



Université Lille 1 Sciences et Technologies

Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Automatique, Génie Informatique, Traitement de Signal et Images

Titre

**Contribution à la Gestion de Défaillances d'un
Train de Véhicules Electriques Légers Autonomes**

Par

Kamel BOUIBED

Encadrée par : **Abdelouhab AITOUCHE** et **Mireille BAYART**

Soutenue le 01 juillet 2010

Jury :

- | | |
|--|----------------|
| M. Houcine CHAFOUK. Enseignant chercheur, ESIGELEC Rouen | (Rapporteur) |
| M. Nacer M'SIRDI. Professeur, Ecole Polytechnique de Marseille | (Rapporteur) |
| M. Gautam BISWAS. Professeur, Vanderbilt University, Nashville | (Examineur) |
| M. Nicolai CHRISTOV. Professeur, Université Lille 1 Sciences et Technologies | (Examineur) |
| M. Xavier MOREAU. Professeur, Université Bordeaux 1 | (Examineur) |
| M. Abdelouhab AITOUCHE. Enseignant chercheur, HEI Lille | (Co-directeur) |
| Mme. Mireille BAYART. Professeur, Université Lille 1 Sciences et Technologies | (Co-directeur) |

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées durant ces années de thèse.

Je remercie Madame Mireille Bayart, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, pour m'avoir accueilli dans son équipe et avoir pris la codirection de cette thèse.

Je remercie plus particulièrement Abdel Aitouche, Enseignant chercheur à HEI, pour m'avoir co-encadré.

Je les remercie pour leur pédagogie, leur soutien et pour toutes les discussions instructives et fructueuses que nous avons eues durant toute la durée de ce travail de recherche.

Je remercie Houcine Chafouk, Enseignant Chercheur à l'ESIGELEC de Rouen et Nacer M'Sirdi, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Marseille, d'avoir accepté d'être les rapporteurs actifs de ce présent mémoire.

Je remercie également les membres du jury pour leurs commentaires constructifs et pour avoir apporté un regard neuf sur mes travaux.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres de l'équipe SFSD.

Je tiens à remercier les doctorants et les doctorantes que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant ces trois années de thèse.

*A mes parents Youcef et Arzika,
Mes frères et soeurs Mohand, Nacir, Farida, Samira, Fatma et Dyhia,
Toute ma famille et mes amis, en France et en Algérie,
Grâce à dieu et à eux que j'ai pu avancé.*

Table des matières

Table des figures	ix
--------------------------	-----------

Introduction Générale	1
------------------------------	----------

1	Cadre général	1
2	Contexte et problématique	2
3	Contribution de la thèse	3
4	Organisation du mémoire	5

Publications personnelles	9
----------------------------------	----------

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1	Modélisation d'un train de véhicules	13
1.1.1	Modèles Cinématiques	13
1.1.2	Modèles Dynamiques	19
1.2	Commande des trains de véhicules	22
1.2.1	Les commandes longitudinales	23
1.2.2	Les commandes latérales	25
1.2.3	Le couplage des commandes longitudinale et latérale	27
1.3	Surveillance à base de modèle	29

Chapitre 2

Modélisation d'un véhicule et d'un train de véhicules tout électriques

2.1	Description de RobuCar	38
2.2	Modélisation cinématique de RobuCar	40
2.2.1	Notation	40
2.2.2	Les équations de mouvement	41

2.2.3	Détermination des vitesses de rotation des roues	42
2.3	Modélisation dynamique de RobuCar	43
2.3.1	Les six degrés de liberté	43
2.3.2	Interaction roue-sol	44
2.3.3	Le taux de glissement longitudinal	44
2.3.4	Les angles de braquage et de dérive	44
2.3.5	Mise en équations des différentes dynamiques	45
2.3.6	Conclusion sur la modélisation dynamique de Robucar	53
2.4	Modélisation d'un train de RobuCars	54
2.4.1	La stratégie de train de trois véhicules	54
2.4.2	Modélisation dynamique	54
2.5	Estimation des forces de contact pneus/chaussée	58
2.5.1	Observateur à modes glissants	59
2.5.2	Estimation des états du système	62
2.5.3	Estimation de la dérivée du vecteur d'état	65
2.5.4	Estimation des forces de contact	67
2.5.5	Résultats de simulation	69
2.6	Conclusion	74

Chapitre 3

Surveillance à base de modèle d'un véhicule électrique RobuCar

3.1	Surveillance à base d'observateurs	77
3.1.1	Détection et Isolation des défauts capteurs de RobuCar	81
3.1.2	Détection et isolation des défauts actionneurs de RobuCar	82
3.1.3	Résultats de simulation	83
3.2	Surveillance à base de redondance analytique	90
3.2.1	Redondance analytique non linéaire	90
3.2.2	Détection de défauts capteurs ou actionneurs du RobuCar	98
3.2.3	Résultats de simulation	102
3.3	Conclusion	107

Chapitre 4

Reconfiguration d'un train de RobuCars en présence de défauts

4.1	Commande du train de véhicules sans défauts	110
4.1.1	Rappel du modèle de train de véhicules Robucars	110

4.1.2	Commande longitudinale : basée sur l'inter-distance	112
4.1.3	Commande latérale : basée sur une trajectoire de référence	115
4.2	Reconfiguration d'un train de véhicules	117
4.2.1	Surveillance du train de véhicules	117
4.2.2	Défaut capteur dont le système reste observable	119
4.2.3	Panne du système de direction avant	120
4.2.4	Panne de l'un des moteurs de traction	121
4.2.5	Défaut sur le capteur GPS du véhicule suiveur	121
4.3	Résultats des Simulations	124
4.3.1	Poursuite de trajectoire de référence en absence de défaut	124
4.3.2	Poursuite de trajectoire de référence avec un défaut sur le système de direction avant du premier véhicule	128
4.4	Conclusion	131
Conclusions générales et perspectives		133
1	Conclusions	133
2	Perspectives	136
2.1	Modélisation	136
2.2	Diagnostic	136
2.3	Reconfiguration	136
2.4	Implémentation	137
Annexe A Description de RobuCar		139
A.1	Capteurs installés sur le RobuCar	142
A.1.1	Le GPS	142
A.1.2	La centrale inertielle	143
A.1.3	Le codeur incrémental	144
A.1.4	Le codeur absolu	145
A.1.5	Le télémètre laser	146
Annexe B Changement de repère		147
B.1	Définition des repères	147
B.2	Définition des matrices de passage	148
B.3	Transformation des vitesses de translation et de rotation	150
B.3.1	Vitesse de translation	150
B.3.2	Vitesse de rotation	151

Bibliographie

153

Table des figures

1.1	Train de véhicules pour le transport intelligent	12
1.2	un convoi leader-suiveur	14
1.3	Le convoi de deux véhicules	16
1.4	Modèle latéral	21
1.5	Fausses alarmes	31
1.6	Une non détection	31
2.1	Description de RobuCar	38
2.2	Les différents modes de fonctionnement de RobuCar	40
2.3	Modélisation cinématique du véhicule RobuCar	41
2.4	Force de contact pneu/chaussée	51
2.5	Train de trois véhicules	55
2.6	Trajectoire du véhicule	70
2.7	Estimation des vitesses de rotation des roues	70
2.8	Estimation des vitesses longitudinale et latérale et la vitesse du lacet	71
2.9	Estimation des accélérations de rotation des roues	72
2.10	Estimation des accélérations longitudinale, latérale et celle du lacet	72
2.11	Estimation des forces de contact longitudinales	73
2.12	Estimation des forces de contact latérales	73
3.1	Observateurs dédiés à l'isolation des défauts actionneurs	79
3.2	Observateurs généralisés pour l'isolation des défauts actionneurs	79
3.3	Observateurs dédiés à l'isolation des défauts capteurs	80
3.4	Observateurs généralisés pour l'isolation des défauts capteurs	80

3.5	Détection et isolation des défauts capteurs par un banc d'observateurs . . .	82
3.6	Trajectoire du véhicule	84
3.7	Les vitesses de rotation des roues	85
3.8	Détection de défauts capteurs de vitesse de rotation des roues	85
3.9	Trajectoire de véhicule avec un défaut sur le capteur de position longitudinale	86
3.10	Réaction des résidus r_1, r_2, r_3 et r_4 par rapport au défaut	87
3.11	Réaction des résidus r_5, r_7 et r_9 par rapport au défaut	87
3.12	Défaut sur le moteur de traction de la roue avant droite et les résidus $r_{11},$ r_{12} et r_{13}	88
3.13	Réaction des résidus r_{14}, r_{15}, r_{16} et r_{19} par rapport au défaut actionneur .	89
3.14	Réaction des résidus au défaut sur l'actionneur	97
3.15	Réaction des résidus au défaut sur le capteur de courant	97
3.16	Réaction des résidus au défaut sur le capteur de vitesse	98
3.17	Détection de défaut sur l'actionneur de la roue avant droite	103
3.18	Détection de défaut sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite	104
3.19	Détection de défaut sur le capteur de vitesse longitudinale	105
3.20	Détection de défaut sur le capteur de vitesse latérale	106
4.1	La distance inter-véhiculaire	112
4.2	Commande du véhicule leader avec trajectoire de référence en fonctionne- ment normal	116
4.3	Commande du véhicule suiveur avec trajectoire de référence en fonctionne- ment normal	117
4.4	La reconfiguration par des multi-observateurs	120
4.5	La distance entre les roue ew_i	122
4.6	Commande par mode glissant du train de trois véhicules en fonction des différences de vitesses de rotation des roues	124
4.7	Poursuite de la trajectoire de référence des trois véhicules en fonctionne- ment normal	125
4.8	Les inter-distances entre les véhicules	126

4.9	Commandes des braquages avant et arrière en fonctionnement normal . . .	126
4.10	Braquages avant et arrière des trois véhicules en fonctionnement normal . .	127
4.11	Vitesses longitudinales et latérales des trois véhicules en fonctionnement normal	127
4.12	Poursuite de la trajectoire de référence des trois véhicules avec un défaut sur le système de direction avant du véhicule leader	129
4.13	Les inter-distances entre les véhicules	129
4.14	Commandes des braquages avant et arrière avec défaut d'actionneur de braquage avant du véhicule leader	130
4.15	Braquages avant et arrière des trois véhicules avec défaut	130
4.16	Vitesses longitudinales et latérales des trois véhicules avec défaut	131
A.1	Détail du système de traction/freinage	140
A.2	Détail de la direction et de la suspension du RobuCar	141
A.3	Le vérin électrique	142
A.4	Caractéristiques détaillées du codeur incrémental	144
A.5	Caractéristiques détaillées du codeur absolu	145
A.6	Caractéristiques du télémètre laser SICK LMS221	146
B.1	Les repères pour localiser le véhicule dans l'espace	148
B.2	Les trois rotations de passage entre les repères R_0 et R	150

Introduction Générale

1 Cadre général

Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS FRE/CNRS 3303) de l'Université de Lille 1 Sciences et Technologies. Le travail s'effectue au sein de l'équipe Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques (SFSD) dans les locaux de l'Ecole Polytechnique de Lille. Les thématiques traitées par l'équipe sont : Surveillance et diagnostic, Tolérance aux fautes, Conception de systèmes intelligents distribués, Détection décentralisée, Supervision. L'enjeu est de développer des modèles et des méthodes d'analyse en vue de la conception et de la mise en oeuvre d'algorithmes destinés aux couches "surveillance, diagnostic et tolérance aux fautes" dans les systèmes de supervision.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet CISIT (Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité des Transports - <http://www.cisit.org/>). Ce campus interdisciplinaire rassemble un jeu de compétences uniques, avérées et indispensables pour répondre aux enjeux sociétaux et économiques des véhicules de demain. Afin de répondre aux besoins croissants de mobilité et aux exigences environnementales de plus en plus pressantes CISIT a identifié quatre grandes cibles de portée internationale, que sont :

- La gestion optimale des chaînes multimodales
- Les nouveaux défis pour les véhicules propres, sécuritaires et légers
- La mobilité intelligente, sûre et sécurisée
- La sécurité morpho-adaptative et facteurs humains

De ces quatre grandes cibles découlent diverses actions de recherche s'appuyant sur des travaux fondamentaux, des travaux appliqués et des transferts de technologie visant l'in-

novation. Nos travaux s'inscrivent dans le thème mobilité intelligente, sûre et sécurisée. Ces actions assurent ainsi la continuité entre la recherche amont, la recherche finalisée et le développement technologique. Ce projet est soutenu par la Région Nord Pas de Calais, le Centre National de la Recherche Scientifique, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et l'Union Européenne.

Dans le domaine du transport, l'équipe SFSD possède une plate forme expérimentale dotée de 3 véhicules de type RobuCar qui sont développés par la société Robosoft (<http://robosoft.fr/eng/>). Ces véhicules tout électriques suscitent un grand intérêt de la part des chercheurs et des entreprises. Ce type de véhicules offre de nombreux avantages par rapport aux véhicules classiques à base de moteurs à combustion en terme environnemental et permet également de meilleures performances en termes de contrôlabilité et de reconfigurabilité en présence de défaillances. Ces véhicules sont utilisés pour tester différents travaux tels que fusion de données et localisation, commande de plusieurs véhicules en attelage virtuel (train de véhicules) et pour les recherches dans le domaine de la surveillance et de la reconfiguration.

2 Contexte et problématique

Pour répondre aux problèmes de saturation du réseau routier dans les centres villes, et faciliter la mobilité des citoyens, il est devenu nécessaire d'imaginer d'autres systèmes de transport.

Depuis plusieurs années, différents projets ont été consacrés au développement de systèmes de transport individuel ou semi-collectif public utilisant des véhicules électriques. Les travaux ont essentiellement porté sur les aspects instrumentation, localisation, alimentation, contrôle, pour pouvoir commander les véhicules de manière autonome ou en convoi de véhicules. Très peu de travaux concerne la surveillance de ces véhicules seul ou en convoi.

Parallèlement, la complexité croissante des systèmes automatisés et les contraintes de compétitivité en termes de coût de production, de disponibilité et de sécurité, ont mobilisé durant ces dernières années une large communauté de chercheurs pour améliorer la

surveillance, le diagnostic et la tolérance aux fautes des systèmes [Blanke *et al.*, 2006]. En complément des travaux sur la fiabilité lors de la conception de systèmes, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts et des algorithmes de reconfiguration ou de tolérance aux fautes. Les premiers, connus sous l'expression anglaise Fault Detection and Isolation (FDI), consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence décrivant le fonctionnement normal (pour la détection des défauts), ou décrivant différents genres de défauts (pour l'analyse et l'isolation des pannes), tout en minimisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. Les deuxièmes consistent à réagir après la détection d'un défaut pour permettre au système de continuer à fonctionner en mode dégradé ou de s'arrêter en cas d'impossibilité de poursuivre sa tâche.

La dégradation des performances de ces algorithmes est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires.

3 Contribution de la thèse

Les travaux de thèse se situent dans le cadre général de la surveillance d'un train de véhicules. L'objectif à terme est de disposer d'un convoi de véhicules sûr de fonctionnement ayant la capacité de réagir à une défaillance d'un des véhicules et étant capable de se reconfigurer. Une première thèse a été consacrée à la prise en compte des aspects surveillance et reconfiguration d'un véhicule en considérant les pannes actionneur [Dumont, 2006]. Cette première approche, nous a confortés dans le besoin de disposer d'un modèle plus précis du véhicule de manière à parfaire la surveillance.

Sur un véhicule, tous les efforts externes sauf les efforts aérodynamiques sont générés par l'interface roue-sol. Ainsi la compréhension et la connaissance des modes de fonctionnement des pneumatiques, donc de la modélisation ou de l'estimation des efforts et moments développés à l'interface pneu-sol sont essentielles pour toute étude du comportement dynamique d'un véhicule.

Parmi les fonctions de base des pneumatiques, citons les forces longitudinales qui accé-

lèrent et freinent le véhicule et les forces latérales qui permettent au véhicule de tourner. La mesure de ces forces est difficile et leur modélisation est complexe, mais nous savons que la connaissance de ces forces est très importante pour équiper le véhicule de quelques systèmes électroniques comme l'ABS (*Anti-lock Brake Systems*) ou l'ESP (*Electronic Stabilisation Programme*). Les dynamiques du véhicule dépendent également des forces de contact qui sont des fonctions non linéaires. Les forces longitudinales dépendent non linéairement des glissements des roues et les forces latérales dépendent non linéairement des angles de dérive des roues. Pour estimer ces forces, nous avons développé une méthode basée sur un observateur à modes glissants. L'importance du phénomène de réticence (*chattering*) des observateurs de niveau 1 nous a conduit à choisir un observateur de niveau 2. Ce travail a fait l'objet de deux publications dans des conférences internationales [Bouibed *et al.*, 2008a] [Bouibed *et al.*, 2008b].

