défaut de perception,...

10.3.3 Evaluation par expérimentation du suivi de trajet

La figure 10.12 montre les traces des deux véhicules lorsqu'ils suivent un trajet ne contenant pas des virages avec des petits rayons de courbure. La trace du véhicule leader est représentée par la ligne bleue discontinue, celle du véhicule suiveur est représentée par la ligne rouge continue. La figure 10.13 montre l'écart entre les deux trajets, sur les points montrés sur la figure 10.12. L'erreur moyenne est de 20 cm, l'erreur maximale est de 30 cm.

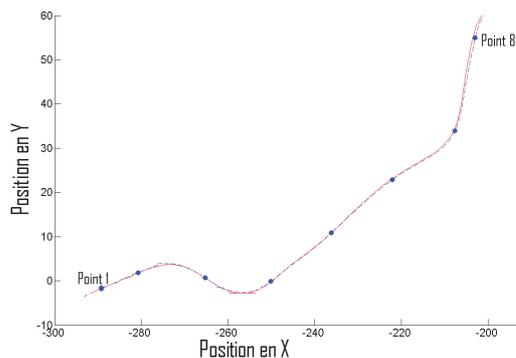


FIGURE 10.12 – Traces suivies par les véhicules durant leurs mouvements.

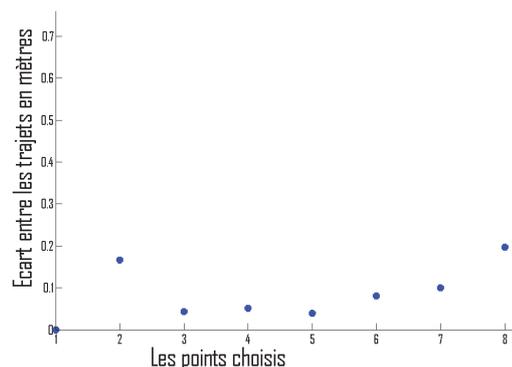


FIGURE 10.13 – Ecarts entre les trajets des véhicules.

La figure 10.14 montre les traces GPS suivies par les deux véhicules, en suivant le trajet de la figure 10.10. La figure 10.15 montre les écarts entre les trajets pour les points choisis sur la figure 10.14.

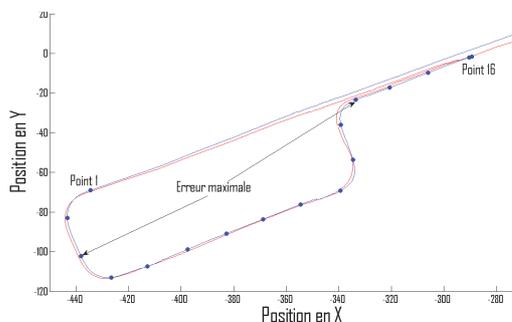


FIGURE 10.14 – Traces suivies par les véhicules durant leurs mouvements.

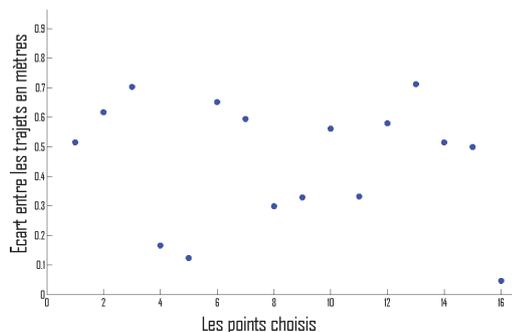


FIGURE 10.15 – Ecarts entre les trajets des véhicules.

La figure 10.14 montre que l'erreur moyenne est de 40 cm, cette erreur peut augmenter jusqu'à 70 cm dans les cas des virages avec des petits rayons de courbure.

Les résultats de suivi de trajet obtenus par expérimentations sont très proches de ceux obtenus par simulations. Ces résultats peuvent être considérés comme correctes comparés à d'autres approches décentralisées, qui utilisent le principe d'asservissement sur un leader local.

10.4 Bilan des résultats

Les tableaux 10.6 et 10.7 récapitulent les erreurs longitudinales, obtenues par : (1) Simulation d'un convoi de trois véhicules. (2) Simulation d'un convoi de dix véhicules. (3) Expérimentation avec un convoi de deux véhicules.

10.4.1 Bilan d'évaluation de l'écart longitudinal

Pour l'écart longitudinal entre les véhicules, nous pouvons observer que, cet écart est toujours au delà de la distance de sécurité, ce qui indique qu'il n'y a pas de risque de collision entre deux véhicules suiveurs.

	Erreur moyenne	Erreur maximale	présence d'une collision
Simulation d'un convoi de trois véhicules	15 cm	30 cm	Non
Simulation d'un convoi de dix véhicules	25 cm	60 cm	Non
Expérimentation d'un convoi de deux véhicules	40 cm	1 m	Non

TABLE 10.6 – Récapitulatif de l'erreur longitudinal.

L'erreur longitudinale obtenue par les expérimentations est plus importante que celle obtenue par les simulations. Ceci est dû à plusieurs raisons. D'abord, le délai de temps nécessaire par la micro-autobox pour l'application de la commande sur le véhicule. Deuxièmement, le temps de réaction du véhicule, qui n'est pas toujours le même. Nous avons remarqué que le comportement du véhicule électrique peut varier selon plusieurs critères : l'état de la charge de la batterie du véhicule, l'état des pneus utilisés Troisièmement, la perception qui n'est pas toujours idéale. Comme on utilise des télémètres laser qui détectent des bandes réfléchissantes, ces derniers peuvent parfois envoyer des données erronées en réfléchissant un objet brillant autre que les trois bandes.

10.4.2 Bilan d'évaluation de l'erreur de suivi de trajet

Pour l'erreur de suivi, le tableau 10.7 nous permet de déduire que les résultats obtenus par expérimentations sont très proches de ceux obtenus par simulations. En ce qui concerne la propagation de l'erreur, elle peut être considérée comme négligeable : l'erreur maximale passe de 80 cm pour un convoi de trois véhicules à 85 cm pour un convoi de dix véhicules.

	Erreur maximale en trajet linéaire	Erreur moyenne en trajet avec courbe	Erreur maximale en trajet avec courbe
Simulation d'un convoi de trois véhicules	10 cm	30 cm	80 cm
Simulation d'un convoi de dix véhicules	10 cm	35 cm	85 cm
Expérimentation d'un convoi de deux véhicules	20 cm	45 cm	75 cm

TABLE 10.7 – Récapitulatif de l'erreur de suivi de trajet.

10.5 Evaluation de l'effet de la force inertielle

Nous avons montré dans la section 4.4.2 que, pour calculer ses consignes de vitesse et d'orientation dans un régime transitoire, le véhicule suiveur doit prendre en compte la force inertielle produite par le référentiel associé à son leader local. Nous désirons, dans cette section, étudier l'effet de cette force inertielle, qui a souvent été négligée dans des travaux de recherche comme [CGGK11, YC05], qui étudient la prise de décision pour les convois de véhicules, basée sur des approches décentralisées avec asservissement sur leader local.

La section 10.2 a montré les résultats des simulations des convois qui utilisent le modèle d'interaction proposé dans le chapitre 4, en prenant en compte l'effet de la force inertielle. Dans cette section, les mêmes tests des sections 10.2.2 et 10.2.3 sont répétés, sans prendre en compte la force inertielle du leader local. Pour chacun des tests, une comparaison est établie pour étudier l'effet de cette force.

10.5.1 Effet sur l'écart longitudinal

Nous évaluons dans ce paragraphe, les écarts longitudinaux obtenus pour des convois de trois et dix véhicules sans prendre en compte la force inertielle associée au véhicule leader local.

Convoi de trois véhicules

La figure 10.16 montre l'évolution de l'écart longitudinal pour un convoi de trois véhicules, qui répète plusieurs fois (6 fois) le trajet de la figure 10.1. La ligne continue (bleue) représente l'écart longitudinal entre le premier et le deuxième véhicules. La ligne discontinue (rouge) représente l'écart longitudinal entre le deuxième et le troisième véhicules. La figure 10.16 montre que pour un écart longitudinal nominal de 3 m, l'erreur moyenne est de 30 cm entre le premier et le deuxième véhicules, et de 35 cm entre le deuxième et le troisième véhicules.

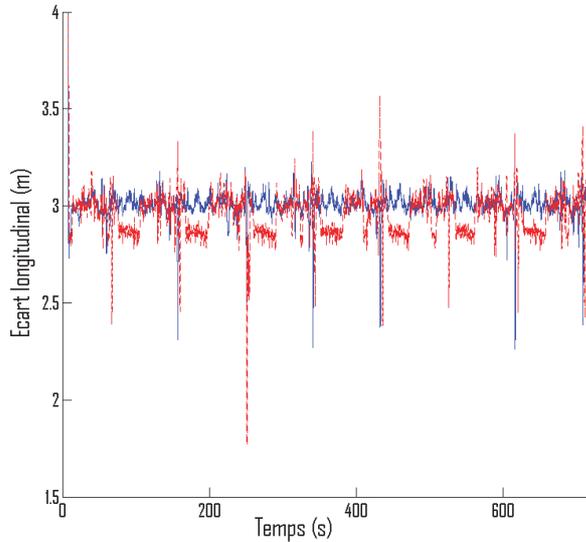


FIGURE 10.16 – Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de trois véhicules, sans considération de l'effet inertiel.

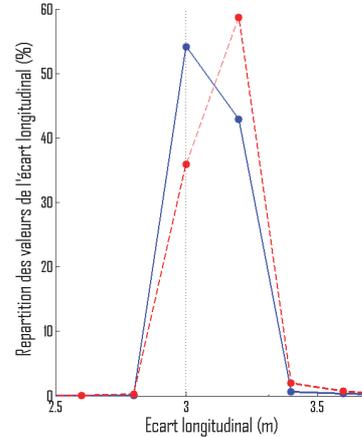


FIGURE 10.17 – Répartition de l'écart longitudinal pour un convoi de trois véhicules, sans considération de l'effet inertiel.