L'implémentation de divers capteurs et actionneurs sur le véhicule lui donne plus d'intelligence et lui permet une navigation autonome. C'est pourquoi il est très important d'implémenter des systèmes de supervision pour la détection et l'isolation des défauts qui peuvent survenir sur les capteurs ou les actionneurs. Dans cette thèse, deux méthodes de surveillance appliquées au véhicule électrique sont étudiées en utilisant le modèle non linéaire affine en la commande. La première est basée sur l'observateur non linéaire à mode glissant. Son principe est l'estimation des sorties du système par des observateurs et la comparaison à celles mesurées par les capteurs. Cette différence est considérée comme détecteur de défaut (ou résidu). La deuxième approche est la génération des relations de redondance analytique non linéaires (espace de parité non linéaire). Elle consiste à éliminer les états inconnus pour obtenir des relations qui ne sont fonction que des variables connues (entrées, sorties et paramètres du système).

En ce qui concerne la première méthode, nous utilisons la technique de multi-observateurs pour améliorer l'isolation des défauts. Chaque observateur n'utilise qu'une partie des entrées/sorties et génère un ensemble de résidus qui correspond au nombre de sorties. Chaque ensemble de ces résidus constitue une signature dédiée à un défaut particulier. L'idéal est d'avoir une signature pour chaque défaut d'un actionneur ou d'un capteur pour permettre une meilleure isolation.

Concernant la deuxième méthode, en plus de la génération des relations de redondance analytique non linéaires par la méthode de l'espace de parité, nous utilisons des observateurs différentiels à modes glissants pour l'estimation des dérivées successives des entrées et des sorties. En effet, les résidus obtenus par cette méthode contiennent ces dérivées et les calculer par la dérivation classique amplifie fortement le bruit des mesures.

L'application au véhicule électrique RobuCar de ces deux méthodes permet de comparer leurs performances en terme d'isolation. Ces travaux ont fait l'objet de publications dans un journal international [Bouibed *et al.*, 2009d], trois conférences internationales [Bouibed *et al.*, 2009c] [Bouibed *et al.*, 2009e] [Bouibed *et al.*, 2010] et un ouvrage collectif [Bouibed *et al.*, 2009a].

Une fois, la surveillance d'un véhicule établie, plusieurs stratégies de réalisation d'un train de véhicules sont possibles. Nous réalisons un train de trois véhicules électriques RobuCar avec deux stratégies différentes : la première basée sur la transmission des vitesses de rotation des roues d'un véhicule à son suiveur. Le but est de maintenir à zéro, et à chaque instant, la différence entre les vitesses de rotation de deux véhicules successifs pour avoir l'inter-distance constante entre les deux. La deuxième stratégie consiste à suivre une trajectoire et maintenir une distance de sécurité entre les véhicules en utilisant les mesures des télémètres laser. Dans ce cas, la communication entre les véhicules n'est pas nécessaire et la trajectoire à suivre est connue à l'avance [Bouibed *et al.*, 2009b].

Sur le train de véhicules développé, nous réalisons des stratégies de reconfiguration dans le cas de l'apparition de certains défauts. Lorsqu'un défaut est détecté par le bloc de surveillance, la stratégie consiste à reconfigurer le train pour qu'il puisse continuer sa mission en mode dégradé ou arrêter le véhicule défaillant et laisser les autres finir leur parcours.

4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

- Chapitre 1 - Etat de l'art :

Dans ce chapitre, nous présentons quelques travaux existant dans la littérature concernant la modélisation et la commande des trains de véhicules. Ensuite, un rappel sur les

méthodes de surveillance à base de modèle est proposé. Nous présentons quelques travaux sur les méthodes de surveillance à base d'observateurs et quelques travaux sur la méthode de l'espace de parité. Enfin, des notions sur l'observateur et l'observabilité des systèmes non linéaires sont rappelées avant de présenter l'observateur à modes glissants que nous utilisons dans notre travail.

- Chapitre 2 - Modélisation d'un véhicule et d'un train de véhicules tout électriques :

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description, la modélisation cinématique et la modélisation dynamique du véhicule électrique Robucar. Dans le cas de la modélisation cinématique, trois degrés de liberté du véhicule sont considérés : les deux translations longitudinale et latérale avec la rotation du lacet. Dans un premier temps, nous écrivons les équations de mouvement des deux centres des essieux avant et arrière. Puis, nous donnons les équations de mouvement du centre de gravité du véhicule. En utilisant les formules de la cinématique, nous calculons les vitesses de rotation des quatre roues du véhicule [Baille *et al.*, 1999].

Les équations régissant la dynamique du véhicule RobuCar sont utilisées lors de la modélisation dynamique. Les dynamiques prises en compte sont celles du mouvement longitudinal, du mouvement latéral, de la rotation des quatre roues, des braquages avant et arrière et du lacet. Les dynamiques de tangage et de roulis ne sont pas prises en considération dans ce mémoire pour des raisons qui seront évoquées ultérieurement. Nous modélisons les forces de contact entre les pneumatiques et la chaussée. Pour cela, nous utilisons un modèle empirique [Michelin, 2001], qui est une représentation mathématique décrivant la forme canonique de la force longitudinale (latérale) au niveau du contact roue-sol en fonction du glissement longitudinal (angle de dérive). Enfin, le modèle est mis sous forme d'une représentation d'état. Le vecteur d'entrée est composé des quatre couples de traction appliqués aux quatre roues et les deux couples de direction avant et arrière. Le vecteur d'état est composé des quatre vitesses de rotation des roues, de la position et vitesse longitudinale, de la position et vitesse latérale, des angles et vitesses de braquage avant et arrière et de la vitesse du lacet. Le vecteur de sortie est composé des quatre vitesses de rotation des roues, des positions longitudinale et latérale, des angles de braquage avant et arrière et de

la vitesse du lacet.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation du train de véhicules. Nous présentons quelques modèles existant dans la littérature [Ndoudi-Likoho, 1997] [Bom *et al.*, 2005a] [Bom *et al.*, 2005b] [Petrov et Parent, 2006] [Wang *et al.*, 2006]. Certains travaux utilisent des modèles cinématiques, dans ce cas ils prennent en considération les trajectoires des véhicules (positions, orientations et vitesses à chaque instant). D'autres utilisent des modèles dynamiques, dans ce cas ils modélisent les différentes dynamiques des véhicules constituant le convoi ainsi que la dynamique de l'inter-distance entre véhicules. Nous présentons ensuite la modélisation que nous proposons pour le train de véhicules. Nous utilisons le modèle dynamique d'un véhicule, développé dans la première partie, pour le leader. Pour les véhicules suiveurs, nous ajoutons au modèle l'inter-distance e_{xi} et l'angle d'orientation Φ_i . Ceci nous permet d'avoir un modèle dynamique identique pour chaque véhicule suiveur.

Ainsi la modélisation reste valable quelque soit le nombre de véhicules dans le convoi. Ce modèle est alors utilisé pour générer des algorithmes de surveillance.

A la fin de ce chapitre, nous avons estimé les forces de contact entre les pneumatiques et la chaussée en utilisant une méthode basée sur des observateurs à modes glissants.

- Chapitre 3 - Surveillance à base de modèle d'un véhicule électrique :

L'objectif dans ce chapitre est de comparer des méthodes de détection et d'isolation des défaillances qui surviennent sur les capteurs et sur les actionneurs du véhicule électrique. De manière à choisir la méthode la mieux adaptée en terme de performances en détection et de localisation, nous avons étudié deux méthodes différentes à base de modèle. L'une à base d'observateurs [Zolghadri *et al.*, 1996] [Patton et Chen, 1997] [Shen et Hsu, 1998] [Jiang et Chowdhury, 2005] [Gao et Wang, 2006] [Yan et Edwards, 2007].

L'autre est basée sur la génération des relations de redondance analytique non linéaire (espace de parité) [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001a] [Leuschen *et al.*, 2002]. Dans la première méthode, le principe est d'estimer les sorties du système par des observateurs et l'erreur d'estimation est considérée comme résidu. Dans la deuxième approche, l'idée est d'éliminer les états et générer des équations, appelées relations de redondance analytique, qui ne sont fonction que des valeurs connues (entrées, mesures et les paramètres du mo-

dèle).

Enfin, nous avons appliqué les deux méthodes sur le RobuCar pour la détection et l'isolation des défauts actionneurs et capteurs dans le but de voir quelles sont les avantages et les inconvénients des deux méthodes.

Ces méthodes sont utilisées par la suite pour la reconfiguration du train de véhicules.

- Chapitre 4 - Reconfiguration d'un train de RobuCars en présence de défauts :

Ce chapitre est consacré à la reconfiguration du train de véhicules lors de l'apparition d'un défaut sur l'un des trois véhicules. Dans un premier temps, nous développons une commande longitudinale et une commande latérale pour le fonctionnement normal du train de véhicule. La commande longitudinale utilise les mesures du télémètre laser qui sont comparées avec des consignes d'inter-distances pour générer des commandes pour les moteurs de traction. La commande latérale utilise la différence entre une trajectoire de référence et celle donnée par le GPS pour générer des commandes de braquage.

Par la suite, nous analysons les différentes situations de défaillance dans lesquelles peut se trouver le train de véhicules. Nous traitons quelques situations et proposons quelques stratégies de reconfiguration du train de véhicules lors de l'apparition de quelques types de défaillances sur les capteurs et sur les actionneurs.

- Conclusions générales et perspectives :

A la fin de ce de thèse, nous présentons les conclusions de notre travail et nous détaillons quelques perspectives.

Publications personnelles

Journaux internationaux

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2009). Nonlinear parity space applied to an electric autonomous vehicle. *Journal of Energy and Power Engineering*, 3(12) :10-18.

Ouvrages collectifs

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2009). Modelling and Control of a Train of Autonomous Electric Vehicles. *M Lecture Notes in Computer Science, Intelligent Robotics and Applications*, pp. 126-134. © Springer Berlin Heidelberg, 16 Decembre 2009. ISBN 978-3-642-10816-7.

Conférences internationales avec comité de lecture et publication des actes

K. Bouibed, A. Aitouche, A. Rabhi et M. Bayart (2008). Estimation des forces de contact roue-sol par un observateur différentiel. *Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'2008*, Bucarest, Roumanie.

K. Bouibed, A. Aitouche, A. Rabhi et M. Bayart (2008). Estimation of contact forces of a four-wheel steering electric vehicle by differential sliding mode observer. *IEEE Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, volume 1019, pages 541-546, Annaba, Algeria.

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2009). Nonlinear parity space applied to an autonomous vehicle. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pages 198-203, Changchun, China.

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2009). Sensor fault detection by sliding mode observer applied to an autonomous vehicle. International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications, pages 621-626, Zouk Mosbeh, Lebanon.

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2009). Modelling and control of a train of autonomous electric vehicles. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, pages 126-134, Singapore.

K. Bouibed, A. Aitouche et M. Bayart (2010). Sensor and actuator fault detection and isolation using two model based approaches : Application to an autonomous electric vehicle. IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Marrakech, Morocco.

Chapitre 1

Etat de l'art

Ces dernières années, le nombre de véhicules sur les routes a augmenté exponentiellement, ce qui a engendré une saturation des infrastructures existantes. La solution est soit de créer des nouvelles infrastructures soit d'utiliser de façon optimale les ressources disponibles. Mais, en raison de contraintes spatiales, environnementales et financières, la construction de nouvelles routes n'est pas réalisable partout. Cependant, il est fort important d'optimiser l'usage des véhicules sur les routes en gardant l'aspect sécuritaire et de développer encore plus de transports en commun. Cela a encouragé les chercheurs et les industriels à explorer le domaine des véhicules intelligents ce qui les a amené à développer des systèmes automatiques d'aides à la conduite, ABS (Anti-lock Brake System), ESP (Electronic Stabilization Programme), ou encore des véhicules autonomes. Ce type de technologie a montré une grande efficacité par rapport aux véhicules classiques conduits par les humains parce que les différents facteurs humains comme les erreurs humaines et les temps de réaction sont considérablement réduits avec les véhicules intelligents. Avec ce type de véhicules, on peut arriver à concevoir un train de véhicules dans lequel le véhicule de tête (leader) suit une trajectoire désirée et les autres véhicules (suiveurs) suivent automatiquement le leader tout en respectant des distances de sécurité.

Ils existent d'autres domaines dans lesquels il peut y avoir un intérêt de développer et de réaliser des trains de véhicules (robots) autonomes. Comme le transport de passagers, on peut construire une flotte de véhicules autonomes intelligents, avec une communication inter-véhiculaire, avec le poste de contrôle et avec les infrastructures. Une trajectoire peut

être imposée aux véhicules et qui représente le parcours contenant les arrêts pour ramasser les passagers. Dans ce cas les véhicules seront commandés ensemble sous forme d'un convoi de telle sorte que le temps de passage sur les arrêts soit respecté. Dans le transport de marchandises, on peut développer, dans un espace confiné (entreprises, ports, aéroports,...), un train de véhicules dans lequel le véhicule de tête impose la trajectoire et les autres suivent automatiquement. Cette trajectoire peut être générée soit manuellement soit automatiquement.

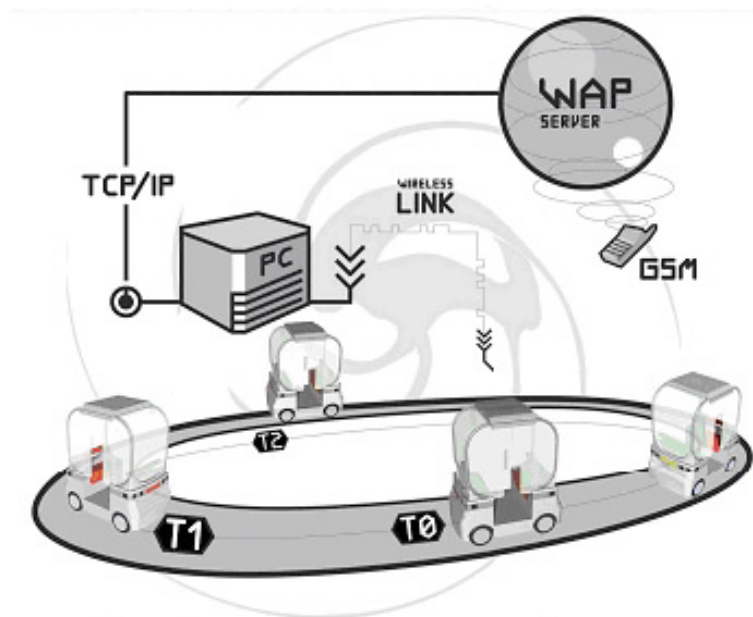


FIG. 1.1 – Train de véhicules pour le transport intelligent

Différents travaux et projets ont été effectués sur les convois de véhicules, les principaux domaines de recherche concernent la commande, les problèmes de communication inter véhicules, ou véhicules et infrastructure, la motorisation. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes intéressés à la surveillance de ces trains de véhicules. Partant d'une configuration en fonctionnement normal, l'objectif est d'étudier les possibilités de surveillance et de reconfiguration d'un train de véhicules. Dans ce premier chapitre, nous présenterons différents modèles cinématiques et dynamiques de convois de véhicules. Puis nous nous intéresserons aux aspects commandes du convoi : selon les objectifs à atteindre, deux types de commandes peuvent être envisagées, une commande longitudinale ou une commande latérale, nous verrons qu'il peut être nécessaire d'associer les deux. Dans un

second temps, nous présenterons les méthodes de surveillance à base de modèles, nous nous limiterons aux méthodes utilisées dans le cadre de ce travail, à savoir la surveillance par observateurs et la surveillance par espace de parité. L'impossibilité de mesurer certains paramètres sur les véhicules, nous conduira à développer des observateurs à modes glissants, la dernière partie de ce chapitre, est consacré à un rappel sur ces observateurs.

1.1 Modélisation d'un train de véhicules

Nous présentons quelques modèles des trains de véhicules existants dans la littérature. Plusieurs laboratoires travaillent sur les trains de véhicules et utilisent des modèles différents. Certains utilisent des modèles cinématiques (trajectoires des véhicules : positions, orientations et vitesses à chaque instant). D'autres utilisent des modèles dynamiques (dynamiques des véhicules, dynamique de l'inter-distance,...etc).

1.1.1 Modèles Cinématiques

Au niveau national, on peut citer les travaux développés dans [Ndoudi-Likoho, 1997], [Bom *et al.*, 2005b] et [Petrov et Parent, 2006].

Au niveau international, en terme de modélisation cinématique des convois de véhicules, on peut citer les travaux de [Wang et Qi, 2001] et [Wang *et al.*, 2006].

Suivi de trajectoire du leader

Dans ce type de modèle, la trajectoire du leader est imposée, soit manuellement soit automatiquement, et les autres véhicules suivent automatiquement la trajectoire du leader. [Ndoudi-Likoho, 1997] a développé un modèle d'un système de deux véhicules (leader et suiveur) avec les hypothèses suivantes :

1. les véhicules qui constituent le convoi sont identiques et mono corps
2. la distance entre les véhicules est celle entre les deux essieux arrière de chaque véhicule
3. les véhicules sont des corps plats et rigides avec des roues conventionnelles
4. les véhicules roulent sur une surface horizontale et parfaitement plane

5. les véhicules sont complètement motorisés
6. les roues sont indéformables et la zone de contact roue/sol est ponctuelle
7. la vitesse linéaire du point de contact roue/sol est nulle (sans glissement)
8. les véhicules sont non dégénérés

La figure 1.2 montre deux véhicules suiveurs dans un convoi constitué de N véhicules mono corps tous identiques.

Les coordonnées de ce convoi sont la concaténation des coordonnées de chaque véhicule,

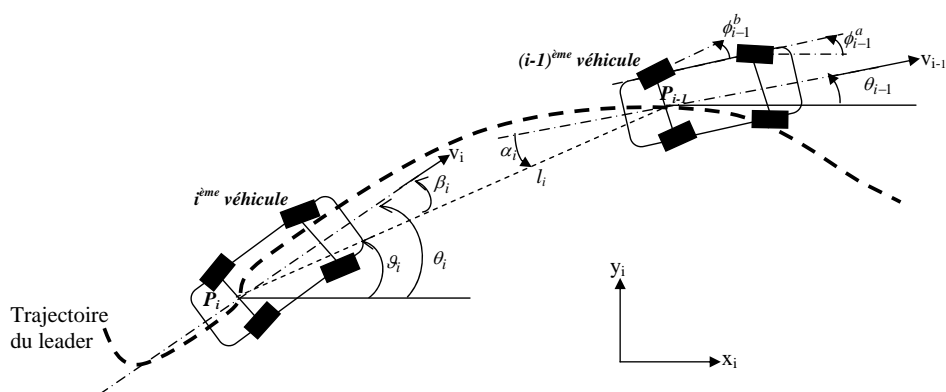


FIG. 1.2 – un convoi leader-suiveur

représentées par le vecteur :

$$\xi = [\xi_1, \xi_1, \dots, \xi_N]^T \in \mathfrak{R}^{n.N} \quad (1.1)$$

Les coordonnées relatives des $N-1$ véhicules suiveurs sont introduites par une transformation T et définies par :

$$z_i = [\alpha_i, l_i, \beta_i, \phi_i^a, \phi_i^b]^T = T(\xi_i, \xi_{i-1}) \quad i \in [2, N].$$

avec

$$T(\xi_i, \xi_{i-1}) = \begin{pmatrix} \theta_i - \vartheta_i \\ \sqrt{(y_{i-1} - y_i)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2} \\ \theta_i - \vartheta_i \\ \phi_i^a \\ \phi_i^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_i \\ l_i \\ \beta_i \\ \phi_i^a \\ \phi_i^b \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

où $\vartheta_i = \text{atan2}(y_{i-1} - y_i, x_{i-1} - x_i)$

La fonction atan2 est ici définie telle que :

$$\sin(\text{atan2}(x, y)) = y/\sqrt{x^2 + y^2} \text{ et } \cos(\text{atan2}(x, y)) = x/\sqrt{x^2 + y^2}.$$

Après quelques calculs et transformations [Ndoudi-Likoho, 1997], le modèle cinématique d'un convoi de véhicules, ayant quatre roues directrices, est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}_i = v_i \frac{1}{l_i} \sin(\beta_i + \phi_i^S) + \sin\beta_i \cos\phi_i^D - v_{i-1} \frac{1}{l_i} \sin(\alpha_i + \phi_{i-1}^S) + \sin\alpha_i \cos\phi_{i-1}^D \\ \quad + v_{i-1} \frac{1}{L} \sin\phi_{i-1}^D \\ \dot{l}_i = -v_i \cos(\beta_i + \phi_i^S) + \cos\beta_i \cos\phi_i^D + v_{i-1} \cos(\alpha_i + \phi_{i-1}^S) + \cos\alpha_i \cos\phi_{i-1}^D \\ \dot{\beta}_i = v_i \frac{1}{l_i} \sin(\beta_i + \phi_i^S) + \sin\beta_i \cos\phi_i^D - v_{i-1} \frac{1}{l_i} \sin(\alpha_i + \phi_{i-1}^S) + \sin\alpha_i \cos\phi_{i-1}^D \\ \quad + v_i \frac{1}{L} \sin\phi_i^D \\ \dot{\phi}_i^a = \epsilon_i^a \\ \dot{\phi}_i^b = \epsilon_i^b \end{array} \right. \quad (1.3)$$

$$\phi_i^D = \phi_i^a - \phi_i^b \text{ et } \phi_i^S = \phi_i^a + \phi_i^b.$$

où v_i est la vitesse longitudinale du véhicule i , L la distance entre les deux essieux avant et arrière, ϵ_i^a et ϵ_i^b sont les entrées permettant le braquage des roues avant et arrière respectivement. Les variables α_i et β_i sont les orientations respectives des $(i-1)^{\text{ème}}$ et $i^{\text{ème}}$ véhicule dans un repère mobile dont l'axe des abscisses coïncide avec la droite reliant les point P_{i-1} et P_i (voir la figure 1.2).

Modèle à base de position et orientation relatives

Les travaux présentés dans [Petrov et Parent, 2006] consistent au développement d'une commande adaptative pour un convoi de deux véhicules électriques de type Cy-cab. Les vitesses linéaires et angulaires du véhicule de tête sont considérées comme des paramètres constants inconnus. Les informations nécessaires pour la commande du véhicule suiveur sont la position et l'orientation relatives par rapport au véhicule de tête, qui sont obtenues par des capteurs de bord. Les vitesses de commande de véhicule suiveur

sont calculées en utilisant les vitesses estimées du véhicule de tête à partir de la partie dynamique du contrôleur proposé. Pour une vitesse de référence constante du leader, le train de deux véhicules va se déplacer suivant une courbure similaire pour les deux véhicules avec une inter-distance respectée. Le convoi de deux véhicules se déplace dans un plan horizontal (figure 1.3).

Pour concevoir la loi de commande, un modèle cinématique est utilisé pour représenter les équations de mouvement du véhicule suiveur dans le repère du véhicule de tête.

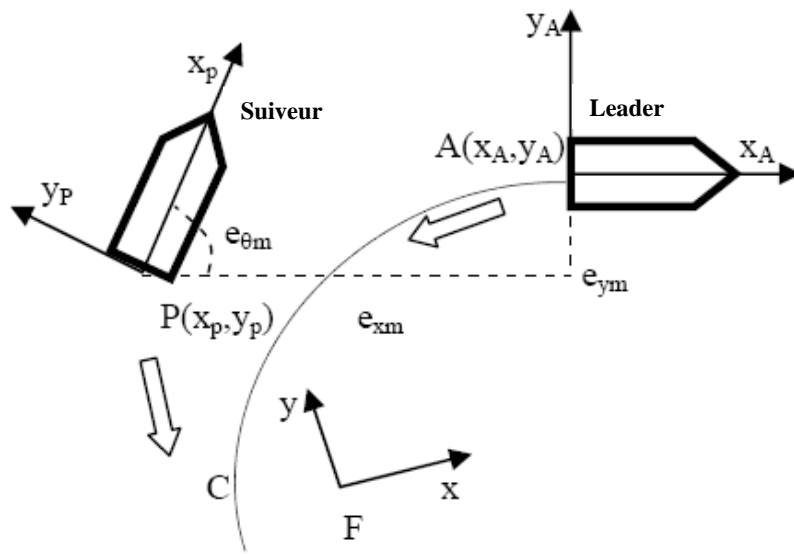


FIG. 1.3 – Le convoi de deux véhicules

On suppose qu'il n'y a pas de glissement entre les roues et la chaussée. A et P situés au centre de l'essieu arrière de chaque véhicule sont respectivement les points de guidage des véhicules leader et suiveur. Les positions et orientations de chaque véhicule par rapport au repère inertiel (F, x, y) sont données par les vecteurs $q_A = [x_A, y_A, \theta_R]^T$ pour le leader et $q_P = [x_P, y_P, \theta]^T$ pour le suiveur. Les positions et orientations du suiveur dans le repère du leader sont données par :

$$\begin{pmatrix} e_{xm} \\ e_{ym} \\ e_{\theta m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_R & \sin\theta_R & 0 \\ -\sin\theta_R & \cos\theta_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_P - x_A \\ y_P - y_A \\ \theta - \theta_R \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Les distances et orientation relatives sont mesurées par des radars. Lorsqu'on connaît la position et l'orientation des radars par rapport au repère local de véhicule, en utilisant des relations géométriques et des transformations de coordonnées, on peut calculer la position et l'orientation du repère $P(x_P, y_P)$, qui a pour origine le centre de l'essieu arrière du véhicule suiveur, dans le repère du leader $A(x_A, y_A)$ placé au centre de l'essieu arrière du véhicule de tête.

En dérivant (1.4) par rapport au temps, en tenant compte des contraintes de non holonomie, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{e}_{xm} = -v_{Ax} + v_{Px} \cos e_{\theta m} + \omega_R e_{ym} \\ \dot{e}_{ym} = v_{Px} \sin e_{\theta m} - \omega_R e_{xm} \\ \dot{e}_{\theta m} = -\omega_R + \omega \end{cases} \quad (1.5)$$

où (v_{Ax}, ω_R) et (v_{Px}, ω) sont les vitesses linéaires et angulaires des deux véhicules leader et suiveur respectivement.

L'objectif dans ce travail est d'imposer une trajectoire de référence pour le véhicule de tête et une inter-distance constante puis concevoir une loi de commande qui permet au véhicule suiveur de suivre le véhicule de tête tout en restant sur la même trajectoire et tout en gardant l'inter-distance constante. Les détails sur la conception de la loi de commande peuvent être obtenus dans [Petrov et Parent, 2006].

Suivi d'une trajectoire de référence

Dans [Bom *et al.*, 2005b] et [Bom *et al.*, 2005a], les vitesses des véhicules sont considérées faibles, aussi les auteurs supposent que le modèle cinématique peut décrire le comportement des véhicules. Pour réaliser le train de véhicules, chaque véhicule est équipé d'un GPS RTK (*Real Time Kinematic Global Positioning System*) et d'un système de communication WIFI pour l'échange d'informations entre les véhicules. Le principe est d'imposer une trajectoire de référence au véhicule de tête (automatiquement ou manuellement) et les autres véhicules suivent l'un derrière l'autre à l'aide des contrôleurs embarqués.

Dans ces travaux, le Cycab est décrit par un modèle tricycle : les deux roues avant sont remplacées par une roue virtuelle située à la mi-distance entre les deux roues réelles. Le

modèle cinématique de la $i^{\text{ème}}$ voiture du convoi s'exprime sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{s}_i = v_i \frac{\cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} \\ \dot{y}_i = v_i \sin \tilde{\theta}_i \\ \dot{\tilde{\theta}}_i = v_i \left(\frac{\tan \delta_i}{L} - \frac{c(s_i) \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} \right) \end{cases} \quad (1.6)$$

Notations :

C est la trajectoire de référence définie dans un repère absolu $[A, X_A, Y_A]$.

O_i est le centre de l'axe reliant les deux roues arrières de la $i^{\text{ème}}$ voiture.

M_i c'est le point le plus proche entre O_i et C .

Le vecteur $[s_i \ y_i \ \tilde{\theta}_i]^T$ représente l'état du $i^{\text{ème}}$ véhicule.

s_i est l'abscisse curviligne du véhicule i le long de la trajectoire C .

y_i est la déviation latérale du véhicule i par rapport à la trajectoire C .

$\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_c(s_i)$ représente la déviation angulaire du $i^{\text{ème}}$ véhicule par rapport à la trajectoire C .

$c(s_i)$ représente la courbure de la trajectoire C au point M_i et $\theta(s_i)$ représente l'angle d'orientation de la tangente de C au point M_i par rapport au repère $[A, X_A, Y_A]$.

θ_i représente la direction du $i^{\text{ème}}$ véhicule au pont O_i par rapport au repère $[A, X_A, Y_A]$.

δ_i est le braquage de la roue avant du $i^{\text{ème}}$ véhicule.

L est la base de la roue.

v_i est la vitesse linéaire du véhicule i au point O_i .

L'objectif de la commande est de maintenir y_i et $\tilde{\theta}_i$ à 0, grâce à la commande du volant δ .

Par une transformation inversible de l'état et de la commande, le modèle non linéaire (1.6) peut être converti pour obtenir un découplage entre la commande latérale et la commande longitudinale. Le nouveau modèle est donné par :

$$\begin{cases} \dot{a}_{1i} = m_{1i} \\ \dot{a}_{2i} = a_{3i} m_{1i} \\ \dot{a}_{3i} = m_{2i} \end{cases} \quad (1.7)$$

où $(a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}) = (s_i, y_i, (1 - c(s_i)y_i) \tan \tilde{\theta}_i)$ et $M = (m_{1i}, m_{2i})$ sont respectivement les nouveaux vecteurs d'état et de commande.

Avec cette forme, une loi de commande longitudinale peut être développée afin de contrôler le convoi de véhicules. Les détails sur cette commande longitudinale sont développés dans [Bom *et al.*, 2005b] et [Bom *et al.*, 2005a].

Malgré leurs intérêts, les modèles cinématiques ont des applications très limitées. Leur principal point faible est de considérer le véhicule sans masse, donc de négliger toutes les forces agissant sur le système. Ajoutons à cela, l'hypothèse de non glissement de la roue en contact avec le sol et de considérer la surface de contact étant ponctuelle. Pour faire de la surveillance et/ou de la reconfiguration ou commande tolérante aux défauts, nous avons besoin des modèles précis pour représenter le fonctionnement réel du système. C'est pour cette raison qu'on doit prendre en considération le plus possible de phénomènes physiques présents représentant les dynamiques du véhicule.

1.1.2 Modèles Dynamiques

Les modèles dynamiques prennent en considération les différentes dynamiques de chacun des véhicules constituant le convoi. En général, on associe deux types de modèles pour contrôler le train de véhicules : un modèle longitudinal, basé sur la modélisation de l'inter-distance entre deux véhicules successifs dans un convoi, et un modèle latéral basé sur la modélisation de l'écart latéral de chaque véhicule par rapport à la trajectoire désirée et l'angle d'orientation formé par les deux axes de deux véhicules successifs. Le premier est donc pour développer une commande longitudinale pour maintenir constant l'écart entre les véhicules et le deuxième pour la commande latérale qui maintient les véhicules sur une même trajectoire. Le choix des modèles dépend du types de véhicules, l'instrumentation, l'infrastructure, ...etc. Examinons quelques travaux existant dans la littérature sur les modèles dynamiques longitudinaux et latéraux.

Modèles dynamiques longitudinaux

Dans [Stankovic *et al.*, 2000], un modèle dynamique longitudinal d'un train de véhicules a été utilisé pour faire ensuite de la commande. Le $i^{\text{ème}}$ véhicule, appartenant à un convoi de n véhicules, peut être représenté par le modèle dynamique de troisième ordre

suivant :

$$\begin{cases} \dot{d}_i = v_{i-1} - v_i \\ \dot{v}_i = a_i \\ \dot{a}_i = f_i(v_i, a_i) + g(v_i)\eta_i \end{cases} \quad (1.8)$$

où $d_i = x_{i-1} - x_i$ est la distance entre le $i^{\text{ème}}$ et le $(i-1)^{\text{ème}}$ véhicule. x_i et x_{i-1} sont leurs positions respectives. v_i et a_i sont respectivement la vitesse et l'accélération du $i^{\text{ème}}$ véhicule. η_i est l'entrée appliquée au moteur. Les fonctions $f_i(v_i, a_i)$ et $g_i(v_i)$ sont données par :

$$f_i(v_i, a_i) = -\frac{2K_{di}}{m_i}v_i a_i - \frac{1}{\tau_i(v_i)}\left[a_i + \frac{K_{di}}{m_i}v_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i}\right] \quad (1.9)$$

$$g_i(v_i) = \frac{1}{m_i\tau_i(v_i)} \quad (1.10)$$

où m_i représente la masse du $i^{\text{ème}}$ véhicule, τ_i la constante du temps de son moteur, K_{di} le coefficient de frottement aérodynamique et d_{mi} le coefficient de frottement mécanique.