La figure 10.17 montre la répartition de l'écart longitudinal durant 15 minutes de circulation. Ce graphe montre que toutes les valeurs de l'écart longitudinal sont entre 2.7 m et 3.3 m. Entre le leader global et le premier véhicule, 55% des valeurs obtenues sont égales à la valeur souhaitée. Entre les deux véhicules suivants, la plupart des valeurs (57 %) sont égales à 3,2 m, ce qui correspond à une erreur de 20 cm.

En comparant ces deux graphes avec les résultats obtenus dans les figures 10.2 et 10.3, où la force inertielle est prise en compte, nous constatons que :

1. Les erreurs moyennes et maximales produites pour l'écart longitudinal dans les deux cas sont très proches. Cependant, en prenant en compte la force inertielle, plus de 75% des valeurs de l'écart longitudinal sont égales à la valeur nominale, tandis que, pour les cas où la force inertielle n'est pas prise en compte, ce pourcentage ne dépasse pas le 55% entre les deux premiers véhicules, et le 35% entre le deuxième et le troisième.
2. Le graphe 10.16 montre une fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal, plus importante que la figure 10.2. C'est à dire que les écarts longitudinaux varient, en fonction de temps, dans 10.16 plus que dans 10.2, ce qui peut influencer sur le confort des passagers dans le convoi.

Convoi de dix véhicules

La figure 10.18 montre l'évolution de l'écart longitudinal pour un convoi de dix véhicules, qui répète plusieurs fois le trajet de la figure 10.1.

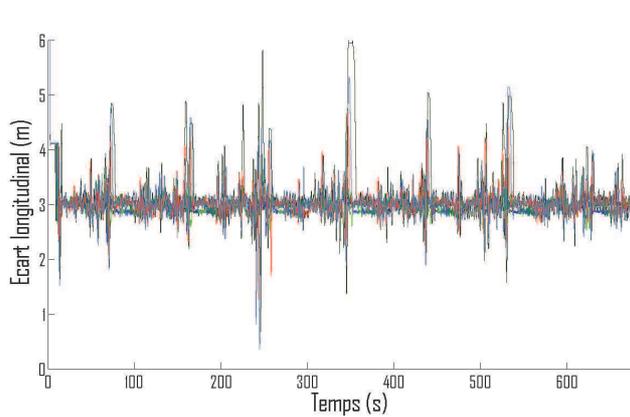


FIGURE 10.18 – Variation de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules, sans prise en compte de l'effet inertiel.

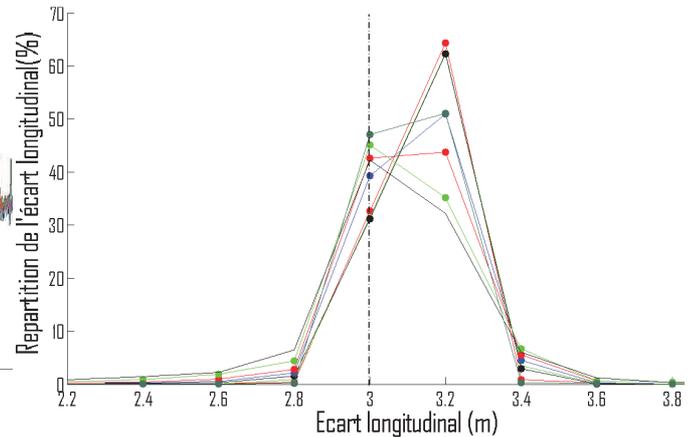


FIGURE 10.19 – Répartition de la distance inter-véhicule pour un convoi de dix véhicules, sans prise en compte de l'effet inertiel.

Cette figure montre que l'erreur moyenne pour l'écart longitudinal est de 50 cm. L'erreur maximale augmente avec l'augmentation des nombres des véhicules. Elle devient supérieure à 70 cm à partir du sixième véhicule. Les neuvième et dixième véhicules montrent des comportements incorrects, l'erreur de l'écart longitudinal peut atteindre des valeurs supérieures à 2 m, et par suite l'écart longitudinal produit prend une valeur inférieure à la distance de sécurité. La figure 10.19 montre la répartition des valeurs obtenues pour l'écart longitudinal. En comparant cette figure avec la figure 10.5, on peut remarquer que les courbes obtenues dans 10.19, ne sont pas confondues, comme dans la figure 10.5. Ceci indique que les véhicules ne produisent pas les mêmes comportements.

La comparaison des deux graphes 10.18 et 10.4, montre que, si la force inertielle n'est pas prise en compte, l'erreur longitudinale augmente ainsi que la fréquence d'oscillation de cet écart. Les cas où la force inertielle n'est pas prise en compte ont présenté un risque de collision à partir du huitième véhicule.

En considérant la force inertielle produite par le leader local, non seulement l'erreur en écart longitudinal diminue considérablement, mais aussi la propagation de cette erreur d'un véhicule à un autre diminue. Le convoi de véhicule peut être considéré comme plus confortable, la fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal est moins élevée dans les cas où la force inertielle

est considérée.

10.5.2 Effet sur le suivi de trajet

Cette section présente les résultats obtenus pour le suivi de trajet, sans la prise en compte de l'effet de la force inertielle.

Convoi de trois véhicules

La figure 10.20 montre les traces suivies par chacun des trois véhicules. La trace continue (bleue) correspond au trajet de leader global, la trace discontinue (rouge) correspond au trajet du premier suiveur, et la trace pointillée (noire) correspond au trajet du deuxième suiveur. La figure 10.21 montre les écarts entre les trajets sur les points désignés dans la figure 10.20. Les croix (bleues) montrent les écarts entre le trajet du véhicule leader global et le trajet du premier suiveur. Les ronds (rouges) montrent les écarts entre les trajets des deux suiveurs.

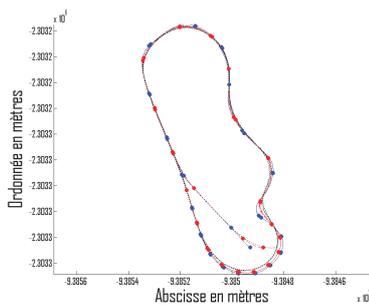


FIGURE 10.20 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.

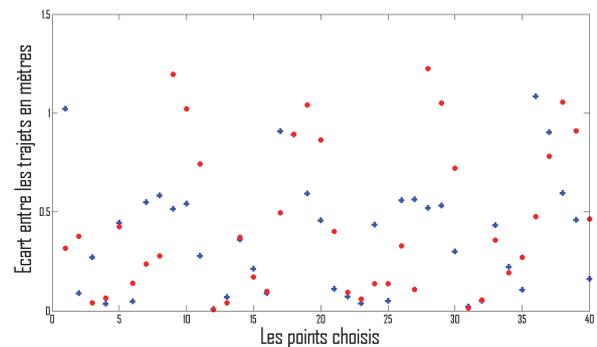


FIGURE 10.21 – Écarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.

Les deux figures, 10.20 et 10.21, montrent qu'entre le véhicule leader et le premier suiveur l'erreur moyenne de suivi de trajet est de 20 cm. Or, entre les deux véhicules suiveurs, l'erreur moyenne est de 50 cm. Cette erreur augmente pour dépasser dans certains cas le 1 m.

En comparant ces résultats avec les résultats obtenus dans les cas où la force inertielle du véhicule leader local n'est pas prise en compte (figures 10.20 et 10.7), nous constatons que l'erreur en suivi de trajet diminue significativement lors de la prise en compte de l'effet inertiel, surtout dans les cas des trajets avec des courbes, où l'erreur ne dépasse pas les 80 cm dans les cas de

prise en compte de la force inertielle, alors qu'elle dépasse le 1 m dans le cas de la non prise en compte de cette force.

Convoi de dix véhicules

Pour étudier l'effet de la force inertielle sur la propagation de l'erreur de suivi du trajet, nous étudions cette erreur pour un convoi de dix véhicules.

La figure 10.22 montre les traces suivies par un convoi de dix véhicules. La figure 10.23 montre les valeurs des écarts obtenus. Les croix (bleues) représentent les écarts entre le trajet du leader global et le trajet du premier suiveur. Les ronds (rouges) représentent les écarts entre le neuvième et dixième véhicules.

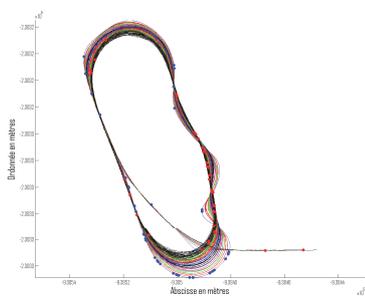


FIGURE 10.22 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.

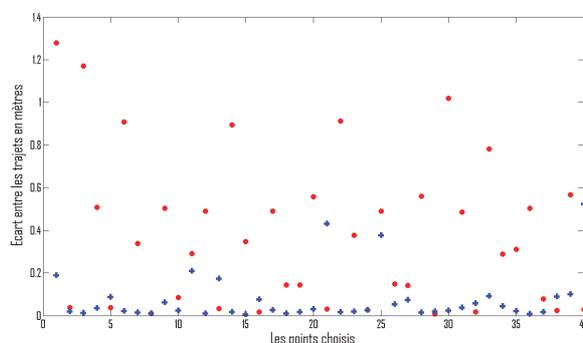


FIGURE 10.23 – Écarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules, pour un convoi de trois véhicules, sans la prise en compte de la force inertielle.

Les deux figures montrent que l'erreur moyenne entre le véhicule leader et le premier suiveur est de 20 cm. Cette erreur augmente entre le neuvième et dixième véhicule pour dépasser 1 m.