Dans [Swaroop *et al.*, 2001], un modèle dynamique longitudinal des véhicules suiveurs d'un train de véhicules a été utilisé pour contrôler le convoi et maintenir les inter-distances à une valeur désirée L_i . Une erreur de l'inter-distance est définie pour chaque véhicule, elle est exprimée par :

$$\epsilon_i = x_i - x_{i-1} + L_i \quad (1.11)$$

Le modèle dynamique longitudinal du véhicule i dans le convoi est donné par l'expression suivante :

$$\ddot{x}_i = \frac{u_i - c_i\dot{x}_i^2 - f_i}{M_i} \quad (1.12)$$

où x_i , u_i , c_i , f_i et M_i sont respectivement, la position, la commande, le coefficient de traînée aérodynamique effective, la résistance de frottement au roulement et l'inertie effective du $i^{\text{ème}}$ véhicule suiveur.

Modèles dynamiques Latéraux

Il existe plusieurs types de modèles dynamiques latéraux qui peuvent être associés à un modèle dynamique longitudinal.

Daviet et Parent [Daviet et Parent, 1996] ont utilisé un modèle latéral d'un train de véhicules dans le cadre du projet PRAXITELE de l'INRIA. Ils supposent que les angles de braquage sont faibles, la vitesse ne dépasse pas 50km/h et que le véhicule de tête est conduit manuellement. C'est le conducteur donc qui impose la trajectoire de référence. L'objectif dans ce travail est de minimiser la distance latérale y entre l'axe du véhicule et la trajectoire de référence $c(x)$ en agissant sur l'angle de braquage δ . Ce modèle est schématisé par la figure 1.4.

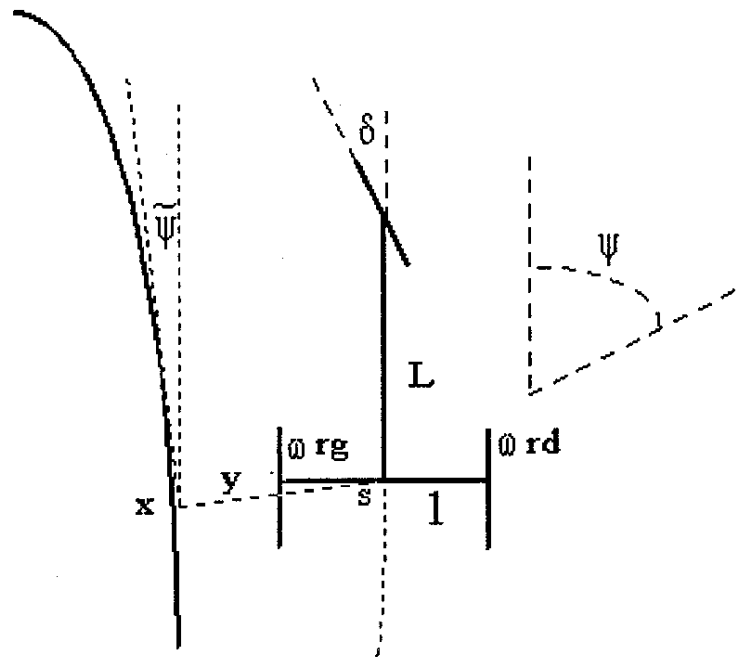


FIG. 1.4 – Modèle latéral

Un modèle basé sur la position latérale et l'angle de lacet du véhicule est utilisé dans [Rajamani *et al.*, 2000]. Il est exprimé avec des erreurs de position et orientation par rapport à l'axe de la route. Ce dernier est matérialisé par des marqueurs magnétiques qui sont détectés par des capteurs implémentés sur le bas des véhicules. La représentation

d'état de ce modèle est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_f+c_r}{mv} & \frac{c_f+c_r}{m} & -\frac{c_f l_f+c_r l_r}{mv} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-c_f l_f+c_r l_r}{Iv} & \frac{c_f l_f-c_r l_r}{I} & -\frac{c_f l_f^2+c_r l_r^2}{Iv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c_f}{m} \\ 0 \\ \frac{c_f l_f}{l} \end{pmatrix} \delta + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c_f l_f-c_r l_r}{mv} - v \\ 0 \\ -\frac{c_f l_f^2+c_r l_r^2}{Iv} \end{pmatrix} \dot{\theta}_{des} \end{aligned} \quad (1.13)$$

θ_{des} est l'angle du lacet désiré et θ_v celui du véhicule.

$e_1 = y_v - y_{des}$ représente l'erreur latérale par rapport à l'axe central de la chaussée, avec y_v la position latérale du véhicule et y_{des} la position latérale désirée qui représente l'axe de la route.

$e_2 = \theta_v - \theta_{des}$ représente l'erreur du lacet.

δ est l'angle de braquage, I le moment d'inertie, m la masse totale du véhicule, c_f et c_r sont les coefficients de rigidité lors du braquage des roues avant et arrière respectivement, l_f et l_r sont les distances entre le centre de gravité et les essieux avant et arrière respectivement et l la largeur du véhicule.

Les modèles que nous avons présentés sont principalement conçus pour réaliser des commandes des trains de véhicules.

1.2 Commande des trains de véhicules

Pour réaliser le suivi de véhicules, il existe deux types de commandes : la commande longitudinale et la commande latérale. Nous présentons quelques travaux existants dans la littérature sur les commandes des trains de véhicules.

1.2.1 Les commandes longitudinales

Plusieurs objectifs peuvent être atteints par la commande longitudinale. Dans un but d'optimiser les flux de véhicules sur un parcours spécifique, l'étude doit se porter sur la chaîne de véhicules complète. Dans ce cas, l'objectif est d'augmenter la fluidité du trafic tout en assurant la stabilité de la chaîne de véhicules.

Lorsque l'étude porte sur quelques véhicules du convoi uniquement, l'objectif de commande est de réguler la distance entre deux véhicules successifs avec un niveau de sécurité et de confort satisfaisant. Cette régulation d'inter-distance peut avoir des conséquences sur la stabilité globale du convoi. Le choix des informations et de l'architecture utilisée pour déterminer la loi de commande est étroitement lié à cette stabilité [De Wit et Brogliato, 1999]. Lorsque le véhicule est à l'intérieur du convoi, sa seule tâche est la régulation d'inter-distance avec le véhicule précédent. Préalablement à la synthèse de la loi de commande, il est nécessaire de choisir :

- le type de consigne d'inter-distance. La littérature fait état de trois classes : les inter-distances constantes, à " temps constant " qui évoluent proportionnellement avec la vitesse du véhicule et les inter-distances " avec facteur de sécurité constant " qui, en général, évoluent de façon quadratique avec la vitesse [Nouvelière, 2002].
- l'utilisation ou non d'informations provenant d'autres véhicules.

Ces deux choix influent de façon importante sur la stabilité de la chaîne de véhicules.

Dans le cas d'une consigne d'inter-distance constante, pour assurer la stabilité globale de la chaîne, il est généralement nécessaire de communiquer au minimum la vitesse du véhicule de tête aux autres véhicules [Pue, 1977], [Shladover, 1978] et [Shladover, 1979]. Pour plus de sécurité, l'accélération du véhicule de tête peut aussi être ajoutée [Sheikholeslam, 1990]. L'utilisation d'une telle consigne permet d'augmenter la fluidité du trafic car l'espace entre les véhicules peut être très faible. Par contre un système de communication inter-véhiculaire doit être mis en place pour permettre la diffusion des informations du véhicule de tête. La flexibilité de la structure asynchrone en est diminuée et les problèmes inhérents aux communications, c'est-à-dire les délais de transmission et les pertes de données, doivent être pris en compte dans l'étude de la stabilité de la chaîne [Chen, 1995].

Pour les consignes " à temps constant " ou " avec facteur de sécurité constant ", donc

dépendantes de la vitesse, les communications inter-véhiculaires ne sont pas forcément nécessaires [Chien et Ioannou, 1992]. Ces types de consigne augmentent la distance de sécurité avec la vitesse du véhicule et permettent de prendre en compte les capacités de freinage et d'accélération du véhicule et d'assurer un certain confort pour le passager dans le suivi de véhicule.

Dans [Sheikholeslam, 1990], une commande longitudinale d'un train de véhicules est proposée. Un modèle dynamique longitudinal linéarisé avec une inter-distance constante sont utilisés dans ce travail. Les mesures nécessaires pour réaliser cette commande sont la vitesse et l'accélération. La commande utilisée est basée sur la minimisation d'un critère quadratique dont le but est de ramener l'erreur d'inter-distance proche de zéro. [Chien *et al.*, 1994] utilise un modèle longitudinal non linéaire simplifié du groupe motopropulseur d'un véhicule. La distance inter véhiculaire est modélisée en tant que facteur de temps constant en fonction de la vitesse du véhicule. Un contrôleur PID est utilisé pour commander l'accélération et le freinage du véhicule suiveur en fonction de l'inter-distance. Un modèle non linéaire de chaque véhicule dans le convoi représenté sous forme d'une équation différentielle de troisième ordre est utilisé dans [Godbole et Lygeros, 1994] pour la commande longitudinale. La distance de sécurité utilisée est fonction de la vitesse et de l'accélération. Une commande PID est employée en utilisant la position, la vitesse et l'accélération du véhicule commandé. Un régulateur de vitesse de type PD adaptatif est utilisé dans [Swaroop et Rajagopal, 2001] pour la commande longitudinale d'un train de véhicules. La distance de sécurité est prise comme étant un temps constant entre deux véhicules successifs. Chaque véhicule dans le convoi est modélisé comme étant une masse ponctuelle et les mesures utilisées sont l'inter-distance et la vitesse du véhicule commandé. Dans [Lee et Kim, 2002], un contrôleur flou à modes glissants est utilisé dans la commande longitudinale d'un train de véhicules. L'objectif était de maintenir constante la distance entre les véhicules sans utiliser un modèle mathématique de fonctionnement des véhicules. Pour cela, ils ont besoin de mesurer l'inter-distance et les vitesses du leader et du suiveur. Deux commandes par modes glissants, l'une de premier ordre et l'autre de deuxième ordre, sont utilisées dans [Nouvelière, 2002] pour la commande longitudinale d'un suivi de véhicules à basse vitesse. Le modèle longitudinale de véhicule sans glissement est utilisé.

Deux distances de sécurité différentes sont prises pour chaque commande, l'une constante et l'autre variable en fonction de la vitesse et du temps de réaction de conducteur. La distance inter véhiculaire et la vitesse du véhicule commandé sont mesurées dans ce cas.

Référence	Distance de sécurité	Type de commande	Paramètres mesurés	Modèle
[Sheik, 90b]	constante	commande basée sur la minimisation d'un critère quadratique	vitesse et accélération	modèle longitudinal linéarisé
[Chien, 94]	facteur de sécurité fonction de la vitesse	PID pour freinage/accélération	inter-distance, vitesse et accélération du véhicule de devant	modèle longitudinal simplifié du groupe motopropulseur
[Godbole, 94]	facteur de sécurité fonction de la vitesse et de l'accélération	PID	position, vitesse et accélération	non linéaire, éq. dif. de 3ème ordre
[Swaroop, 01]	temps constant	régulateur PD adaptatif de vitesse	inter-distance et sa dérivée et la vitesse du véhicule commandé	masse ponctuelle, $\ddot{x}_i = u_i$
[Lee, 02]	constante	contrôleur flou à modes glissants	inter-distance et vitesses du leader et du suiveur	sans modèle dynamique
[Nouvel, 02]	facteur de sécurité constant	modes glissants	inter-distance et vitesse du véhicule	modèle longitudinal sans glissement

TAB. 1.1 – Quelques Méthodes de commande longitudinale

1.2.2 Les commandes latérales

La commande latérale d'un véhicule consiste à asservir la position et le cap du véhicule sur la route. Dans ce cas, une instrumentation plus importante du véhicule est nécessaire. Les applications sont principalement de deux types : la gestion des situations critiques comme le maintien de cap [Ackermann et Bünte, 1997], l'évitement d'obstacles, ..., et l'assistance à la conduite dans des conditions usuelles avec par exemple l'automatisation des manoeuvres pour parking ou encore la conduite entièrement automatique.

Dans le cadre d'un suivi de véhicule, la commande du mode latéral peut être réalisée en utilisant un filoguidage et/ou un suivi de ligne blanche tandis que le mode longitudinal est géré par des commandes décrites dans le paragraphe précédent. Le principal inconvénient d'un tel système est sa dépendance à l'environnement car même les systèmes de vision

nécessitent la présence de lignes blanches sur la route.

L'utilisation d'un dispositif de mesure des positions relatives des véhicules (vision, radars, télémètres lasers, ...) permet de s'affranchir de l'instrumentation de l'environnement. Dans ce cadre, deux grands types d'approches sont envisagés : le suivi de véhicule et le suivi de trajectoire. Le suivi de véhicule consiste généralement à asservir la position d'un véhicule dit " suiveur " relativement à celle d'un véhicule dit " leader " comme si un lien physique existait entre les véhicules. L'inconvénient d'un tel système est que le véhicule suiveur a tendance à " couper " les virages, particulièrement lorsque l'espace entre les deux véhicules doit être grand (inter-distance à temps constant ou à facteur de sécurité constant). Le suivi de trajectoire consiste à positionner le véhicule suiveur sur le chemin emprunté par le véhicule de tête. Il est alors nécessaire que le véhicule suiveur connaisse sa position dans l'espace ainsi que celle du véhicule de tête. Pour cela, un récepteur GPS (Global Positioning System) peut être rajouté au système de positionnement relatif. Lorsque l'environnement est instrumenté, le véhicule obtient sa consigne de trajectoire "en lisant la route". L'objectif de la commande est de faire suivre cette consigne au véhicule tout en rejetant différents types de perturbations.

Dans le cadre d'un suivi de véhicule, un correcteur PD flou qui guide le véhicule le long d'un câble inductif est développé dans [Lee *et al.*, 1999].

Pour maintenir un véhicule dans sa voie, [Nouvelière, 2002] utilise une loi de commande linéaire synthétisée par minimisation d'un critère H_∞ et une mise en forme de la boucle ouverte corrigée (loop-shaping). La position du véhicule par rapport au centre de la voie se fait par détection des lignes blanches. [Raharijaona *et al.*, 2004] s'intéressent à une aide à la conduite dont le but est d'assurer le suivi de trajectoire avec la commande du lacet du véhicule. Cette assistance n'étant pas active tout le temps, un modèle du conducteur permet de prendre en compte le temps de réaction de l'être humain ainsi que ses capacités de prédiction. Le correcteur utilisé est basé sur la synthèse H_∞ avec des contraintes de performance et de confort. Une μ -analyse est effectuée ensuite pour étudier la robustesse du système bouclé vis-à-vis des incertitudes paramétriques.

Référence	Paramètres régulés	Type de commande	Instrumentation	Modèle
[Lee, 99]	écart latéral	PD floue avec gain échelonné	Fil inductif et capteur magnétique	modèle flou de type Sugeno
[Nouv, 02]	écart latéral	stabilisation avec rejet de perturbation par une H_∞ et annulation de l'erreur statique avec un PI	Lignes blanches, capteur vidéo et gyroscope	modèle linéaire du véhicule + dynamique de l'angle d'attelage et l'erreur de cet angle
[Rahar, 04]	angle de lacet	H_∞ d'ordre réduit à gain échelonné	suivi de trajectoire de référence	modèle latéral linéaire de 4ème ordre
[Daviet, 96]	angle de braquage et écart latéral	PI	barre d'attelage	modèle cinématique dans l'espace cartésien pour les petites vitesses et un modèle dynamique linéaires avec glissement pour les vitesses $> 10\text{Km/h}$

TAB. 1.2 – Quelques Méthodes de commande latérale

1.2.3 Le couplage des commandes longitudinale et latérale

Afin de réaliser un suivi de véhicule avec inter-distance constante, [Pham *et al.*, 1994] utilisent une loi de commande par modes glissants sur un modèle prenant en compte le couplage des modes longitudinal et latéral. De manière évidente, le couplage des deux modes rend la synthèse de la loi de commande plus difficile. [Lim et Hedrick, 1999] utilisent une commande par modes glissants pour réaliser un suivi de véhicule. Les consignes des modes longitudinal et latéral sont respectivement calculées à partir de l'erreur d'inter-distance entre les deux véhicules et la déviation avec le centre de la route du véhicule suiveur. Pour déterminer la vitesse latérale du véhicule, un observateur a été ajouté; il nécessite

la mesure de la position du véhicule par rapport au centre de la route. Pour cela, des capteurs magnétiques mesurent la distance entre le véhicule et des marqueurs implantés au centre de la route. L'ensemble de la structure a été validé de façon expérimentale et a été comparé avec un PID à gains variables. Une loi de commande floue de type Mamdani est proposée par [Garnier et Fraichard, 1996] afin de réaliser un suivi de trajectoire avec évitement d'obstacles. Ils proposent une méthode d'apprentissage pour obtenir les poids de chacune des règles floues. Ces algorithmes sont testés expérimentalement sur des voitures électriques. Un système de commande d'impédance utilisant une chaîne en série de ressort/amortisseur est proposé pour un convoi de véhicules dans [Yi et Chong, 2005]. Le modèle de guidage de cette série de ressort/amortisseur est introduit dans les équations d'état de mouvement du véhicule comprenant la position et l'orientation. Ce modèle a permis de développer un algorithme unifié pour la commande latérale et la commande longitudinale du convoi de véhicules. Le rôle du contrôleur de véhicule est de générer la sortie des actionneurs de traction et de braquage, afin de forcer un véhicule individuel à suivre la trajectoire d'orientation produits par le modèle d'impédance. Des simulations sont faites pour montrer la robustesse de cette commande par rapport aux incertitudes de modélisation et aux bruits de mesures. Dans [Toulotte *et al.*, 2006], une loi de commande d'un convoi de deux véhicules est proposée. Elle est basée sur le modèle flou de Takagi-Sugeno avec une loi de commande de compensation distribuée parallèle (en anglais, *Parallel Distributed Compensation* (PDC)). La consigne de position du véhicule est calculée en utilisant la stratégie de la barre d'attelage virtuelle et l'inter-distance est en fonction de la vitesse pour tenir compte des facteurs de sécurité.

Référence	Type de commande	Stratégie	Modèle
[Pham, 94]	Modes glissants	Leader/Suiveur	modèle dynamique simplifié à 3 états : positions x , y et l'angle de lacet
[Lim, 99]	Modes glissants	Leader/Suiveur avec marquage au sol pour détecter l'écart latéral	dynamiques longitudinale et latérale couplées
[Garnier, 96]	Commande floue avec un apprentissage	suivi de trajectoire de référence avec évitement d'obstacles	modèle flou de type Mamdani
[Yi, 05]	système de commande d'impédance	poursuite de trajectoire de référence	modèle de guidage d'une série de ressorts/amortisseurs
[Toulotte,06]	commande de compensation distribuée parallèle	barre d'attelage virtuelle	modèle flou Takagi-Sugeno

TAB. 1.3 – Quelques commandes longitudinales et latérales couplées

Nous avons vu différents modèles et commandes pour les trains de véhicules. La première étape, a été évidemment de définir les commandes à appliquer pour commander ces véhicules en convoi selon une trajectoire. Des résultats ont été obtenus, et le mode nominal étant connu, nous pouvons nous intéresser à la détection de pannes. Nous présentons par la suite, un bref rappel des méthodes de surveillance que nous allons utiliser.

1.3 Surveillance à base de modèle

Les premiers travaux sur la surveillance des systèmes en utilisant des modèles datent des années 70 [Jones, 1973]. Ensuite, à partir des années 80, plusieurs chercheurs se sont penchés vers cette thématique et ont développé différentes approches [Isermann, 1984]

[Ding et Frank, 1991a] [Biswas *et al.*, 2003] [Düstegör *et al.*, 2006] [Chafouk *et al.*, 2007] [Rodrigues *et al.*, 2008].

La détection de défauts avec l'utilisation de modèles se fait en deux étapes principales : la génération de résidus et la prise de décision. Lors de la première étape, les signaux d'entrée et de sortie du système et leurs dérivées successives sont utilisés pour générer des signaux sensibles aux défauts, appelés résidus ou détecteurs de défauts. En fonctionnement normal du système (absence de défaut), le résidu reste quasiment nul. Il s'écarte considérablement de zéro en présence de défaut. Durant la deuxième étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a ou pas présence de défaut, quel est le composant défaillant (localisation) et déterminer la nature du défaut et sa cause (identification).

Pour construire un algorithme de génération de résidus, il y a principalement trois approches qui peuvent être utilisées :

1. Identification paramétrique : Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu les paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et à les comparer aux valeurs nominales obtenues en fonctionnement normal du système. L'estimation paramétrique a l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations des valeurs estimées par rapport à celles de référence [Zogg *et al.*, 2006] [Suonan et Qi, 2005].
2. Observateurs : Le principe des méthodes de diagnostic à base d'observateurs est de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties. Le résidu pour cette méthode est l'erreur d'estimation qui est la différence entre la sortie du système réel et celle estimée par l'observateur [Jiang *et al.*, 2004a] [Jiang *et al.*, 2004b].
3. Espace de parité : Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondance [Chow et Willsky, 1984] [Patton et Chen, 1992] [Maquin et Ragot, 2000] [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001b]. Les équations projetées ne font intervenir que des variables connues (les entrées, les sorties et les paramètres du modèle). Ces équations s'appellent des relations de redondance analytique (RRA). L'idée est de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs estimées données par le modèle.

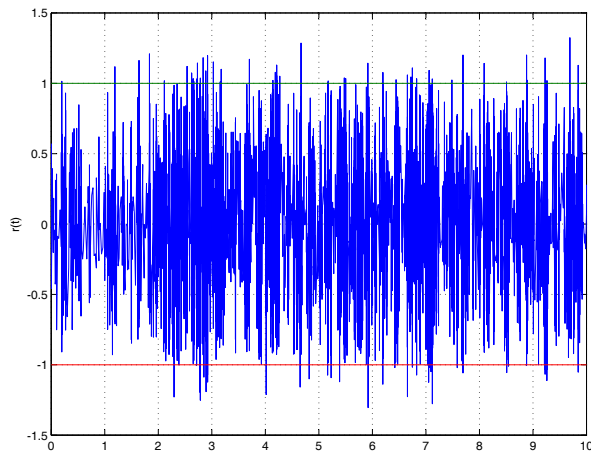


FIG. 1.5 – Fausses alarmes

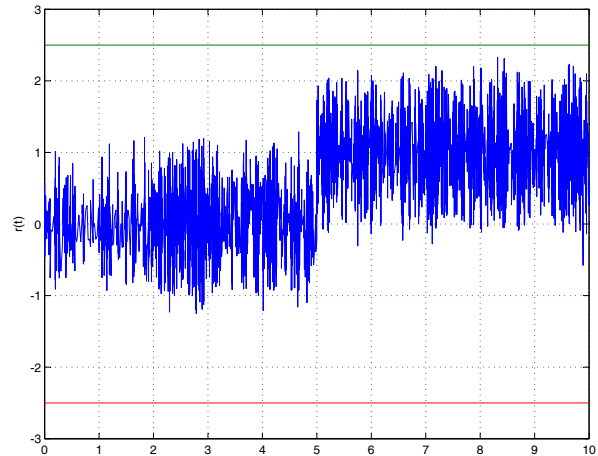


FIG. 1.6 – Une non détection

Prise de décision : Une fois le résidu généré, par l'une des trois méthodes citées précédemment, il faut prendre une décision concernant l'existence ou pas d'un défaut puis, le cas échéant, déterminer sur quel composant du système ce défaut intervient. A cause des incertitudes de modèle, des bruits de mesures et autres incertitudes, le résidu n'est pas strictement égal à zéro même en absence de défaut. Pour cette raison, il faut fixer des seuils à l'intérieur desquels le résidu doit être en absence de défaut. Lorsque le résidu sort des seuils, alors il y a apparition d'un défaut. La principale difficulté réside dans le calcul de ces seuils. Un seuil trop grand risque d'engendrer une non-détection (figure 1.6) et un seuil trop petit peut entraîner des fausses alarmes (figure 1.5). Le seuil est choisi pour obtenir un compromis idéal entre le taux de fausse alarme et le taux de non détection.

Plusieurs méthodes d'analyse de résidus et de fixation de seuils existent dans la littérature. Des méthodes par des tests statistiques, on peut citer le test de maximum vraisemblance [Willsky et Jones, 1976] qui prend en considération les perturbations stochastiques, le test de Page-Hinkly qui teste la valeur moyenne du résidu sur une fenêtre de détection par rapport à un seuil prédéfini.

Concernant les problèmes de seuillage, les premiers travaux ont porté sur l'élaboration de seuils fixes, indépendants du temps et des entrées du système. Par exemple, les seuils définis à l'aide de la théorie de Markov [Walker et Gai, 1979]. L'inconvénient de la détection par rapport à un seuil fixe est qu'une perturbation sur la mesure peut entraîner

le résidu au-delà de la valeur limite du seuil et déclencher par conséquence une fausse alarme. Néanmoins, il existe des techniques de définition des seuils adaptatifs pour palier ce genre de problème. On peut utiliser par exemple, des seuils adaptatifs robustes aux incertitudes de modèle [Emami-Naeini *et al.*, 1988] ou des seuils adaptatifs en fonction des entrées du système [Patton *et al.*, 1989]. Dans ce dernier, les bornes inférieures et supérieures du résidu sont définies en fonction des bornes des incertitudes des paramètres et des bruits de mesures. Il existe de nombreux travaux sur cette problématique et on peut citer [Ding et Frank, 1991b] [Weiss, 1988] [Sauter *et al.*, 1995].

Pour la surveillance à base d'observateurs appliquée aux systèmes de transport, plusieurs travaux sont effectués pour la détection, l'isolation et l'estimation des défauts de capteurs, d'actionneurs ou des paramètres du système. Dans [Shen et Hsu, 1998], une méthode de détection et d'isolation des défauts dans un moteur thermique basée sur un observateur à entrée inconnue a été développée. Une matrice gain optimale a été calculée pour l'observateur afin qu'il soit robuste aux incertitudes structurées et non structurées sans autant dégrader les performances de diagnostic. Une méthode de détection de défauts capteurs et actionneurs dans un mini-hélicoptère a été proposée dans [Heredia *et al.*, 2008]. Cette méthode est basée sur l'estimation des sorties en utilisant un banc d'observateurs et des données réelles issues des capteurs lors d'une campagne d'acquisition. Ces données sont obtenues avec le fonctionnement normal de l'hélicoptère (sans défauts). Tout changement significatif du comportement de système par rapport à celui estimé par l'observateur est considéré comme défaut. Dans [Jiang et Chowdhury, 2005], la détection et l'estimation des défauts des paramètres pour les systèmes non linéaires sont réalisées en utilisant des observateurs adaptatifs. La nouveauté est qu'ils considèrent le cas où la distribution des défauts est représentée par une fonction non-linéaire qui dépend non seulement des entrées et des sorties mais aussi des états non mesurés. Cette méthode est appliquée pour un système d'une roue en contact avec la chaussée avec la prise en compte des forces d'impact. Un observateur proportionnel et multi-intégral (PMI) est utilisé dans [Gao *et al.*, 2007] pour estimer simultanément les états du système, les dérivées en temps fini des défauts ainsi que les défauts. Cette méthode est appliquée au modèle latéral linéaire d'un véhicule en prenant en compte simultanément les perturbations inconnues du système et les

défauts non bornés des capteurs et des actionneurs. Dans [Mattei *et al.*, 2005], une méthode basée sur un banc d'observateurs H_∞ étendus pour la détection et l'isolation de défauts capteurs d'un avion est proposée. Chaque observateur est composé d'une partie non linéaire en boucle ouverte qui reproduit la dynamique du système et une action de retour linéaire (boucle fermée). Des conditions suffisantes pour la synthèse de l'action de retour sont fournies en termes d'inégalité matricielle linéaire (LMI). Des contraintes sur la position des pôles de l'observateur sont ajoutées pour accélérer la dynamique de génération des résidus et éviter les modes de faible amorti et/ou de haute fréquence. Cette méthode est appliquée sur le modèle dynamique longitudinal d'un aéronef commercial. Dans [Wang et Chu, 2005], une nouvelle méthode de détection des ratés dans des moteurs à combustion interne est présentée. Cette approche est basée sur l'estimation du couple de torsion du cylindre en utilisant un observateur à mode glissant appliqué au modèle non linéaire de ce moteur. Après l'estimation du couple de torsion, le couple de torsion moyen pendant la course de combustion est calculé ainsi des ratés d'allumage dans les cylindres, qui sont considérés comme défauts dans ce cas, peuvent être détectés.

Type d'observateur	Modèle	Défauts	Application
Observateur à entrées inconnues [Shen et Hsu, 1998]	Modèle linéaire discret	défauts actionneurs	Moteur thermique : NISSAN GA16DE 1597 c.c.
Observateur adaptatif [Jiang et Chowdhury, 2005]	Modèle non linéaire affine en la commande	défauts sur les paramètres du système	Système roue-chaussée avec des efforts d'impact
Banc d'observateurs et dédiés (identification par des données réelles) [Heredia <i>et al.</i> , 2008]	multi modèles de types multi entrées une sortie (par identification)	Capteurs : Gyroscope et GPS, Actionneurs : rotor et plateau cyclique (commande de roulis)	Mini Hélicoptère
Observateur proportionnel, multi intégral [Gao <i>et al.</i> , 2007]	modèle linéaire avec des perturbations et un vecteur de défaut	Capteurs : accélération et vitesse du lacet, Actionneur : angle de braquage	Véhicule (modèle dynamique latérale)
Banc d'observateurs H_∞ [Mattei <i>et al.</i> , 2005]	modèle non linéaire avec perturbations du système et défauts capteurs	Capteurs : angle d'attaque et vitesse de tangage	Avion (modèle dynamique longitudinal)
Observateur à mode glissant [Wang et Chu, 2005]	modèle non linéaire (forme triangulaire)	système : ratés d'allumage	Moteur à combustion interne

TAB. 1.4 – Quelques Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Pour la surveillance avec la méthode de l'espace de parité, la majorité des travaux dans la littérature est réalisée pour les systèmes linéaires, car cette méthode est à la base conçue pour ces systèmes. Puis récemment, une extension de cette approche vers des systèmes non linéaires a été développée par certains chercheurs.

Dans [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001a], une technique de redondance analytique pour les systèmes dynamiques non linéaires modélisés par des équations différentielles polynomiales a été proposée. Une forme d'évaluation de résidus a été développée pour la détection des défauts de capteurs, d'actionneurs et des composants système. Cette méthode est appliquée à un modèle non linéaire d'un moteur à induction. Une nouvelle approche, appelée redondance analytique non linéaire robuste, a été développée dans [Halder et Sarkar, 2005] pour la détection de défauts capteurs et actionneur pour les systèmes non linéaires dynamiques affine en la commande en présence des erreurs de modélisation et des perturbations. Les résidus générés pour détecter les défauts de capteur sont totalement insensibles à la fois aux erreurs de modèle et aux perturbations de procédé. Par contre, pour les défauts actionneurs, les résidus générés ne sont pas totalement insensibles à ces facteurs. Afin de surmonter ce problème, une méthode pour détecter les défauts actionneur est proposée où les résidus sont très sensibles aux défauts actionneurs et moins sensibles aux erreurs de modélisation et aux perturbations. Cette méthode est appliquée au robot mobile à roues.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux différents modèles de convoi de véhicules, qui pour la plupart ont été élaborés en vue de la commande. Nous avons vu que cette commande pouvait privilégier le mode longitudinal, le mode latéral ou les deux, selon les objectifs. Dans le chapitre suivant, nous proposerons une modélisation du convoi de véhicules Robucars. Notre travail concernant la surveillance d'un train de véhicules, nous avons rapidement introduit les méthodes de surveillance et les observateurs à mode glissant que nous appliquerons au modèle de véhicules dans le chapitre trois.

Chapitre 2

Modélisation d'un véhicule et d'un train de véhicules tout électriques

La modélisation est une étape importante pour la mise en oeuvre d'algorithmes de surveillance des systèmes dynamiques. Selon les objectifs de la surveillance, la modélisation doit être plus ou moins approfondie. Les premiers travaux sur la surveillance d'un véhicule RobuCar effectués au laboratoire [Dumont, 2006] ne prennent pas en compte toutes les forces agissant sur le véhicule. La première étape de notre travail a été d'affiner la modélisation.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description, la modélisation cinématique et la modélisation dynamique du véhicule électrique Robucar. Dans le cas de la modélisation cinématique, trois degrés de liberté pour le véhicule sont considérés : Les deux translations longitudinale et latérale avec la rotation de l'angle de lacet. Dans un premier temps, nous écrivons les équations de mouvement des deux centres des essieux avant et arrière. Ensuite, nous récrivons les équations de mouvement du centre de gravité du véhicule.