En comparant les figures 10.20 et 10.21 d'un côté et les figures 10.22 et 10.19 d'un autre côté, on peut remarquer que la force inertielle n'a pas d'influence sur la propagation de l'erreur d'un véhicule vers le suiveur.

Par contre, en comparant les résultats, avec ceux obtenus dans les cas de la prise en compte de la force inertielle (figure 10.8 et 10.5), une augmentation significative de l'erreur peut être constatée. L'erreur maximale augmente de 80 cm pour atteindre les 120 cm dans certains cas où la force inertielle n'est pas prise en compte.

10.5.3 Bilan des résultats obtenus pour l'évaluation du suivi de trajet

Les résultats montrés pour l'évaluation de la qualité de suivi du trajet montrent que la non prise en compte de la force inertielle associée au véhicule leader local :

- Augmente l'erreur en écart longitudinal ;
- Augmente la fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal ;
- Augmente l'erreur de suivi de trajet.

10.6 Conclusion

Dans le but de tester l'approche que nous avons proposé dans le chapitre 4 pour la conduite en convoi autonome, des simulations et des expérimentations sont faites. Pour les simulations, nous avons utilisé le simulateur VIVUS, un simulateur 3D intégrant les propriétés des véhicules et capable de simuler leurs réactions dans l'environnement. Les tests sont faits, en utilisant les véhicules électriques du laboratoire IRTES-SeT.

Deux indicateurs sont particulièrement évalués, un premier qui permet d'évaluer l'écart longitudinal entre deux véhicules qui se suivent. Un deuxième qui permet d'évaluer la qualité du suivi de trajet des véhicules dans le convoi.

Les résultats de simulations et d'expérimentations montrent des convois avec des comportements corrects. L'écart longitudinal est toujours au delà de la distance de sécurité, ce qui indique qu'il n'y a pas de collision entre les véhicules du convoi. Quant au suivi du trajet, les résultats obtenus montrent un bon suivi de trajet, comparés aux résultats produits par les approches décentralisées utilisant un modèle d'asservissement sur un leader local.

Nous avons aussi réalisé une étude de l'effet de la force inertielle produite par le référentiel associé au leader local. Cette étude consiste à comparer les comportements des convois qui prennent et qui ne prennent pas en compte cette force. Les résultats obtenus montrent que la prise en compte de la force inertielle permet de diminuer les erreurs en écart longitudinal et les erreurs en suivi de trajet, ainsi que la fréquence d'oscillation de l'écart longitudinal.

Chapitre 11

Simulations de la configuration échelon

11.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de trouver la façon d'accrochage du modèle d'interaction à deux ressorts, la plus adéquate pour une configuration échelon. Pour ce faire, le modèle est appliqué avec les trois possibilités, montrées dans le chapitre 5 de la partie I. Des simulations sont réalisées avec ces trois possibilités. Les simulations évaluent l'écart longitudinal et la qualité du suivi de trajet, selon les méthodes présentées dans le chapitre 8. La comparaison nous permet de savoir laquelle des possibilités est la plus adéquate pour une configuration échelon.

11.2 Scénario de simulation

Les simulations seront faites avec des convois de trois véhicules identiques : de types Little car. Le circuit commence par un trajet linéaire de 500 mètres de long, suivi d'un trajet ovale, montré dans la figure 11.1 . Ce trajet nous permet de tester le convoi en ligne droite ainsi qu'en cas des virages.

Le convoi est évalué à une vitesse de 10 km/h. L'écart longitudinal souhaité est de 4.5 m, l'écart latéral souhaité est de 2 m. Le tableau 5.1 montre les trois possibilités proposées.

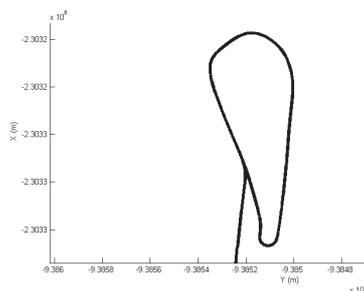


FIGURE 11.1 – Trajet suivi pendant les simulations des configurations échelons.

11.3 Evaluation de l'écart longitudinal

Dans les graphes suivants, la ligne continue (bleue) représente l'écart longitudinal, entre le premier et le deuxième véhicules, la ligne discontinue (rouge) représente l'écart longitudinal entre le deuxième et le troisième véhicules.

11.3.1 Première possibilité

La figure 11.2 montre les écarts longitudinaux, pour la première possibilité d'attache. Dans les cas du mouvement linéaire, l'erreur moyenne est de 20 cm. Cette erreur augmente dans les cas des virages, pour atteindre un seuil maximal de 80 cm entre le premier et le deuxième véhicules, et de 90 cm entre le deuxième et le troisième véhicules.

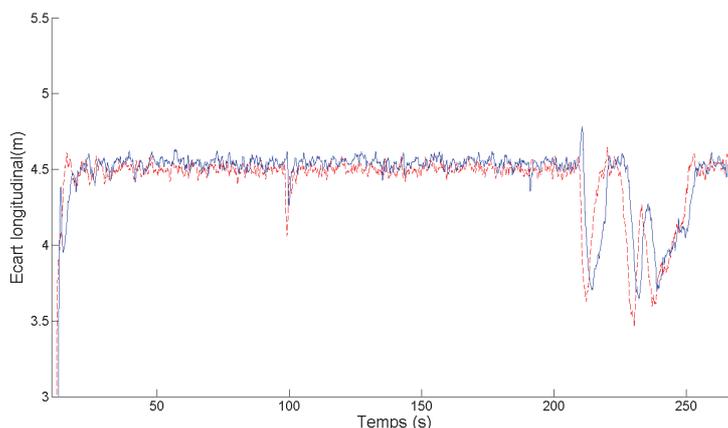


FIGURE 11.2 – Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la première possibilité d'attache des véhicules.

11.3.2 Deuxième possibilité

La figure 11.3 montre les écarts longitudinaux, pour la deuxième possibilité d'attache. L'écart longitudinal dépasse toujours de 10 cm l'écart longitudinal souhaité. Dans le cas du mouvement linéaire, l'erreur moyenne est de 35 cm. Cette erreur augmente dans les cas des virages, pour atteindre un seuil maximal de 50 cm entre le premier et le deuxième véhicules, et de 60 cm entre le deuxième et le troisième véhicules.

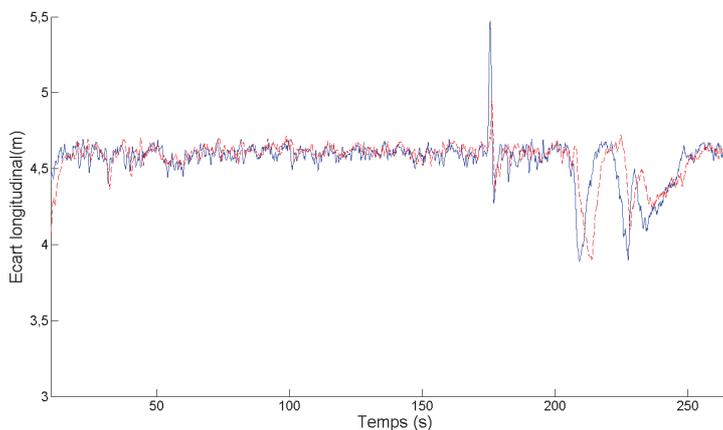


FIGURE 11.3 – Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la deuxième possibilité d’attache des véhicules.

11.3.3 Troisième possibilité

La figure 11.4 montre les écarts longitudinaux, pour la troisième possibilité d’attache. Dans le cas du mouvement linéaire, l’erreur moyenne est de 30 cm. Cette erreur augmente dans les cas des virages, pour dépasser le 1 m dans certains cas.

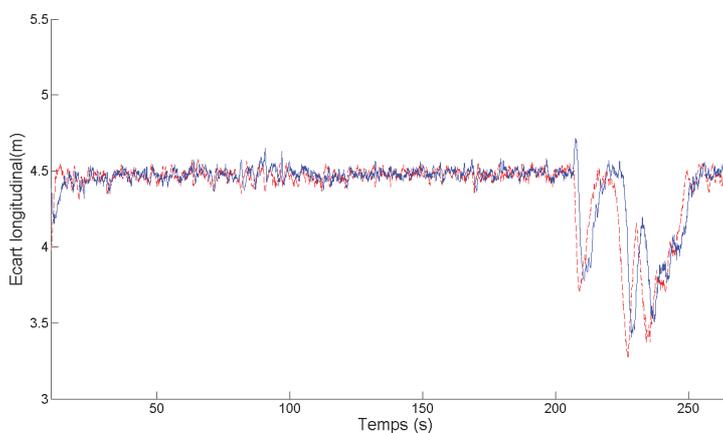


FIGURE 11.4 – Ecart longitudinal entre les véhicules, obtenu avec la troisième possibilité d’attache des véhicules.

11.3.4 Bilan d’évaluation de l’écart longitudinal

La comparaison des résultats obtenus par les trois possibilités, montre que l’erreur moyenne varie entre 20 cm et 30 cm. L’erreur maximale varie entre 60 cm et 120 cm. Les erreurs les plus

élevées sont produites par la troisième possibilité. On peut dire de cette dernière, qu'elle est moins correcte que les deux possibilités 1 et 2.

Dans les virages montrés en simulation, le véhicule suiveur est placé à l'extérieur du virage (cf. figure 9.4). Lorsque le véhicule suiveur est à l'intérieur du virage, il décrit un trajet avec un rayon de courbure inférieur à celui décrit par son leader. Par contre, pour garder l'écart longitudinal nominal et éviter une collision, le véhicule suiveur doit avoir une vitesse inférieure à son leader local. Les simulations ont montrés que pour des rayons de courbures inférieurs à 15 mètres, des collisions entre un véhicule suiveur et son leader local deviennent plus probables.