Les équations régissant la dynamique du véhicule RobuCar sont utilisées lors de la modélisation dynamique. Les dynamiques qui sont prises en compte sont celles du mouvement longitudinal, du mouvement latéral, de rotation des quatre roues, des braquages avant et arrière et du lacet. Nous avons aussi modélisé les forces de contact entre les pneumatiques et la chaussée. Enfin, le modèle est mis sous forme d'une représentation d'état.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation du train de véhicules RobuCar dont dispose le laboratoire LAGIS. Le véhicule de tête est représenté par le modèle dynamique non linéaire. Les deux véhicules suiveurs sont aussi représentés par ce modèle dynamique auquel nous ajoutons les deux nouvelles mesures, l'inter-distance e_{xi} et l'angle d'orientation Φ_i . Cet angle est celui formé par les deux axes longitudinaux de deux véhicules successifs.

Avant de détailler les modèles, nous donnons les principales caractéristiques du RobuCar, le véhicule que nous utilisons pour le train de véhicules.

2.1 Description de RobuCar

Le RobuCar est un véhicule électrique autonome fabriqué par la société ROBOSOFT. Le LAGIS dispose de trois prototypes qui servent de plate-forme expérimentale pour les recherches menées au sein de ce laboratoire.

Les différents éléments du véhicule sont montrés sur la figure 2.1.

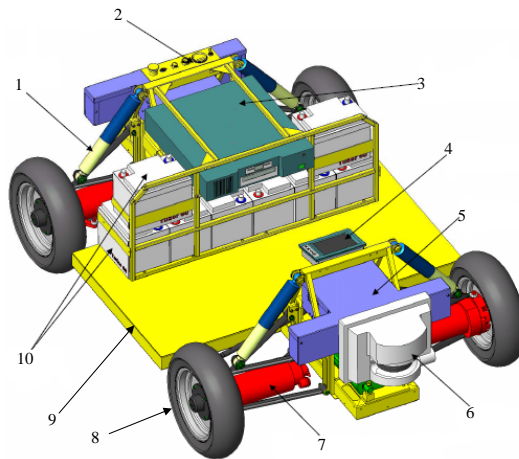


FIG. 2.1 – Description de RobuCar

(1 : Vérin électrique de direction arrière, 2 : Commandes manuelles, 3 : PC embarqué, 4 : Ecran de commande, 5 : Panneau de contrôle avant, 6 : Télémètre laser, 7 : Système de traction et de freinage de la roue avant droite (motoréducteur), 8 : Roue avant droite, 9 : Châssis, 10 : Batteries de 12 volts 60 Ah)

Ce véhicule dispose de quatre roues motrices. La traction de chaque roue est assurée par un moteur électrique à courant continu. Le freinage est assuré par des freins électromagnétiques, qui sont des freins de sécurité à manque de courant. Il dispose aussi de deux systèmes de direction, un avant et un arrière, à base de vérins électriques. Les huit batteries offrent une autonomie d'environ deux heures à vitesse maximale de 20km/h . Sa masse totale est de 350Kg

Les différents capteurs et actionneurs que possède le RobuCar lui permettent un fonctionnement en mode autonome.

Les capteurs qui sont utilisés sur le véhicule sont :

- Le télémètre à balayage laser mesure la distance et la direction d'un éventuel obstacle. Dans le cas d'un train de véhicules, ce capteur mesure l'inter-distance entre deux véhicules successifs et l'angle formé par les deux axes longitudinaux de ces véhicules.
- Les codeurs incrémentaux (un pour chaque roue) mesurent les vitesses de rotation des roues.
- Les codeurs absolus (un pour chaque essieu) mesurent les angles de braquage des roues.
- Le GPS donne la position absolue du véhicule dans l'espace.
- La centrale inertielle délivre les mesures des vitesses et des accélérations de lacet, de roulis et de tangage.

Les actionneurs du véhicule sont :

- 4 moteurs de traction (un pour chaque roue).
- 4 moteurs de frein (un pour chaque roue). Ce sont des freins à tambour mécanique commandés électroniquement.
- 2 vérins électriques de direction (un par essieu).
- Un joystick pour commander le véhicule manuellement.

Grâce à l'indépendance de ses deux systèmes de direction, le RobuCar peut fonctionner en trois modes. Ces derniers sont présentés sur la figure 2.2 :

- Le modes single : La direction se fait seulement sur l'essieu avant.
- Le mode dual : Le braquage peut se faire sur les roues avant comme sur les roues arrières.
- Le mode Park : Le braquage sur les essieux avant et arrière se fait dans le même sens.



FIG. 2.2 – Les différents modes de fonctionnement de RobuCar

Plus de détails sur les différentes parties du RobuCar sont donnés dans l'annexe A.

2.2 Modélisation cinématique de RobuCar

2.2.1 Notation

Les paramètres suivants sont utilisés dans la description du modèle cinématique du véhicule :

- $F = (x_f, y_f)$ (resp. $R = (x_r, y_r)$) sont les coordonnées du centre de l'essieu avant (*front*) (resp. arrière (*rear*)) du véhicule dans le repère local.
- $CG = (x, y)$ est le centre de gravité du véhicule.
- v_f (resp. v_r) représente la vitesse instantanée au point F (resp. R).
- v est la vitesse instantanée au point CG .
- β est le braquage moyen au centre de gravité, c'est l'angle formé par le vecteur de vitesse \vec{v} et l'axe longitudinal de véhicule.
- α_f (resp. α_r) représente le braquage moyen des roues de l'essieu avant (resp. arrière).

- $l = a + b$ correspond à l'empattement du véhicule.
- ψ est l'angle du lacet, entre l'axe longitudinal du véhicule et l'axe des abscisses du repère lié à l'environnement.
- ρ_f (resp. ρ_r) est le rayon de giration instantané associé au point F (resp. R).
- G est le centre de giration instantané.
- Les points $FR(x_{fr}, y_{fr})$, $FL(x_{fl}, y_{fl})$, $RR(x_{rr}, y_{rr})$ et $RL(x_{rl}, y_{rl})$ correspondent aux centres des roues avant droite, avant gauche, arrière droite et arrière gauche respectivement.
- d est la longueur des deux essieux et R le rayon d'une roue.

Ces paramètres sont visibles sur la figure 2.3.

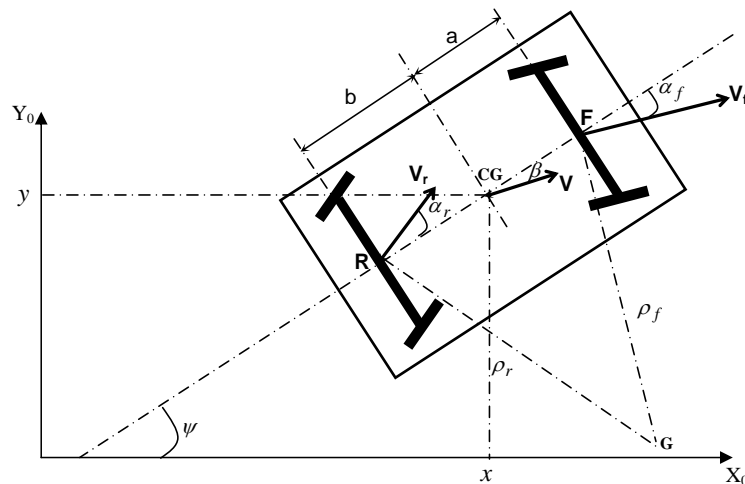


FIG. 2.3 – Modélisation cinématique du véhicule RobuCar

2.2.2 Les équations de mouvement

On considère dans cette modélisation cinématique trois degrés de liberté pour le véhicule. Les deux translations longitudinale et latérale avec la rotation de l'angle de lacet. Dans un premier temps, nous allons écrire les équations de mouvement des deux centres des essieux avant et arrière (aux points R et F) [Baille *et al.*, 1999]. Ensuite, nous récrivons les équations de mouvement du centre de gravité du véhicule [Wang et Qi, 2001].

D'abord, nous allons donner les expressions des rayons de giration instantanés ρ_f et

ρ_r :

$$\begin{cases} \rho_r = l \frac{\cos(\alpha_f)}{|\sin(\alpha_f + \alpha_r)|} \\ \rho_r = l \frac{\cos(\alpha_r)}{|\sin(\alpha_f + \alpha_r)|} \end{cases} \quad (2.1)$$

La vitesse de rotation instantanée du lacet peut s'écrire :

$$\dot{\psi} = \frac{v_r}{\rho_r} = \frac{v_f}{\rho_f} \quad (2.2)$$

A partir de (2.1) et (2.2), on déduit :

$$v_r = v_f \frac{\rho_r}{\rho_f} = v_f \frac{\cos(\alpha_f)}{\cos(\alpha_r)} \quad (2.3)$$

Les équations de mouvement en R et en F sont obtenues de manière géométrique :

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos(\psi + \alpha_r) \\ \dot{y}_r = v_r \sin(\psi + \alpha_r) \\ \dot{x}_f = v_f \cos(\psi + \alpha_f) \\ \dot{y}_f = v_f \sin(\psi + \alpha_f) \\ \dot{\psi} = v_r \frac{\sin(\alpha_f + \alpha_r)}{l \cos(\alpha_f)} = v_f \frac{\sin(\alpha_f + \alpha_r)}{l \cos(\alpha_r)} \end{cases} \quad (2.4)$$

Les équations de mouvement du centre de gravité de véhicule sont données par :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\psi + \beta) \\ \dot{y} = v \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} = \frac{v}{l} \cos\beta (\tan \alpha_f + \tan \alpha_r) \end{cases} \quad (2.5)$$

où : $\beta = \text{atan}\left(\frac{a \tan \alpha_r + b \tan \alpha_f}{l}\right)$ et $v = \frac{v_f \cos \alpha_f + v_r \cos \alpha_r}{2 \cos \beta}$

2.2.3 Détermination des vitesses de rotation des roues

En utilisant toujours des formules de la cinématique, on va calculer les vitesses de rotation des quatre roues du véhicule [Baille *et al.*, 1999]. Géométriquement, on peut obtenir les coordonnées des centres des roues comme suit :

$$\begin{cases} x_{fr} = x_f + \frac{d}{2} \sin\psi \\ y_{fr} = y_f - \frac{d}{2} \cos\psi \\ x_{fl} = x_f - \frac{d}{2} \sin\psi \\ y_{fl} = y_f + \frac{d}{2} \cos\psi \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} x_{rr} = x_r + \frac{d}{2} \sin\psi \\ y_{rr} = y_r - \frac{d}{2} \cos\psi \\ x_{rl} = x_r - \frac{d}{2} \sin\psi \\ y_{rl} = y_r + \frac{d}{2} \cos\psi \end{cases} \quad (2.6)$$

En dérivant(2.6), on en déduit les vitesses en ces points :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_{fr} = \dot{x}_f + \frac{d}{2} \dot{\psi} \cos\psi \\ \dot{y}_{fr} = \dot{y}_f + \frac{d}{2} \dot{\psi} \sin\psi \\ \dot{x}_{fl} = \dot{x}_f - \frac{d}{2} \dot{\psi} \cos\psi \\ \dot{y}_{fl} = \dot{y}_f - \frac{d}{2} \dot{\psi} \sin\psi \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_{rr} = \dot{x}_r + \frac{d}{2} \dot{\psi} \cos\psi \\ \dot{y}_{rr} = \dot{y}_r + \frac{d}{2} \dot{\psi} \sin\psi \\ \dot{x}_{rl} = \dot{x}_r - \frac{d}{2} \dot{\psi} \cos\psi \\ \dot{y}_{rl} = \dot{y}_r - \frac{d}{2} \dot{\psi} \sin\psi \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Les vitesses linéaires et de rotation des 4 roues sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{fr} = v_f + \frac{d}{2} \dot{\psi} \\ v_{fl} = v_f - \frac{d}{2} \dot{\psi} \\ v_{rr} = v_r + \frac{d}{2} \dot{\psi} \\ v_{rl} = v_r - \frac{d}{2} \dot{\psi} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{fr} = \omega_f + \frac{d}{2R} \dot{\psi} \\ \omega_{fl} = \omega_f - \frac{d}{2R} \dot{\psi} \\ \omega_{rr} = \omega_r + \frac{d}{2R} \dot{\psi} \\ \omega_{rl} = \omega_r - \frac{d}{2R} \dot{\psi} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

avec $\omega_f = \frac{v_f}{R}$ et $\omega_r = \frac{v_r}{R}$.

2.3 Modélisation dynamique de RobuCar

La modélisation dynamique du véhicule repose sur les équations physiques qui représentent le fonctionnement du système. Avant de passer à la modélisation, nous allons donner quelques définitions [Deutsch, 1970] [Alloum, 1994] [Boucher, 1997] nécessaires pour comprendre le fonctionnement du véhicule.

2.3.1 Les six degrés de liberté

Les trois mouvements de translation et les trois autres de rotation peuvent être définis comme suit :

- L'avance est le mouvement de translation longitudinale du véhicule (suivant l'axe OX).
- Le ballant est le mouvement de translation latérale du véhicule (suivant l'axe OY).
- Le pompage ou rebondissement est le mouvement de translation verticale de véhicule (suivant l'axe OZ).
- Le lacet est le mouvement de rotation de véhicule autour de l'axe OZ.
- Le roulis est le mouvement de rotation de véhicule autour de l'axe OX.
- Le tangage est le mouvement de rotation de véhicule autour de l'axe OY.

2.3.2 Interaction roue-sol

Le contact des pneumatiques avec la chaussée est à l'origine de tous les efforts externes, à part les efforts aérodynamiques, agissant sur le véhicule. La connaissance des caractéristiques physiques des pneumatiques est donc essentielle pour modéliser ces efforts.

Les pneumatiques servent essentiellement à [Gillespie, 1992] :

- supporter la charge verticale et amortir les déformations du sol,
- développer les efforts longitudinaux qui accélèrent et freinent le véhicule,
- développer les efforts transversaux qui permettent au véhicule de tourner.

2.3.3 Le taux de glissement longitudinal

Pour la roue i , le taux de glissement longitudinal est défini par :

$$G_i = \frac{R_i \omega_i}{v_i} - 1 \text{ si } v_i > R_i \omega_i \text{ (freinage)}$$

$$G_i = 1 - \frac{v_i}{R_i \omega_i} \text{ si } v_i < R_i \omega_i \text{ (accélération)}$$

où ω_i et R_i sont respectivement la vitesse de rotation de la roue i et son rayon effectif. v_i est la vitesse linéaire du centre de la roue i .

2.3.4 Les angles de braquage et de dérive

L'angle de braquage est l'angle entre l'axe de la roue et l'axe de direction longitudinal du véhicule. Cet angle est commandé par le système de direction et mesuré par le codeur

absolu.

L'angle de dérive est formé par le plan de la roue et la tangente à la trajectoire du véhicule.

Les angles de dérive des roues avant et arrière sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \tan(\delta_f - \alpha_f) = -\frac{v_y + \Gamma a}{v_x} \\ \tan(\delta_r - \alpha_r) = -\frac{v_y - \Gamma b}{v_x} \end{cases} \quad (2.10)$$

Si on utilise l'approximation des faibles angles, on obtient :

$$\begin{cases} \delta_f \simeq \alpha_f - \frac{v_y + \Gamma a}{v_x} \\ \delta_r \simeq \alpha_r - \frac{v_y - \Gamma b}{v_x} \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3.5 Mise en équations des différentes dynamiques

Toutes les équations régissant la dynamique du véhicule sont utilisées dans cette modélisation. Nous posons d'abord les hypothèses de modélisation dans lesquelles notre modèle est valable, puis les notations utilisées dans les différentes équations.

Hypothèses de modélisation

Les hypothèses suivantes sont prises en considération lors de la modélisation :

- Les deux moteurs de traction et de freinage de chaque roue sont considérés comme un seul actionneur. Nous avons donc un actionneur par roue.
- La vitesse maximale du véhicule est 20 km/h.
- Les angles de braquage sont faibles, donc possibilité d'utiliser l'approximation des faibles angles.
- Le véhicule est étudié sur trois degrés de liberté : les mouvements longitudinal, latéral et le lacet. Les autres mouvements sont négligés puisque l'influence de leurs dynamiques est faible par rapport aux trois autres dynamiques, en raison des faibles vitesses et des faibles angles de braquage.
- Le sol est supposé horizontal et uniforme et la dynamique de suspension est négligée

Notations

Les notations suivantes sont utilisées lors de la modélisation :

J_i et f_i sont respectivement le Moment d'inertie et le coefficient de frottement visqueux

du système électromécanique (roue i + moteur i).

ω_i et $\dot{\omega}_i$ sont respectivement la Vitesse et l'accélération de la roue i du véhicule.

d_x , v_x et a_x sont respectivement le déplacement, la vitesse et l'accélération longitudinaux du centre de gravité du véhicule.

d_y , v_y et a_y sont respectivement le déplacement, la vitesse et l'accélération latéraux du centre de gravité du véhicule.

U_i est la somme du couple moteur et du couple de freinage appliqués sur l'actionneur de la roue i .