11.4 Evaluation du suivi du trajet

Pour l'évaluation de la qualité du suivi du trajet, nous montrons pour chaque cas deux figures. Une première, qui montre les trajets suivis par chacun des trois véhicules. La ligne continue (bleue) représente le trajet du véhicule leader global. La ligne discontinue (rouge) représente le trajet du premier véhicule suiveur. La ligne pointillée (noire) représente le trajet du deuxième suiveur. Pour des raisons d'affichage et de lisibilité, seule la deuxième partie du trajet, lors du mouvement ovale, est montrée. Des points sont montrés sur ces trajets. Les écarts entre les trajets sont mesurés pour ces points. La deuxième figure montre les valeurs des écarts mesurés à ces points. Les croix (bleues) représentent les écarts entre les trajets du véhicule leader et du premier véhicule suiveur. Les ronds (rouges) représentent les écarts entre les trajets des deux véhicules suiveurs.

Les écarts entre trajets sont mesurés pour 35 points. Les 25 premiers points sont sur la partie linéaire de la trajectoire suivie (ils ne sont pas affichés sur les graphes). Les 10 derniers points sont sur la partie ovale du trajet.

Cette répartition nous permet d'évaluer le suivi du trajet pour les cas des mouvements linéaires et également pour les cas des trajectoires avec des courbes.

11.4.1 Première possibilité

La figure 11.5 montre les trajets suivis par chacun des trois véhicules. La figure 11.6 montre les écarts entre les trajets. Cette figure montre que, l'écart entre les trajets dans le cas d'un mouvement linéaire, ne dépasse pas le 2.1 m, ce qui correspond à une erreur de 10 cm. Dans les cas d'un mouvement avec des virages, l'écart maximal atteint est de 2.2 m entre le premier et le deuxième véhicules et 2.3 m entre le deuxième et le troisième véhicules, ce qui correspond à des erreurs de 20 cm et 30 cm respectivement. L'écart minimal atteint est de 1.3 m, on peut dire alors que l'erreur maximale est de 70 cm. Cette erreur est atteinte lors d'un virage avec un petit rayon de courbure.

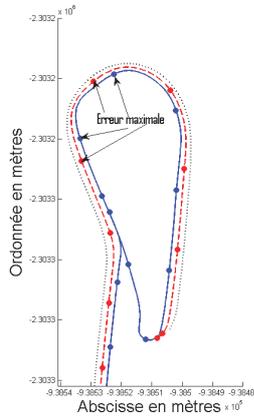


FIGURE 11.5 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la première possibilité d’attache.

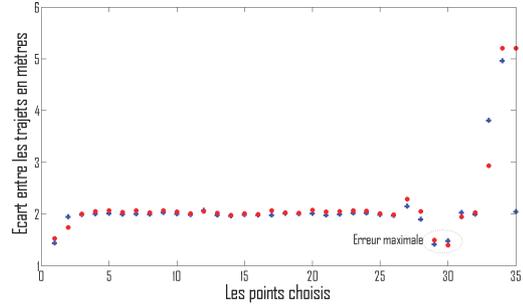


FIGURE 11.6 – Ecart mesuré entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la première possibilité d’attache.

11.4.2 Deuxième possibilité

La figure 11.7 montre les trajets suivis par chacun des trois véhicules. La figure 11.8 montre les écarts entre les trajets. Dans les cas du mouvement linéaire, l’écart entre les trajets reste entre 2 et 2.1 m, ce qui correspond à une erreur de 10 cm. Dans les cas des virages, cet écart augmente, surtout avec la diminution du rayon de courbure. L’écart minimal atteint le 1 m (erreur de 1 m) entre le premier et le deuxième véhicules, et 80 cm (erreur de 1.3 m) entre le deuxième et le troisième véhicules, pour un rayon de courbure de 6 m. Pour un rayon de courbure inférieur à 4 m, l’erreur devient 1.8 m.

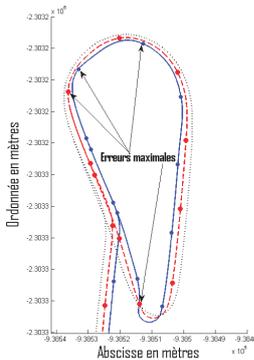


FIGURE 11.7 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la deuxième possibilité d’attache.

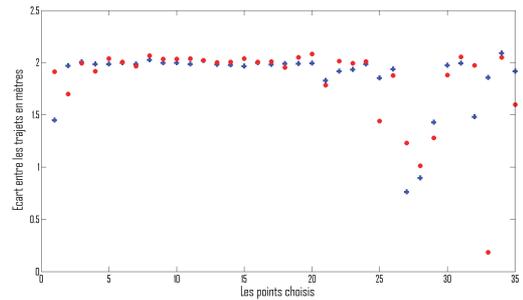


FIGURE 11.8 – Ecart mesuré entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la deuxième possibilité d’attache.

11.4.3 Troisième possibilité

La figure 11.9 montre les trajets suivis par chacun des trois véhicules. La figure 11.10 montre les écarts entre les trajets. Dans les cas du mouvement linéaire, l'écart entre les trajets reste entre 2 et 2.1 m, ce qui correspond à une erreur de 10 cm. Dans les cas des virages, cet écart augmente, l'écart minimal entre les trajets est de 1.2 m, ce qui correspond à une erreur maximale de 80 cm. Cette erreur est obtenue pour un rayon de courbure de 6 m.

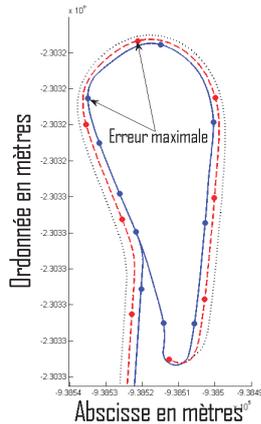


FIGURE 11.9 – Traces suivies par les véhicules. Résultats obtenus avec la troisième possibilité d'attache.

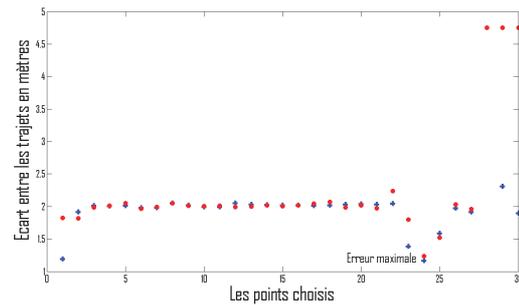


FIGURE 11.10 – Écarts mesurés entre les trajets suivis par les véhicules. Résultats obtenus avec la troisième possibilité d'attache.

11.4.4 Bilan d'évaluation du suivi de trajet

La comparaison des résultats des trois possibilités, montre que pour les cas des mouvements linéaires, l'erreur est d'environ 10 cm pour les trois possibilités. Dans les cas des trajets avec des courbes, l'erreur augmente avec les petits rayons de courbure. L'erreur maximale atteinte est de 1.8 m. Cette erreur est produite par la deuxième possibilité d'attache.

11.5 Bilan des tests

Le tableau 11.1 récapitule les résultats obtenus par les deux tests : évaluation de l'écart longitudinal et évaluation du suivi de trajet. Ce tableau montre que :

- En ce qui concerne l'écart longitudinal, c'est la possibilité numéro 3, qui a produit les erreurs les plus élevées.
- En ce qui concerne le suivi du trajet, c'est la possibilité numéro 2, qui a produit les erreurs les plus élevées.

On peut donc dire, que la possibilité d'attache numéro 1 est celle qui produit les meilleurs résultats comparée aux deux autres possibilités.

	Possibilité 1	Possibilité 2	Possibilité 3
Erreur longitudinale moyenne	20 cm	35 cm	30 cm
Erreur longitudinale maximale	90 cm	60 cm	> 1 m
Erreur de suivi de trajet : Cas du trajet linéaire	10 cm	10 cm	10 cm
Erreur moyenne de suivi de trajet : Cas de trajet non linéaire	30 cm	40 cm	30 cm
Erreur maximale de suivi de trajet : Cas de trajet non linéaire	70 cm	> 1,5 m	80 cm

TABLE 11.1 – Récapitulatifs des tests avec les possibilités d’attaches.

11.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une comparaison entre trois possibilités d’attache du modèle d’interaction de deux ressorts. Les simulations ont permis de déduire que la première possibilité (cf. tableau 11.1) est la mieux adaptée pour les configurations en échelon.

Les résultats montrés par cette possibilité, montrent un comportement correct sans risque de collision, dans les cas des mouvements linéaires et circulaires, avec le suiveur à l’extérieur du virage. Pour les cas de virages où le suiveur est à l’intérieur de virage, des risques de collision sont présents à partir d’un rayon de courbure de 15 m.

Quatrième partie

Conclusion

Chapitre 12

Conclusion et perspectives

12.1 Bilan des travaux réalisés

Tout au long de cette thèse, nous avons abordés la problématique de conduite en convoi. Pour cette problématique, nous avons mis en place une approche de prise de décision, inspirée de la physique, ainsi qu'une approche de vérification des propriétés de sûreté, basée sur la méthode compositionnelle.

Rappelons les objectifs qui avaient été résumés en introduction :

- La définition d'un modèle réactif auto-organisationnel pour la conduite en convoi autonome, avec une configuration colonne.
- L'adaptation du modèle défini sur d'autres configurations, notamment sur les configurations échelon et ligne.
- La définition d'une méthode de vérification, capable d'étudier la satisfiabilité des propriétés associées au modèle de convoi de véhicules.

La première partie définit le modèle de prise de décision, pour la conduite en convoi. Cette partie a commencé par un bilan des définitions des termes et concepts qui peuvent être rencontrés dans le domaine de conduite en convoi. Un état de l'art sur les approches de prise de décision dans ce domaine est ensuite dressé. Nous avons exploré en profondeur, les approches décentralisées, dans lesquelles notre approche se situe. Dans la continuité de l'état de l'art, nous nous sommes intéressés par des travaux faits en robotiques mobiles, et qui étudient la problématique de multi-configurations. Dans cette partie, nous avons proposé une approche auto-organisationnelle pour le problème de prise de décision dans les systèmes de conduite en convoi, en configuration colonne. Celle-ci prend son inspiration de la physique et particulièrement des systèmes masses-ressorts. Nous avons présenté en profondeur les grands principes de l'approche proposée. Le comportement de chaque véhicule est influencé uniquement par ses perceptions. Le maintien de la configuration est un résultat émergent de l'ensemble des comportements de chacun des véhicules du convoi. Egaleme nt, nous avons montré la stabilité de notre approche, en utilisant le théorème de Lyapunov, et le principe de "string stability". En outre, nous avons proposé une adaptation de l'approche de base pour traiter le problème de navigation dans différentes configurations, notamment dans les configurations échelon et ligne.

La deuxième partie à présenter la méthode de vérification capable d'étudier la satisfiabilité des propriétés associées au modèle de conduite en convoi. Cette partie débute par une introduction globale au domaine de la spécification formelle et la vérification des propriétés. Nous avons présenté des définitions du modèle formel, de la vérification et de son intérêt. Nous avons fait aussi les bilans des méthodes de vérification et des outils de vérification, ce qui nous a permis d'effectuer le choix de la méthode et l'outil, que nous avons considéré comme adéquat, pour la vérification du modèle de convoi de véhicule. Nous nous sommes intéressés par la vérification de deux propriétés : une propriété de sûreté qui garantie la non collision entre les éléments du convoi, et une propriété de confort qui garantie que le convoi évolue avec un certain degré de confort. Pour cela, un modèle formel représentant un véhicule du convoi a été défini. Dans la continuité du chapitre, nous avons détaillé notre approche de vérification, basée sur une méthode de composition. Cette méthode s'applique sous une règle de déduction dont la consistance est validée, pour notre approche de conduite en convoi.

La troisième partie était dédiée pour la validation de l'approche proposée pour la conduite en convoi. La validation du modèle à passer par trois activités : la vérification, la simulation et l'expérimentation. L'application de la méthode de vérification proposée sur le modèle de conduite en convoi permet de certifier la sûreté et le confort d'un convoi en configuration colonne, jusqu'à une taille de 9 véhicules à 25 km/h, et jusqu'à une vitesse de 45 km/h avec 5 véhicules. La sûreté et le confort des convois en configurations échelon et ligne sont certifiées pour un convoi de 3 véhicules à 15 km/h. Les résultats des simulations et des expérimentations, permettent de mettre en évidence les apports de notre approche. D'abord au niveau **qualité** : les simulations et les expérimentations ont montrés des faibles erreurs latérales et longitudinales, comparé aux approches dite de "proche en proche". Deuxièmement, au niveau **coût** : le comportement intelligent du véhicule étant basé sur une perception locale et sans communication. Un véhicule à uniquement besoin d'un capteur qui assure sa perception, et peut être de type télémétrique. Les simulations ont montré aussi, qu'il est possible d'appliquer le modèle de deux ressorts sur la configuration échelon, sans modifications, en ajustant les points d'attaches du modèle d'interaction. Cependant, pour la configuration ligne, ce simple ajustement ne suffit pas. Un problème d'anticipation des mouvements de leader local se présente.

12.2 Perspectives et améliorations

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que certains problèmes rencontrés au cours de la thèse ne sont pas encore résolus. Cependant, nous disposons de plusieurs pistes pour améliorer les approches proposées et étendre les perspectives de leurs utilisations.

12.2.1 Amélioration de l'approche de conduite en convoi

Notre approche pour la conduite en convoi, présente des résultats satisfaisantes au niveau de suivi de trajet, comparant à d'autres approche utilisant le principe de "proche en proche",

mais des améliorations peuvent toujours y être appliquées. Pour la problématique d'erreur d'anticipation, nous travaillons actuellement sur une approche basée sur la définition d'une image virtuelle du véhicule leader local, placée entre le véhicule suiveur et son leader local. Le suiveur calculera ses consignes, en fonction de la position de cette image virtuelle et non pas de la position de son leader. Ceci a pour influence, de réduire l'erreur d'anticipation, surtout dans les cas des virages avec des petits rayons de courbure et des larges distances inter-véhicules nominales.

Au long terme, les tâches d'insertion/éjection des éléments dans le convoi seront étudiées. Parmi les travaux menés au laboratoire systèmes et transports (SeT), certains travaux étudient la problématique d'évitement d'obstacle [DCGG12]. L'application de ces travaux sur notre approche de conduite en convoi, permettra d'abord d'avoir un convoi plus sécurisé : risque de collision avec un élément intérieur ou extérieur au convoi est peu probable. Deuxièmement, l'utilisation de l'approche d'évitement d'obstacle, facilitera les tâches d'insertion et éjection d'un véhicule dans le convoi.

12.2.2 Amélioration de l'approche utilisée pour la multi-configuration

L'approche de changement des points d'attache, pour la multi-configuration a montré des résultats satisfaisants pour la configuration échelon, en ajustant juste les points d'accrochages des ressorts du modèle d'interaction. Or, pour la configuration ligne, ce simple ajustement ne suffit pas. Le modèle doit faire appel à un mécanisme de prédiction, capable d'estimer les prochaines évolutions du système, comme un filtre de Kalman.

12.2.3 Amélioration de l'approche de vérification

Pour l'approche de vérification proposée, des travaux en cours appliquent la méthode proposée sur d'autre approche de conduite en convoi, nous étudions spécialement l'approche [ATM12].

Une généralisation de notre méthode de vérification, peut être considérée parmi les améliorations à court terme. L'approche de vérification que nous avons utilisé est basée sur l'application d'une règle de déduction. La consistance de cette règle est prouvée, sous la condition que l'ajout d'un élément au système n'influe pas le reste des éléments. Une preuve générale de la consistance de la règle, non soumise à des conditions, permettra son application sur un ensemble plus larges des modèles.

Au long terme, nous étudierons la possibilité d'élaborer ou de définir une méthode capable de choisir la ou les propriété(s) auxiliaire(s) attribuée(s) à la méthode compositionnelle. Pour l'instant, il n'y a pas de règle pour le choix de ces propriétés. Leurs choix est directement liés à la nature du modèle étudié.

Cinquième partie

Annexes

Annexe A

La boîte à outils SAL

A.1 Environnement SAL

L'environnement SAL (Symbolic Analysis Laboratory) s'agit d'un cadre permettant de combiner les différents outils : abstraction, analyse de programme, theorem proving et model checking, pour la vérification des propriétés dans un système de transition. Une composante essentielle de cette boîte est la langage utilisée pour la description des systèmes de transition. Cette langage sert comme une langage de spécification.

A.2 Le Langage SAL

Le langage SAL été essentiellement conçu par David Dill de l'université de Stanford et Thomas Henzinger de l'université de Californie à Berkeley. Le langage SAL n'est pas si différent des langages d'entrée utilisés par les autres outils de vérification comme SMV [McM93], Murphi [Dil96], Mocha [AHM⁺98], et SPIN [Hol07]. Comme ces langues, SAL décrit des systèmes de transition en termes de commandes d'initialisation et de transition.

A.2.1 Les types

Le langage SAL supporte les types de bases comme les booléens, les nombres naturels, les entiers et les réels. Des nouveaux types peuvent être aussi définis.

A.2.2 Les expressions

Les expressions sont constituées des constantes, des variables, des équations avec des booléens, des équations arithmétiques, des vecteurs et des fonctions. L'expression de condition (if-then-else) peut aussi être exprimé.

Les opérateurs unaires incluent la négation (NOT) et la signe "-" pour les entiers. Les opérateurs binaires incluent l'égalité (=) et la non égalité (/=), les opérateurs booléens de conjonction et disjonction (AND et OR), de l'implication et l'équivalence (\Rightarrow et \Leftrightarrow) et du or-exclusif (XOR). Les opérations de l'arithmétique incluent l'addition (+), la soustraction(-), la multiplication (*) et la division (/), ainsi que les opérateurs de comparaison (<, <=, >, >=).

A.3 Un contexte en SAL

En SAL un système est représenté sous forme d'un contexte. Un contexte est composé d'un ensemble des modules qui peuvent s'exécuter d'une façon synchrone ou asynchrone. Un contexte peut contenir :

- Des définitions des constantes : où des valeurs sont attribués à des constantes globales utilisées dans le système (dans certains système, il n'y a pas besoin de cette partie).
- Des définitions des types : où des types énumérés, représentant les états interne des modules, sont introduites.
- Des définition des fonctions : où les différentes fonction utilisées dans les système sont définies.
- Des modules : où chaque module représente un état du système.

A.3.1 Les modules

Un *module* dans un système de transition se compose d'un type d'Etat, une définition d'un invariant sur ce type d'état, une condition d'initialisation, et une relation de transition binaire. Un état dans un module est défini par quatre ensembles disjoints des variables : les entrées, les sorties, locales et globales. Les variables d'entrées et les variables globales, sont les variables observées par le module. Les variables de sorties, locales et globales, sont les variables contrôlées par le module.

Les règles de transition sont exprimées par l'état courant et l'état suivant. Où, X représente l'état actuel et X' représente l'état suivant. Voici un simple exemple d'une déclaration d'un module "m" :

```

m : MODULE =
BEGIN
INPUT temp : INTEGER
LOCAL high : BOOLEAN, ctr : NATURAL
OUTPUT danger : BOOLEAN
DEFINITION high = i > 100
INITIALIZATION : ctr = 0 ; danger = FALSE
TRANSITION [ ctr > 3 -> danger' = danger OR high
|| ctr <= 3 AND high -> ctr' = ctr + 1
|| ELSE -> ctr' = 0
]
END ;
```

Dans cet exemple le module **m** gère la température et indique un problème si la température reste élevée pour une longue durée. Le module déclare d'abord les quatre ensembles des variables : variable d'entrée **temp**, variables locales **high** et **ctr**, et une variable de sortie **danger**.