U_f et U_r sont respectivement les couples moteurs de braquage des roues avant (front) et arrière (rear).

F_{xi} et F_{yi} sont respectivement les forces d'impact longitudinales et transversales issues du contact roue i / chaussée.

R est le rayon des 4 roues supposé constant.

D est la demi-largeur de l'aire de contact pneu-chaussée supposée constante.

a et b sont les distances séparant le centre de gravité et respectivement l'essieu avant et arrière du véhicule.

d est la longueur des deux essieux avant et arrière.

M est la masse totale du véhicule.

Γ est la vitesse de lacet du véhicule.

I_z est le moment d'inertie du véhicule autour de l'axe de lacet.

α_f et α_r sont respectivement les angles de braquage avant et arrière du véhicule (mesurables).

δ_f et δ_r sont respectivement les angles de dérive avant et arrière.

J_f , f_f et k_f sont respectivement le moment d'inertie, le coefficient de viscosité et la raideur du pneumatique avant.

J_r , f_r et k_r sont respectivement le moment d'inertie, le coefficient de viscosité et la raideur du pneumatique arrière.

f est le coefficient de frottement de roulement de l'ensemble (véhicule + roues) avec la chaussée.

Modélisation du système de traction-roue-chaussée

Le théorème des moments au centre de la roue i nous permet d'écrire

$$J_i \vec{\omega}_i = \sum M(\vec{F}_{ext})$$

où $\sum M(\vec{F}_{ext})$ est la somme des moments exercés par toutes les forces extérieures au système. Ces moments sont :

- le moment de la force de frottement visqueux de rotation entre la roue i et le moteur de traction : $f_i \omega_i$
- les moments des forces d'impact longitudinale et latérale projetés sur l'axe longitudinal de la roue i :

$$RF_{xi} \cos(\alpha_f) + RF_{yi} \sin(\alpha_f).$$

- le couple moteur généré par le moteur de traction de la roue i : U_i

Pour la roue i , nous avons donc l'équation suivante :

$$J_i \dot{\omega}_i + f_i \omega_i = U_i + RF_{xi} \cos(\alpha_{f,r}) + RF_{yi} \sin(\alpha_{f,r}) \quad (2.12)$$

et pour les quatre roues :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \dot{\omega}_1 = -f_1 \omega_1 + U_1 + RF_{x1} \cos(\alpha_f) + RF_{y1} \sin(\alpha_f) \\ J_2 \dot{\omega}_2 = -f_2 \omega_2 + U_2 + RF_{x2} \cos(\alpha_f) + RF_{y2} \sin(\alpha_f) \\ J_3 \dot{\omega}_3 = -f_3 \omega_3 + U_3 + RF_{x3} \cos(\alpha_r) + RF_{y3} \sin(\alpha_r) \\ J_4 \dot{\omega}_4 = -f_4 \omega_4 + U_4 + RF_{x4} \cos(\alpha_r) + RF_{y4} \sin(\alpha_r) \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Modélisation des dynamiques longitudinale et transversale du véhicule

Le principe fondamental de la dynamique appliqué sur le véhicule s'écrit de la façon suivante :

$$M \vec{a} = \sum \vec{F}_{ext}$$

Les forces extérieures représentent les efforts de contact entre les pneumatiques et la chaussée, $\vec{F}_{x1} + \vec{F}_{x2} + \vec{F}_{x3} + \vec{F}_{x4}$ pour les forces de contact longitudinales et $\vec{F}_{y1} + \vec{F}_{y2} + \vec{F}_{y3} + \vec{F}_{y4}$ pour les forces de contact latérales ainsi que la force de frottement de roulement $f.v$

En projetant l'équation du principe fondamental de la dynamique sur les deux axes, longitudinal et latéral, nous obtenons :

– sur l'axe longitudinal :

$$Ma_x = (F_{x1} + F_{x2}) \cos \alpha_f + (F_{x3} + F_{x4}) \cos \alpha_r - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \alpha_f - (F_{y3} + F_{y4}) \sin \alpha_r - f.v_x \quad (2.14)$$

– sur l'axe latéral :

$$Ma_y = (F_{x1} + F_{x2}) \sin \alpha_f + (F_{x3} + F_{x4}) \sin \alpha_r + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \alpha_f + (F_{y3} + F_{y4}) \cos \alpha_r - f.v_y \quad (2.15)$$

Modélisation des dynamiques des braquages avant et arrière

Si on considère le système constitué de l'essieu avant du véhicule, de la chaussée et du moteur de direction, le théorème du moment cinétique pour les roues avant s'écrit comme suit :

$J_f \ddot{\alpha}_f = \sum M(\vec{F}_{ext})$ tel que $\sum M(\vec{F}_{ext})$ correspond à la somme des moments exercés par toutes les forces extérieures au système. Ces forces sont :

- le moment des forces de frottement visqueux et de frottement sec de braquage entre la roue avant et le moteur de direction avant : $f_f \dot{\alpha}_f$ et $k_f \alpha_f$
- les moments des forces d'impact longitudinales et latérales issues du contact des pneus avant avec la chaussée projetées sur l'axe longitudinal des roues avant :
 $(F_{x1} + F_{x2}) \cos \alpha_f D - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \alpha_f D$
- le couple généré par le moteur de direction des roues avant : $U_f = U_5$

L'équation dynamique de braquage des roues avant s'écrit :

$$J_f \ddot{\alpha}_f + f_f \dot{\alpha}_f + k_f \alpha_f = U_f - (F_{x1} + F_{x2}) \cos \alpha_f D - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \alpha_f D \quad (2.16)$$

Avec la même façon, on écrit le théorème du moment cinétique pour les roues arrières qui nous donne l'équation dynamique du braquage arrière :

$$J_r \ddot{\alpha}_r + f_r \dot{\alpha}_r + k_r \alpha_r = U_r - (F_{x3} + F_{x4}) \cos \alpha_r D - (F_{y3} + F_{y4}) \sin \alpha_r D \quad (2.17)$$

Modélisation de la dynamique du lacet

En appliquant le théorème du moment cinétique au centre d'inertie du véhicule, on obtient l'équation $I_z \dot{\Gamma} = \sum M(\vec{F}_{ext})$ où $\sum M(\vec{F}_{ext})$ correspond à la somme des moments exercés par toutes les forces extérieures au centre d'inertie du véhicule :

- le moment de la force de frottement $f.\Gamma$
- les moments des forces d'impact longitudinales issues des contacts roues/chaussée projetées sur les axes longitudinal et latéral du véhicule :

$$-a(F_{x1} + F_{x2}) \sin \alpha_f + b(F_{x3} + F_{x4}) \sin \alpha_r + \frac{d}{2}(F_{x1} - F_{x2}) \cos \alpha_f + \frac{d}{2}(F_{x3} - F_{x4}) \cos \alpha_r$$

- les moments des forces d'impact transversales issues des contacts roues/chaussée projetées sur l'axe transversal du véhicule :

$$a(F_{y1} + F_{y2}) \cos \alpha_f - b(F_{y3} + F_{y4}) \cos \alpha_r$$

(les moments des forces d'impact transversales issues des contacts roues/chaussée des roues de gauche et de droite, projetées sur l'axe transversale, sont opposées, donc elles se compensent)

L'équation représentant la dynamique du lacet peut donc s'écrire :

$$I_z \dot{\Gamma} = -a(F_{x1} + F_{x2}) \sin \alpha_f + b(F_{x3} + F_{x4}) \sin \alpha_r + \frac{d}{2}(F_{x1} - F_{x2}) \cos \alpha_f + \frac{d}{2}(F_{x3} - F_{x4}) \cos \alpha_r + a(F_{y1} + F_{y2}) \cos \alpha_f - b(F_{y3} + F_{y4}) \cos \alpha_r - f.\Gamma \quad (2.18)$$

Les forces de contact pneus/chaussée

Au niveau du contact des pneumatiques avec la chaussée se créent des forces agissant sur le véhicule. Les forces longitudinales sont fonction des glissements et les forces transversales sont fonction des angles de dérive. Les non linéarités et les discontinuités rendent

complexe la modélisation de ces phénomènes. Ajoutons à cela, le non accès à des mesures sur les pneumatiques et sur l'interface de contact avec le sol. Néanmoins, des modèles utilisant des mesures expérimentales existent.

Les modèles de contact du pneu avec la chaussée, couramment utilisés dans la littérature, sont les modèles statiques. Ces modèles prédisent la force de frottement (magnitude et direction) ainsi que le moment d'alignement en fonction du glissement et la vitesse angulaire de la roue. Le représentant majeur de cette catégorie de modèles est la formule de Pacejka [Pacejka et Bakker, 1991] [Bakker *et al.*, 1987]. Il s'agit d'un modèle semi-empirique qui utilise un ensemble de paramètres à ajuster, en fonction des données expérimentales, dans une formule mathématique.

Il existe des modèles d'équilibre d'état qui sont généralement basés sur le glissement mais qui présentent des singularités à basses vitesses. Ils utilisent la redéfinition des ratios de glissement en fonction de l'accélération/freinage ou du mouvement avant/arrière. La plupart des modèles d'équilibre d'état représentent plutôt des procédures de filtrage artificiel des données expérimentales et n'interprètent pas les phénomènes physiologiques qui donnent lieu à des forces et à des moments de frottement. Une discussion plus approfondie sur les problèmes potentiels des modèles d'équilibre d'état peut être obtenue dans [Canudas-De-Wit *et al.*, 2003].

Récemment, une deuxième classe de modèles de frottement des pneus avec la chaussée a été développée. Elle prend en considération le comportement dynamique des forces de frottement [Bliman et Sorine, 1993] [Fancher *et al.*, 1997] [Sorine et Szymanski, 2000] [Deur *et al.*, 2001] [Claeys *et al.*, 2001]. Dans [Bliman et Sorine, 1993], des modèles dynamiques pour gérer le taux d'indépendance des phénomènes d'hystérésis observés dans la pratique ont été proposés. Un modèle dynamique de frottement élastoplastique a été développé et appliqué au mouvement longitudinal d'un pneu [Bliman *et al.*, 1995] et étendu au mouvement longitudinal/latéral [Sorine et Szymanski, 2000] [Szymansky, 1999].

Les différents modèles cités ci-dessus sont difficiles à utiliser lorsque nous ne disposons pas des mesures expérimentales prélevées sur les pneumatiques ou sur l'interface de contact avec le sol.

Nous allons utiliser un modèle empirique pour exprimer ces forces de contact roues/chaussée

[Michelin, 2001].

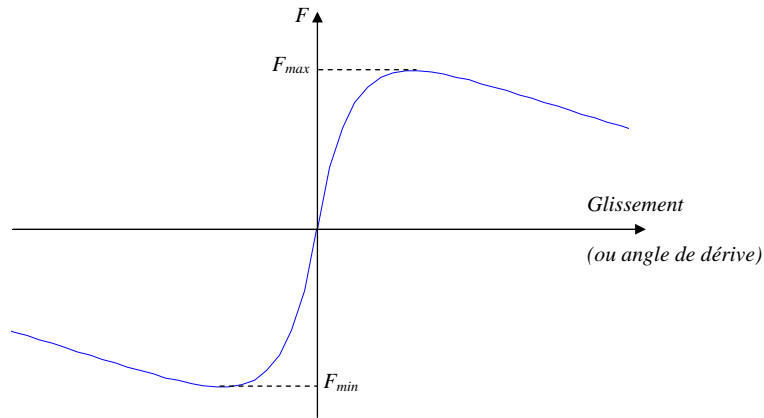


FIG. 2.4 – Force de contact pneu/chaussée

La courbe présentée dans la figure 2.4 peut être représentée par les équations mathématiques suivantes :

Les forces longitudinales :

$$F_{xi} = \alpha_0 \text{sign}(G_i) - \alpha_1 e^{-\beta |G_i|} \text{sign}(G_i) - \alpha_2 G_i \quad (2.19)$$

Les forces transversales des roues avant :

$$F_{y1} = F_{y2} = F_{yf} = \alpha'_0 \text{sign}(\delta_f) - \alpha'_1 e^{-\beta' |\delta_f|} \text{sign}(\delta_f) - \alpha'_2 \delta_f \quad (2.20)$$

Les forces transversales des roues arrière :

$$F_{y3} = F_{y4} = F_{yr} = \alpha'_0 \text{sign}(\delta_r) - \alpha'_1 e^{-\beta' |\delta_r|} \text{sign}(\delta_r) - \alpha'_2 \delta_r \quad (2.21)$$

Représentation d'état

Pour écrire le modèle de RobuCar sous forme d'une représentation d'état, nous allons définir le vecteur de commande, le vecteur de sortie ainsi que le vecteur d'état.

Soit u représente le vecteur des entrées de commande du système :

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_f \ u_r]^T$$

y le vecteur des mesures :

$$y = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ d_x \ d_y \ \alpha_f \ \alpha_r \ \Gamma]^T$$

x le vecteur d'état du système :

$$x = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ v_x \ d_x \ v_y \ d_y \ \dot{\alpha}_f \ \alpha_f \ \dot{\alpha}_r \ \alpha_r \ \Gamma]^T$$

Nous allons utiliser la notation suivante pour la suite :

$$\begin{cases} u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T \\ y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8 \ y_9]^T \\ x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13}]^T \end{cases} \quad (2.22)$$

En utilisant cette notation et en considérant les angles de braquages faibles, c'est à dire qu'on peut utiliser l'approximation des faibles angles :

$$(\sin(\alpha_f) = \alpha_f, \sin(\alpha_r) = \alpha_r \text{ et } \cos(\alpha_f) = \cos(\alpha_r) = 1)$$

les équations (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), (2.17) et (2.18), peuvent être regroupées sous forme non linéaire affine en la commande :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + B.u \\ y = C.x \end{cases} \quad (2.23)$$

où

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{f_1}{J_1}x_1 + \frac{RF_{x1}}{J_1} + \frac{RF_{yf}}{J_1}x_{10} \\ -\frac{f_2}{J_2}x_2 + \frac{RF_{x2}}{J_2} + \frac{RF_{yf}}{J_2}x_{10} \\ -\frac{f_3}{J_3}x_3 + \frac{RF_{x3}}{J_3} + \frac{RF_{yr}}{J_3}x_{12} \\ -\frac{f_4}{J_4}x_4 + \frac{RF_{x4}}{J_4} + \frac{RF_{yr}}{J_4}x_{12} \\ \frac{F_{x1}+F_{x2}+F_{x3}+F_{x4}}{M} - \frac{2F_{yf}}{M}x_{10} - \frac{2F_{yr}}{M}x_{12} - f.x_5 \\ x_5 \\ \frac{2F_{yf}+2F_{yr}}{M} + \frac{F_{x1}+F_{x2}}{M}x_{10} + \frac{F_{x3}+F_{x4}}{M}x_{12} - f.x_7 \\ x_7 \\ -\frac{f_f}{J_f}x_9 - \frac{k_f}{J_f}x_{10} - D\frac{F_{x1}+F_{x2}}{J_f} - D\frac{2F_{yf}}{J_f}x_{10} \\ x_9 \\ -\frac{f_r}{J_r}x_{11} - \frac{k_r}{J_r}x_{12} - D\frac{F_{x3}+F_{x4}}{J_r} - D\frac{2F_{yr}}{J_r}x_{12} \\ x_{11} \\ -\frac{a}{I_z}[(F_{x1} + F_{x2})x_{10} - 2F_{yf}] + \frac{b}{I_z}[(F_{x3} + F_{x4})x_{12} - 2F_{yr}] + \\ \frac{d}{2I_z}(F_{x1} - F_{x2} + F_{x3} - F_{x4}) - f.\Gamma \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Les matrices C et B sont données ci-dessous.

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1/J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2.3.6 Conclusion sur la modélisation dynamique de Robucar

Le modèle représentant le fonctionnement de RobuCar que nous utilisons est un modèle non linéaire affine en la commande. Il dispose de 13 états, 6 entrées de commande et 9 sorties de mesures. C'est un modèle qui représente le fonctionnement du véhicule suivant 3 degrés de liberté (mouvements longitudinal, transversal et lacet).

Nous utilisons ce modèle car il le mieux adapté au type de véhicule que nous utilisons pour nos travaux. C'est un véhicule électrique léger à quatre roues motrices. Ce modèle va nous servir par la suite pour la surveillance du véhicule.

2.4 Modélisation d'un train de RobuCars

Les modèles que nous avons présentés dans le chapitre 1 sont conçus spécialement pour développer des commandes des véhicules. Ils sont adoptés pour des types particuliers de matériel (véhicules, capteurs et infrastructures). Par exemple, le marquage au sol et les capteurs magnétiques [Rajamani *et al.*, 2000], la communication entre les véhicules [Daviet et Parent, 1996] ou des modèles pour des véhicules classiques à un seul moteur [Swaroop *et al.*, 2001]. Nous ne pouvons donc pas utiliser directement ces modèles pour le cas d'un train de RobuCars et pour la surveillance, mais nous pouvons s'inspirer de ces modèles pour développer un modèle adéquat pour notre type de véhicules ainsi que leur instrumentation.

2.4.1 La stratégie de train de trois véhicules

Le principe est d'avoir un véhicule leader pour lequel on impose la trajectoire (conduite automatique ou manuelle). Ensuite, les deux autres véhicules suivent automatiquement la trajectoire du leader tout en maintenant un écart fixe entre eux. Pour cela, chaque véhicule suiveur, grâce à son télémètre laser, mesure la distance qui le sépare de son prédécesseur ainsi que l'angle formé par son axe longitudinal et celui du véhicule de devant. En fonction de ces deux mesures, on agit sur l'accélération des moteurs pour maintenir l'inter-distance fixe et sur le braquage pour suivre la trajectoire du leader.

2.4.2 Modélisation dynamique

Le véhicule leader sera représenté par le modèle dynamique de Robucar donné par (2.23) et pour la notation on ajoute l'indice 0. Les deux véhicules suiveurs seront aussi représentés par ce modèle dynamique en ajoutant les deux nouvelles valeurs suivantes : l'inter distance e_{xi} qui représente la distance qui sépare le $i^{\text{ème}}$ véhicule de celui qui le précède et l'angle Φ_i qui représente la direction dans laquelle se trouve le véhicule qui précède le véhicule i . Ces deux valeurs seront ajoutées au vecteur d'état x et au vecteur de mesures y . L'indice 1 est choisi pour le premier suiveur et l'indice 2 pour le deuxième suiveur. La figure 2.5 montre la structure de ce train de trois RobuCars et montre les deux

écarts e_{xi} et Φ_i .

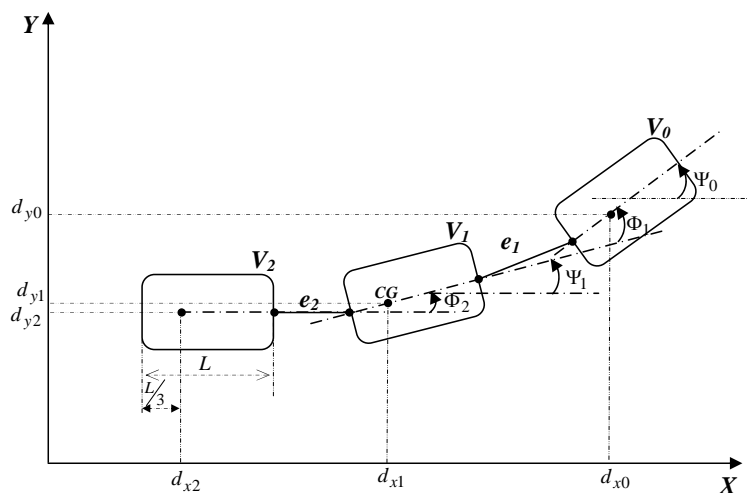


FIG. 2.5 – Train de trois véhicules

V_0 , V_1 et V_2 représentent respectivement le leader, le premier suiveur et le deuxième suiveur.

Dans cette partie, nous supposons que les distances entre les véhicules peuvent être approximées comme suit : $e_{xi} = d_{x(i-1)} - d_{xi} - L$, $i=1, 2$.

Le train peut être donc représenté par les équations d'états suivantes :

Pour le véhicule de tête :

$$\begin{cases} U_0 = [u_{01} \ u_{02} \ u_{03} \ u_{04} \ u_{05} \ u_{06}]^T \\ Y_0 = [y_{01} \ y_{02} \ y_{03} \ y_{04} \ y_{05} \ y_{06} \ y_{07} \ y_{08} \ y_{09}]^T \\ X_0 = [x_{01} \ x_{02} \ x_{03} \ x_{04} \ x_{05} \ x_{06} \ x_{07} \ x_{08} \ x_{09} \ x_{010} \ x_{011} \ x_{012} \ x_{013}]^T \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_0 = f_0(X_0) + B_0 \cdot U_0 \\ Y_0 = C_0 \cdot X_0 \end{cases} \quad (2.26)$$

où $f_0(X_0) = f(X_0)$, $B_0 = B$ et $C_0 = C$.

Pour le premier suiveur :

Définissons d'abord les deux nouvelles grandeurs e_{x1} et Φ_1 :

$$\begin{cases} e_{x1} = d_{x0} - d_{x1} - L \\ \Phi_1 = \Psi_0 - \Psi_1 \end{cases} \quad (2.27)$$

On note d'abord que $e_{x1} = x_{114} = y_{110}$ et $\Phi_1 = x_{115} = y_{111}$.

En introduisant les deux grandeurs, e_{x1} et Φ_1 , dans le modèle, nous aurons la notation suivante :

$$\begin{cases} U_1 = [u_{11} \ u_{12} \ u_{13} \ u_{14} \ u_{15} \ u_{16}]^T \\ Y_1 = [y_{11} \ y_{12} \ y_{13} \ y_{14} \ y_{15} \ y_{16} \ y_{17} \ y_{18} \ y_{19} \ y_{110} \ y_{111}]^T \\ X_1 = [x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ x_{17} \ x_{18} \ x_{19} \ x_{110} \ x_{111} \ x_{112} \ x_{113} \ x_{114} \ x_{115}]^T \end{cases} \quad (2.28)$$

Le modèle dynamique du premier suiveur est alors donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1) + B_1.U_1 \\ Y_1 = C_1.X_1 \end{cases} \quad (2.29)$$

tel que

$$f_1(X_1) = \begin{pmatrix} -\frac{f_1}{J_1}x_{11} + \frac{RFx_{11}}{J_1} + \frac{RFy_{11}x_{110}}{J_1} \\ -\frac{f_2}{J_2}x_{12} + \frac{RFx_{12}}{J_2} + \frac{RFy_{12}x_{110}}{J_2} \\ -\frac{f_3}{J_3}x_{13} + \frac{RFx_{13}}{J_3} + \frac{RFy_{13}x_{112}}{J_3} \\ -\frac{f_4}{J_4}x_{14} + \frac{RFx_{14}}{J_4} + \frac{RFy_{14}x_{112}}{J_4} \\ \frac{Fx_{11}+Fx_{12}+Fx_{13}+Fx_{14}}{M} + \frac{Fy_{11}+Fy_{12}}{M}x_{110} + \frac{Fy_{13}+Fy_{14}}{M}x_{112} - f.x_{15} \\ x_{15} \\ \frac{Fy_{11}+Fy_{12}-Fy_{13}-Fy_{14}}{M} + \frac{Fx_{11}+Fx_{12}}{M}x_{110} - \frac{Fx_{13}+Fx_{14}}{M}x_{112} - f.x_{17} \\ x_{17} \\ -\frac{f_f}{J_f}x_{19} - \frac{k_f}{J_f}x_{110} - \frac{Fx_{11}+Fx_{12}}{J_f}D - \frac{Fy_{11}+Fy_{12}}{J_f}x_{110}D \\ x_{19} \\ -\frac{f_r}{J_r}x_{111} - \frac{k_r}{J_r}x_{112} - \frac{Fx_{13}+Fx_{14}}{J_r}D - \frac{Fy_{14}+Fy_{14}}{J_r}x_{112}D \\ x_{111} \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{I_z}[Fy_{11} + Fy_{12} - (Fx_{11} + Fx_{12})x_{110}] + \\ \frac{b}{I_z}[-Fy_{13} - Fy_{14} + (Fx_{13} + Fx_{14})x_{112}] \\ + \frac{d}{2I_z}(Fx_{11} - Fx_{12} + Fx_{13} - Fx_{14}) - f.x_{113} \end{array} \right\} \\ x_{05} - x_{15} \\ x_{013} - x_{113} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

$$\text{où } C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1/J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Pour le deuxième suiveur :

De la même façon que le premier suiveur, nous aurons le modèle du deuxième véhicule suiveur.

$$\begin{cases} e_{x2} = d_{x1} - d_{x2} - L \\ \Phi_2 = \Psi_1 - \Psi_2 \end{cases} \quad (2.31)$$

On note : $e_{x2} = x_{214} = y_{210}$ et $\Phi_2 = x_{215} = y_{211}$.

$$\begin{cases} U_2 = [u_{21} \ u_{22} \ u_{23} \ u_{24} \ u_{25} \ u_{26}]^T \\ Y_2 = [y_{21} \ y_{22} \ y_{23} \ y_{24} \ y_{25} \ y_{26} \ y_{27} \ y_{28} \ y_{29} \ y_{210} \ y_{211}]^T \\ X_2 = [x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{24} \ x_{25} \ x_{26} \ x_{27} \ x_{28} \ x_{29} \ x_{210} \ x_{211} \ x_{212} \ x_{213} \ x_{214} \ x_{215}]^T \end{cases} \quad (2.32)$$

Le modèle dynamique du deuxième suiveur est alors donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = f_2(X_2) + B_2 \cdot U_2 \\ Y_2 = C_2 \cdot X_2 \end{cases} \quad (2.33)$$

où $f_2(X_2) = f_1(X_2)$, $B_2 = B_1$ et $C_2 = C_1$.

2.5 Estimation des forces de contact pneus/chaussée

Jusqu'à présent, les travaux menés sur les véhicules supposaient que les forces de contact roues/chaussée étaient connues. La mesure de ces forces est difficile et leur modélisation est complexe, mais la connaissance de ces forces est très importante pour équiper le véhicule de quelques systèmes électroniques comme l'ABS (Anti-lock Brake Systems) ou ESP (Electronic Stabilisation Programme). Les dynamiques du véhicule dépendent également des forces de contact qui sont souvent des fonctions non linéaires. Les forces longitudinales dépendent non linéairement des glissements des roues et les forces latérales dépendent non linéairement des angles de dérive. Sur un véhicule, tous les efforts externes sauf les efforts aérodynamiques sont générés par l'interface roue-sol. Ainsi la compréhension et la connaissance des modes de fonctionnement des pneumatiques, donc de la modélisation ou de l'estimation des efforts et moments développés à l'interface pneu-sol, sont essentielles pour toute étude du comportement dynamique d'un véhicule. Parmi les fonctions de base des pneumatiques, citons les forces longitudinales qui accélèrent et freinent le véhicule et les forces latérales qui permettent au véhicule de tourner. Précédemment, nous avons présenté les différents modèles de ces forces de contact.

Ces forces de contact sont souvent inconnues, ainsi des méthodes d'estimation par observateurs non linéaires peuvent être employées. Les observateurs donnent une meilleure précision que les approches empiriques et de plus permettent d'estimer d'autres paramètres. Les observateurs à modes glissants [Davila *et al.*, 2006] sont largement utilisés

dans la littérature plutôt que les observateurs non linéaires traditionnels, car ils présentent l'avantage d'être faciles à construire une fois qu'ils convergent asymptotiquement malgré leur inconvénient qui est le problème de chattering mais que l'on peut atténuer. L'implémentation en temps réel des observateurs non linéaires classiques est par contre difficile et la convergence de ce type d'observateurs n'est pas facile à démontrer.

2.5.1 Observateur à modes glissants

Le type d'observateurs que nous utilisons est l'observateur à modes glissants. Avant de définir et de développer en détail cet observateur, nous donnons des brèves définitions sur l'observateur en général et sur la notion d'observabilité pour les systèmes non linéaires.

Observateur et Observabilité

La connaissance de l'état global d'un système à chaque instant est nécessaire, non seulement dans le cas classique de commande de système par retour d'état statique ou dynamique, mais aussi bien dans un contexte plus général comme par exemple pour le diagnostic, la détection de panne, la sécurité, etc. Cependant pour des raisons technologiques ou de fiabilité ou tout simplement pour des raisons économiques, la mesure de tout l'état n'est souvent pas possible. Il est donc nécessaire de pouvoir reconstituer les variables d'état non mesurables à l'aide des mesures disponibles. Pour cela on fait appel aux observateurs qui sont des équations dynamiques permettant d'obtenir les variables inconnues de l'état grâce aux variables d'état connues. Pour illustrer ceci, considérons le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.34)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ représente l'état, $y \in \mathbb{R}^p$ représente le vecteur de mesure et $u \in \mathbb{R}^m$ est l'entrée du système. Pour le système (2.34), un observateur se présente comme un système dynamique auxiliaire qui se traduit généralement comme une copie du système à observer plus un terme correcteur $\gamma(y, \hat{x})$:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \gamma(y, \hat{x}) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \quad (2.35)$$

Le terme correcteur est utilisé pour permettre l'ajustement de l'état estimé \hat{x} .

Pour les systèmes non linéaires, plusieurs types d'observateurs peuvent être trouvés dans la littérature : les observateurs basés sur la théorie de la stabilité de Lyapunov [Thau, 1973], les observateurs à grands gains [Nicosia et Tornambe, 1998] [Esfandiari et Khalil, 1989], les observateurs par modes glissants [Utkin, 1977] [Barbot *et al.*, 2002].

Par ailleurs, la définition de la structure de l'observateur est souvent précédée d'une étude d'observabilité du système. Celle-ci traduit la possibilité mathématique de reconstruire l'état à partir des mesures disponibles et des entrées. Pour les systèmes non linéaires, on définit des types d'observabilité correspondant à des approches locales ou globales [Hermann et Kerner, 1977] [Gauthier et Bornard, 1981].

Plusieurs recherches ont été consacrées à l'étude de l'observabilité de systèmes non linéaires [Griffith 71], [Kou 75], [Hermann et Kerner, 1977][Nowakowski *et al.*, 1993]. On trouve aussi d'autres études sur l'observabilité des systèmes non linéaires stationnaires [Bestle et Zeitz, 1983] [Drakunov et Utkin, 1995] et sur les systèmes non stationnaires [Xia et Gao, 1988].

Nous allons utiliser dans notre travail la notion d'observabilité au sens du rang des systèmes non linéaires. Cette notion est définie comme suit :

Définition : *Le système (2.34) est localement faiblement observable si et seulement si le rang de la matrice d'observabilité O est égal au nombre d'états n .*

$$\text{rang}(O) = n \tag{2.36}$$

où

$$O = \begin{bmatrix} dh(x) \\ dLfh(x) \\ \vdots \\ \vdots \\ dLf^{n-1}h(x) \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Tel que $Lf^i h_j(x) = \frac{\partial h_j}{\partial x} f^i(x)$ est la dérivée de Lie de la fonction scalaire h_j dans la

direction de la fonction vectorielle f^i .

avec $Lf^i h_j(x)$, $f^i(x) \in \mathfrak{R}^n$ et $\frac{\partial h_j}{\partial x} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$

Observateur à modes glissants

Cette approche est basée sur la théorie des systèmes à structures variables. Elle consiste à contraindre les dynamiques d'un système d'ordre n à converger vers une surface de glissement de dimension $n \times p$ grâce à l'utilisation d'un terme de commutation. Les dynamiques sur la surface de glissement sont déterminées par l'utilisation de la méthode de Fillippov [Filippov, 1960] ou par les méthodes dites du vecteur équivalent [Utkin, 1977] [Drakunov, 1992] [Drakunov et Utkin, 1995].

Dans sa structure classique, l'observateur à modes glissants pour le système (2.34) s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \Lambda \text{sign}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \quad (2.38)$$

où Λ est une matrice de gain définie dans $\mathfrak{R}^{n \times p}$ et qui peut être dépendante de l'état, avec

$$\text{sign}(y - \hat{y}) = \begin{bmatrix} \text{sign}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \text{sign}(y_2 - \hat{y}_2) \\ \vdots \\ \text{sign}(y_p - \hat{y}_p) \end{bmatrix}$$

La fonction sign est définie par :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Dans ce cas les surfaces de glissement sont définies par $S_i = y_i - \hat{y}_i$

Les propriétés intéressantes de ce type d'observateur sont la convergence en temps fini vers la surface de glissement si les conditions d'attractivité sont assurées, ainsi que la réduction de l'ordre du système de n à $n - p$ quand l'état est sur la surface de glissement. La fonction sign réalise l'équivalent d'un grand gain au voisinage de l'origine, assurant ainsi une certaine robustesse vis à vis des erreurs paramétriques et des perturbations bornées. Par

ailleurs, ces observateurs sont caractérisés par l'apparition d'un phénomène de réticence ou "chattering".

L'estimation des forces de contact se fera en trois étapes :

1. Estimation du vecteur d'état à partir des sorties du système avec un observateur à modes glissants
2. Estimation de la dérivée du vecteur d'état par un observateur différentiel à modes glissants
3. Restitution