Les définitions qui apparaissent dans la section **DEFINITION** représentent les invariants. Lorsque les modules sont composés avec d'autres modules, les définitions restent vraies, même dans les transitions des autres modules. Cette section est généralement conçue pour le contrôle des variables dont les valeurs dépendent des entrées. Comme dans l'exemple, le booléen **high** devient TRUE lorsque la température dépasse 100.

Dans la section **INITIALIZATION** des valeurs initiaux peuvent être assignées à des variables locales, globales et des variables de sorties. Le module **m**, par exemple, initialise **ctr** à 0 et **danger**

à **FALSE**.

Dans la section **TRANSITION**, les prochains états possibles sont assignés pour les variables locales, globales et de sorties. Lorsque le module **m**, par exemple, est activé, il met **danger** à **TRUE** si **temp** dépasse 100 trois fois de suite.

Une fois les modules de bases sont définis, ils peuvent être composés d'une façon synchrone ou asynchrone pour composer des nouveaux modules. Si M_1 et M_2 sont deux modules, $M_1||M_2$ et $M_1\Box M_2$ représentent respectivement les compositions synchrone et asynchrone des deux modules.

A.4 Exemple

A.4.1 Un contrôleur de niveau d'eau

Le détecteur de niveau d'eau dans un réservoir est contrôlé au moyen d'un moniteur, qui détecte en continu le niveau d'eau et active ou désactive la pompe (selon le niveau atteint). Le niveau d'eau change d'une façon linéaire et par morceaux dans le temps. Lorsque la pompe est arrêtée, le niveau d'eau diminue de 2 pouces par seconde, lorsque la pompe est en service, le niveau d'eau s'élève de 1 pouce par seconde. Initialement, le niveau d'eau est de 1 pouce et la pompe est activée. Le niveau de l'eau doit être maintenue entre 1 et 12 cm. Cependant, il existe un délai de 2 secondes entre l'émission d'un signal "activation/désactivation" par le moniteur, et la prise en compte de ce signal par la pompe. Ainsi, le moniteur doit envoyer un signal d'activation à la pompe avant que le niveau d'eau atteigne le 1 pouce, et il faut signaler une désactivation à la pompe avant que le niveau de l'eau atteigne 12 pouces.

A.4.2 Implémentation en SAL

Le système est modélisé dans le contexte "waterlevel". Il dispose de quatre Etats. Dans l'état S0 et S1 la pompe est activée; dans s2 et s3 elle est désactivée. La variable x est une horloge, qui sert à indiquer les retards. La variable y précise le niveau d'eau.

Voici une implémentation possible du système :

```

waterlevel : CONTEXT = Nom du contexte
BEGIN
states : TYPE = {10,11,12,13}; Définition des types énumérés
TransitionType : TYPE = {regular, elapse}; Définition des types énumérés

next_trans_type(t : TransitionType) : TransitionType = Définition d'une fonction
IF t = regular THEN elapse ELSE regular ENDIF;

transition_module : MODULE = Définition du module "transition_module"
system : MODULE = transition_module || wlm; Composition synchrone des deux modules
BEGIN
OUTPUT
delta : REAL,
trans : TransitionType
TRANSITION
delta' IN { x : REAL | x >= 0 };
trans' = next_trans_type(trans)
END;
wlm : MODULE = Définition du module "wlm"
BEGIN
INPUT Définitions des entrées du module
delta : REAL,
trans : TransitionType
OUTPUT Définitions des sorties du module
x : REAL,
y : REAL,
state : states
INITIALIZATION Les initialisations
state = 10;
x = 0;
y = 1
TRANSITION Les transitions
[
% 10 -> 11
trans = regular AND state = 10 AND y = 10 ->
state' = 11;
x' = 0;
]
% 11 -> 12
trans = regular AND state = 11 AND x = 2 AND y >= 5 ->
state' = 12

]
% 12 -> 13
trans = regular AND state = 12 AND y = 5 ->
state' = 13;
x' = 0
]
% 13 -> 10
trans = regular AND state = 13 AND x = 2 AND y <= 10 ->
state' = 10
]
trans = elapse AND delta >= 0 AND
(state = 10 => y + delta <= 10) AND
(state = 11 => x + delta <= 2) AND
(state = 12 => y + delta >= 5) AND
(state = 13 => x + delta <= 2) ->
x' = x + delta;
y' = IF (state = 10 OR state = 11) THEN y + delta ELSE y - 2 * delta ENDIF
]
END;
prop : LEMMA system | - G(y >= 1 AND y <= 12); La propriété à vérifier
END;

```

La propriété de sûreté associée à ce système vérifie que le niveau d'eau est toujours entre 1 et 12 pouces. La commande suivante est lancée la vérification de la propriété :

```
sal-inf-bmc -v 10 waterlevel prop
```


Annexe B

Capteurs et véhicules

B.1 Les capteurs

Trois capteurs sont principalement utilisés, pour nos expérimentations, deux télémètres laser : un LMS 200 et un IBEO lux, et un GPS RTK : ProFlex 500.

B.1.1 LMS 200

Le LMS 200 (cf. figure B.1) est conçu par la compagnie SICK¹, qui est un leader mondial des capteurs intelligents et des solutions pour les domaines de l'automatisation industrielle, de la logistique et des processus.



FIGURE B.1 – Le capteur LMS 200.

Le LMS 200 est particulièrement utilisé dans les trois domaines suivants :

- Détermination de la position d'un objet.
- Détermination du volume de l'objet .

1. <http://www.sick.com/fr/fr-fr/home/Pages/Homepage1.aspx>

- Surveillance des locaux.

Principe de fonctionnement

Le capteur LMS 200 fonctionne en mesurant le temps de vol du rayon laser émis : un rayon laser émis par le capteur sera réfléchi s'il rencontre un objet. La réflexion est enregistrée par le receveur du LMS. Le temps écoulé entre l'émission du rayon et la réception du rayon réfléchi est directement proportionnel à la distance entre l'objet et le LMS.

Caractéristiques technique

Le tableau B.1 récapitule quelque caractéristiques techniques concernant le LMS 200.

Ouverture d'angle	de 100 à 180°
Résolution angulaire	0.25°, 0.5° et 1°
Résolution	+/- 10 mm
Porté	typique : 10 m, maximale : 80m
Vitesse du moteur	75 Hz

TABLE B.1 – Caractéristiques techniques du capteur LMS 200.

B.1.2 IBEO Lux

L'IBEO lux (cf. figure B.2) est conçu par la compagnie IBEO automotive² pour les applications automobiles. Il offre tous les fonctionnalités des systèmes LIDAR. Le principal intérêt de ces capteurs est qu'ils restent fiable et précis même avec des vitesses élevées, dans les conditions climatiques les plus défavorables, et avec un flux de circulation dense.



FIGURE B.2 – Le capteur IBEO lux.

Les avantages de l'IBEO lux sont :

- Sa large portée, qui peut arriver jusqu'à 200 m.
- Sa fiabilité dans toutes les conditions climatique, grâce à la technologie multi-écho.
- La possibilité de suivi de trajet (traitement de donnée embarqué).

2. <http://ibeo-as.com/>

- Son large champ horizontal de vision

Caractéristiques technique

Le tableau B.2 récapitule les caractéristiques technique du capteur IBEO lux.

Ouverture d'angle	110°
Résolution angulaire	de 0.125° à 1°
Porté	200 m
Fréquence	25 Hz

TABLE B.2 – Caractéristiques techniques du capteur IBEO lux.

B.1.3 Le GPS RTK : ProFlex 500

La Cinématique temps réel (Real Time Kinematic, en anglais ou RTK)³ est une technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis par le système GPS, GLONASS ou Galileo. Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre. Le GPS RTK du laboratoire SeT est un ProFlex 500 B.3.



FIGURE B.3 – Le GPS RTK ProFlex 500.

Le ProFlex 500 est conçu par la compagnie Magellan⁴. Il dispose de toutes les fonctions nécessaires pour un positionnement précis et fiable. Il est doté d'une batterie interne amovible servant d'alimentation de secours (UPS) en cas de coupure de courant et d'une mémoire interne extensible via une clé USB. Sa conception innovante intègre l'ensemble des outils de communication (Ethernet, GSM/GPRS, radio UHF, Bluetooth) offrant une solution complète et robuste.

Caractéristiques technique

Voici quelques caractéristiques techniques de la base ProFlex 500 :

- Position et données brutes disponibles à la cadence maximum de 20 Hz.
- Moteurs rapides de détection de signal pour une acquisition et une ré-acquisition rapide des signaux GPS/GLONASS/SBAS.

3. http://fr.wikipedia.org/wiki/Real_Time_Kinematic

4. <http://www.magellangps.com/Vehicule-Navigation>

- Cadence d'enregistrement de données : de 0,05 à 999 secondes.
- Initialisation RTK possible au-delà de 40 km de ligne de base.

B.2 Les véhicules

Le laboratoire systèmes et Transports, dispose de quatre véhicules : deux de type GEM et deux de type Little-Cae. Ces véhicules ont servi dans les expérimentations. Les expérimentations montrées dans le chapitre 10 sont faites sur des voitures GEM. Le tableau B.3 récapitule quelques caractéristiques des véhicules GEM.

Poids à vide	520 Kg
Charge utile	320 Kg
Longueur	2,5 m
Largeur	1,3 m
Hauteur	1,7 m
Empattement	1,8 m
Rayon de Braquage maximale	3,5 m
Pneus	12 pouces
Vitesse maximale	40 km/h
Autonomie maximale	56 km

TABLE B.3 – Caractéristiques du véhicule GEM

Le tableau B.4 récapitule quelques caractéristiques des véhicules Little-Car.

Poids à vide	350 Kg
Charge utile	200 Kg
Longueur	3,05 m
Largeur	1,54 m
Hauteur	1,4 m
Empattement	2,05 m
Pneus	13 pouces
Vitesse maximale	45 km/h
Autonomie maximale	100 km

TABLE B.4 – Caractéristiques du véhicule Little-Car

Sixième partie

Bibliographie

Bibliographie

- [Abr96] Jean-Raymond Abrial. *The B-Book : Assigning Programs to Meanings*. Cambridge University Press, 1996.
- [AHM⁺98] Rajeev Alur, Thomas A Henzinger, Freddy YC Mang, Shaz Qadeer, Sriram K Rajamani, and Serdar Tasiran. Mocha : Modularity in model checking. In *Computer Aided Verification*, pages 521–525. Springer, 1998.
- [AL93] Martín Abadi and Leslie Lamport. Composing specifications. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 15(1) :73–132, 1993.
- [ATM12] Pierre Avanzini, Benoit Thuilot, and Philippe Martinet. Manual convoying of automated urban vehicles relying on monocular vision. In *Intelligent Vehicles Symposium*, pages 19–24, 2012.
- [BA97] Tucker Balch and Ronald C. Arkin. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 14 :926–939, 1997.
- [BBLM10] Thomas Ball, Ella Bounimova, Vladimir Levin, and Leonardo De Moura. Efficient evaluation of pointer predicates with z3 smt solver in slam2. Technical report, 2010.
- [BBSN08] Saddek Bensalem, Marius Bozga, Joseph Sifakis, and Thanh-Hung Nguyen. Compositional verification for component-based systems and application. In *Automated Technology for Verification and Analysis*, pages 64–79. Springer, 2008.
- [Bie08] Armin Biere. Picosat essentials. *Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation (JSAT)*, 2008.
- [BSZX12] Zhang Baoqun, Song Shenmin, Zheng Zhong, and Wei Xiqing. Distributed coordinated formation control of multiple spacecraft with and without velocity measurements. In *Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese*, pages 6105–6111, 2012.
- [CC77] Patrick Cousot and Radhia Cousot. Abstract interpretation : a unified lattice model for static analysis of programs by construction or approximation of fixpoints. In *Proceedings of the 4th ACM SIGACT-SIGPLAN symposium on Principles of programming languages*, pages 238–252. ACM, 1977.

- [CGGK11] Jean-Michel Contet, Franck Gechter, Pablo Gruer, and Abderrafiaa Koukam. Reactive multi-agent approach to local platoon control : stability analysis and experimentations. *IJISTA*, 10(3) :231–249, 2011.
- [CGHC10] Rongxin Cui, Shuzhi Sam Ge, Bernard Voon Ee How, and Yoo Sang Choo. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 37(17-18) :1491 – 1502, 2010.
- [Cha93] Edward Chang. Compositional verification of reactive and real-time systems. *Stanford University Stanford, CA, USA*, 1993.
- [CJT97] Frank Cornelissen, CatholijnM. Jonker, and Jan Treur. Compositional verification of knowledge-based systems : A case study for diagnostic reasoning. In Enric Plaza and Richard Benjamins, editors, *Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, volume 1319 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 65–80. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [CLKS08] Samuel Colin, Arnaud Lanoix, Olga Kouchnarenko, and Jeanine Souquières. Towards validating a platoon of cristal vehicles using csp||b. In *AMAST 2008 : Proceedings of the 12th international conference on Algebraic Methodology and Software Technology*, pages 139–144, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [CLKS09] Samuel Colin, Arnaud Lanoix, Olga Kouchnarenko, and Jeanine Souquières. Using csp||b components : Application to a platoon of vehicles. *Formal Methods for Industrial Critical Systems*, pages 103–118, 2009.
- [CVJ03] R.E. Caicedo, J. Valasek, and J.L. Junkins. Preliminary results of one-dimensional vehicle formation control using structural analogy. In *American Control Conference (ACC)*, Denver (USA), 2003.
- [DCGG12] B. Dafflon, J. Contet, F. Gechter, and P. Gruer. Toward a reactive agent based parking assistance system. In *Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), 2012 IEEE 24th International Conference on*, volume 1, pages 500–507, 2012.
- [DFK⁺02] Aweek K. Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P. Ostrowski, John Spletzer, and Camillo J. Taylor. A vision-based formation control framework. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 18(5) :813–825, 2002.
- [DGGK13] Baudouin Dafflon, Franck Gechter, Pablo Gruer, and Abderrafiaa Koukam. Vehicle platoon and obstacle avoidance : a reactive agent approach. *IET Intelligent Transport Systems*, (3) :257–264(7), September 2013.
- [Dil96] David L Dill. The mur ϕ verification system. In *Computer Aided Verification*, pages 390–393. Springer, 1996.
- [DM06] Bruno Dutertre and Leonardo De Moura. The yices smt solver. Technical report, 2006.
- [DP96] P. Daviet and M. Parent. Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon. In *Intelligent Vehicles Symposium, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE*, pages 41–46, 1996.

- [DTK09] Dimos V. Dimarogonas, Panagiotis Tsiotras, and Kostas J. Kyriakopoulos. Leader follower cooperative attitude control of multiple rigid bodies. *Systems and Control Letters*, 58(6) :429 – 435, 2009.
- [EKBLA09] Mohamed Anouard El Kamel, Lotfi Beji, Jean Lerbet, and Azgal Abichou. Trajectory Generation for a Formation of Mobile Robots via A Flexible Virtual Structure Approach. In M O Tokhi & G S Virk O Tosun, H L Akin, editor, *Proc. of the Twelfth International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR'09)*, pages 819–826, Istanbul, Turquie, 2009. World Scientific.
- [ES03] Niklas Een and Niklas Sorensson. An extensible sat-solver [ver 1.2], 2003.
- [EYK97] J Eyre, D Yanakiev, and I Kanellakopoulos. String stability properties of ahs longitudinal vehicle controllers. Technical report, 1997.
- [EZCG⁺12] Madeleine El-Zaher, Jean-Michel Contet, Pablo Gruer, Franck Gechter, and Abderrafiaa Koukam. Compositional verification for reactive multi-agent systems applied to platoon non collision verification. *Stud. Inform. Univ.*, 10(3) :119–141, 2012.
- [EZCGG11a] Madeleine El-Zaher, Jean-michel Contet, Franck Gechter, and Pablo Gruer. Reconfigurable and adaptable urban transportation systems : the platoon solution. In *the Insitution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11)*, Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghai, China. Shanghai University Press, July 2011.
- [EZCGG11b] Madeleine El-Zaher, Jean-michel Contet, Pablo Gruer, and Franck Gechter. Towards a compositional verification approach for multi-agent systems : Application to platoon system. In *First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for complex systems (V2CS)*, November 2011.
- [EZCGK12] Madeleine El-Zaher, Jean-Michel Contet, Franck Gechter, and Abderrafiaa Koukam. Echelon platoon organisation : A distributed approach based on 2-spring virtual links. In *AIMSA*, pages 246–255, 2012.
- [EZDGC12] Madeleine El-Zaher, Baudouin Dafflon, Franck Gechter, and Jean-Michel Contet. Vehicle platoon control with multi-configuration ability. *Procedia CS*, 9 :1503–1512, 2012.
- [EZGGH11] Madeleine El-Zaher, Franck Gechter, Pablo Gruer, and Mohammad Hajjar. A new linear platoon model based on reactive multi-agent systems. In *ICTAI*, pages 898–899, 2011.
- [FDKO01] Rafael B. Fierro, Aveek K. Das, Vijay Kumar, and James P. Ostrowski. Hybrid control of formations of robots. pages 157–162, 2001.
- [FGM10] Riccardo Falconi, Sven Goyal, and Alcherio Martinoli. Graph based distributed control of non-holonomic vehicles endowed with local positioning information engaged in escorting missions. In *ICRA '10*, pages 3207–3214, 2010.
- [FM96] Jacques Ferber and Jean-Pierre Müller. Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pages 72–79, 1996.

- [FM02] J. Fredslund and M.J. Mataric. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :837–846, 2002.
- [Gaz05] V. Gazi *. Formation control of a multi-agent system using non-linear servo-mechanism. *International Journal of Control*, 78(8) :554–565, 2005.
- [GC77] William L Garrard and Reggie J Caudill. Dynamic behavior of strings of automated transit vehicles. Technical report, 1977.
- [Gec03] Franck Gechter. *Modèle multi-agent réactif pour la fusion de percepts : application à la localisation et au suivi en robotique mobile*. PhD thesis, 2003.
- [GH99] J.C. Gerdes and J.K. Hedrick. “loop-at-a-time” ; design of dynamic surface controllers for nonlinear systems. In *American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999*, volume 5, pages 3574–3578 vol.5, 1999.
- [GL94] Orna Grumberg and David E. Long. Model checking and modular verification. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 16(3) :843–871, May 1994.
- [GS01] S.K. Gehrig and F.J. Stein. Elastic bands to enhance vehicle following. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, pages 597 – 602, 2001.
- [HG97] H. Habrias and B. Griech. Formal specification of dynamic constraints with the b method. *Proceedings of the International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM*, pages 304 – 314, 1997. Formal specifications ;Dynamic constraints ;.
- [HLOR11] Martin Hilscher, Sven Linker, Ernst-Rüdiger Olderog, and Anders P Ravn. An abstract model for proving safety of multi-lane traffic manoeuvres. In *Formal Methods and Software Engineering*, pages 404–419. Springer, 2011.
- [Hol07] Gerard J Holzmann. Design and validation. 2007.
- [Hor87] Leipholz Horst. *An introduction to the stability of Dynamic systems and rigid bodies*. Stuttgart/Chichester, England and New York, B. G. Teubner/John Wiley and Sons, 1987, 370 p. Translation., New York, 1987.
- [IX94] P. Ioannou and Z. Xu. Throttle and brake control systems for automatic vehicle following. *IVHS Journal*, 1(4) :345 –, 1994.
- [Jon94] Bengt Jonsson. Compositional specification and verification of distributed systems. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 16(2) :259–303, 1994.
- [JT98] CatholijnM. Jonker and Jan Treur. Compositional verification of multi-agent systems : a formal analysis of pro-activeness and reactiveness. In Willem-Paul Roever, Hans Langmaack, and Amir Pnueli, editors, *Compositionality : The Significant Difference*, volume 1536 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 350–380. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [KV98] Orna Kupferman and Moshe Y Vardi. Modular model checking. In *Compositionality : The Significant Difference*, pages 381–401. Springer, 1998.

- [Lan08] Arnaud Lanoix. Event-b specification of a situated multi-agent system : Study of a platoon of vehicles. In *TASE '08 : Proceedings of the 2008 2nd IFIP/IEEE International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering*, pages 297–304, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [LBMY03] Jonathan R. T. Lawton, Al W. Beard, Senior Member, and Brett J. Young. A decentralized approach to formation maneuvers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19 :933–941, 2003.
- [LGCG10] Oliver Lamotte, Stephane Galland, Jean-Michel Contet, and Franck Gechter. Submicroscopic and physics simulation of autonomous and intelligent vehicles in virtual reality. *Advances in System Simulation, International Conference on*, 0 :28–33, 2010.
- [LK02] G.D. Lee and S.W. Kim. A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm. *Mechatronics*, 12(1) :97 – 118, 2002. Control algorithms ;.
- [LT97] M. Anthony Lewis and Kar-Han Tan. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Auton. Robots*, 4(4) :387–403, October 1997.
- [LT03] Hyeongcheol Lee and Masayoshi Tomizuka. Adaptive vehicle traction force control for intelligent vehicle highway systems (ivhss). *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(1) :37 – 47, 2003.
- [Lya92] A. M. Lyapunov. *The general problem of the stability of motion*. Taylor & Francis, 1992.
- [McM93] Kenneth L McMillan. *Symbolic model checking*. Springer, 1993.
- [MH90] John J. Moskwa and J.K. Hedrick. Nonlinear algorithms for automotive engine control. *Control Systems Magazine, IEEE*, 10(3) :88–93, 1990.
- [MP10] Zohar Manna and Amir Pnueli. Temporal verification of reactive systems : Response. In Zohar Manna and DoronA. Peled, editors, *Time for Verification*, volume 6200 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 279–361. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Pal08] Petrov Palmen. A mathematical model for control of an autonomous vehicle convoy. *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL*, 3(9) :835–848, 2008.
- [PC09] André Platzer and Edmund M. Clarke. Formal verification of curved flight collision avoidance maneuvers : A case study, 2009.
- [PM06] J. Bom P. Martinet, B. Thuilot. Autonomous navigation and platooning using a sensory memory. *International IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'06, Beijing, China*, 2006.
- [RB04] Wei Ren and Randal W. Beard. A decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 27 :73–82, 2004.

- [SD92] Shahab Sheikholeslam and Charles A. Desoer. Control of interconnected non-linear dynamical systems : The platoon problem. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6) :806 – 810, 1992.
- [SD93] Shahab Sheikholeslam and Charles 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*, 42(4) :546 – 554, 1993.
- [Sha02] Natarajan Shankar. Verification by abstraction. In *10th Anniversary Colloquium of UNU/IIST*, pages 367–380, 2002.
- [SLS⁺11] Olivier Simonin, Arnaud Lanoix, Alexis Scheuer, François Charpillet, et al. Specifying in b the influence/reaction model to study situated mas : Application to vehicles platooning. In *V2CS : First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for complex systems*, 2011.
- [SSC08] Alexis Scheuer, Olivier Simonin, and François Charpillet. Safe Longitudinal Platoons of Vehicles without Communication. Research Report RR-6741, INRIA, 2008.
- [SWDD09] Jean Souyris, Virginie Wiels, David Delmas, and Hervé Delseny. Formal verification of avionics software products. In *FM*, pages 532–546, 2009.
- [SY99] Ichiro Suzuki and Masafumi Yamashita. Distributed anonymous mobile robots : Formation of geometric patterns. *SIAM Journal on Computing*, 28(4) :1347–1363, 1999.
- [TB08] W. Travis and D.M. Bevly. Trajectory duplication using relative position information for automated ground vehicle convoys. In *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, pages 1022–1032, 2008.
- [TK04] Herbert G. Tanner and Vijay Kumar. Leader-to-formation stability. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20 :443–455, 2004.
- [VDBVDWN09] T Van Den Broek, N Van De Wouw, and H Nijmeijer. Formation control of unicycle mobile robots : a virtual structure approach. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pages 8328–8333, 2009.
- [WC01] Myung Jin Woo and Jae Weon Choi. A relative navigation system for vehicle platooning. In *SICE 2001. Proceedings of the 40th SICE Annual Conference. International Session Papers*, pages 28–31, 2001.
- [WS03] Kirsten Winter and Graeme Smith. Compositional verification for object-z. *Lecture notes in computer science ISSN 0302-9743*, pages 280–299, 2003.
- [YBK01] B J Young, R W Beard, and J M Kelsey. A control scheme for improving multi-vehicle formation maneuvers, 2001.
- [YC05] Soo-Yeong Yi and Kil-To Chong. Impedance control for a vehicle platoon system. *Mechatronics (UK)*, 15(5) :627 – 38, 2005.
- [YCLL08] Ben Yun, B.M. Chen, K. Y. Lum, and T.H. Lee. A leader-follower formation flight control scheme for uav helicopters. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 39–44, 2008.

- [yLP99] Chi ying Liang and Huei Peng. Optimal adaptive cruise control with guaranteed string stability. In *PROCEEDINGS OF THE 1998 AVEC CONFERENCE*, pages 717–722, 1999.
- [ZLX13] Qin Zhang, Lionel Lapierre, and Xianbo Xiang. Distributed control of coordinated path tracking for networked nonholonomic mobile vehicles. *IEEE Trans. Industrial Informatics*, 9(1) :472–484, 2013.

Résumé :

Cette thèse se situe dans la problématique de la conduite en convoi de véhicules autonomes. Ses objectifs sont d'abord, la définition d'une approche de prise de décision pour les systèmes de convoi de véhicules, puis, la définition d'une approche de vérification, adaptée à la preuve de propriétés relatives aux convois de véhicules, avec une attention particulière envers les propriétés de sûreté.

L'approche définie pour la prise de décision est décentralisée: chaque véhicule détermine son comportement de façon locale, à partir de ses propres capacités de perception, sans avoir recours à une communication explicite, de telle sorte que l'organisation du convoi, son maintien et son évolution soient le résultat émergent du comportement de chaque véhicule. L'approche proposée s'applique à des convois suivant plusieurs types de configuration, et permet des changements dynamiques de configuration.

L'approche proposée pour la vérification de propriétés de sûreté des convois de véhicules, adopte le model-checking comme technique de preuve. Pour contourner le problème d'explosion combinatoire rencontré dans la vérification des systèmes complexes, nous avons proposé une méthode compositionnelle de vérification, qui consiste à décomposer le système en sous-systèmes et d'associer une propriété auxiliaire à chacun des sous-systèmes. La propriété globale sera ensuite déduite de l'ensemble des propriétés auxiliaires, par l'application d'une règle de déduction compositionnelle. La complexité calculatoire est mieux maîtrisée car le model-checking s'applique aux sous-systèmes. Nous avons proposé une règle de déduction adaptée aux systèmes de conduite en convoi, en particulier ceux qui sont basés sur des approches locales. La règle considère chaque véhicule comme un composant. Elle est applicable sous la condition que l'ajout d'un nouveau composant au système n'a pas d'influence sur le comportement du reste du système. L'approche locale proposée pour la conduite en convoi satisfait cette condition.

Mots-clés : Convoi de véhicule, système réactif, modélisation formelle, vérification

Abstract:

This thesis places in the framework of Platoons, sets of autonomous vehicles that move together without any material coupling, while keeping a predefined configuration. Goals of the thesis are: first, the definition of a decision making approach for platoon systems. Second, the definition of a method for the verification of safety properties associated to the platoon system.

The proposed decision making approach is decentralized and self-organized. Platoon vehicles are autonomous, they act based only on their perception capabilities. The configuration emerges as a result of the individual behavior of each of the platoon vehicle. The proposed approach can be applied to platoon with different configurations, and allows the dynamic change of configuration.

The proposed verification method uses the model-checking technique. Model checking of complex system can lead to the combinatory explosion problem. To deal with this problem, we choose to use a compositional verification method. The compositional method decomposes the large model, into different components and associates to each component an auxiliary property. The global property can be then deduced from the set of all the auxiliary properties, by applying a compositional deduction rule. We define a deduction rule suitable for the platoon system. The deduction rule considers each vehicle as a component. It is applicable under the assumption, that adding a new component to the system does not modify its behavior. Applying the compositional verification consists in replacing the platoon of n vehicle by an auxiliary property, so that the verification is applied to the state space generated by a single vehicle. The chosen auxiliary property refers to vehicle speed variation.

Keywords: Platoon system, reactive system, formal modeling, verification

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features a blue horizontal bar on the left, followed by the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font.

■ École doctorale SPIM - Université de Technologie Belfort-Montbéliard

F - 90010 Belfort Cedex ■ tél. +33 (0)3 84 58 31 39

■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr



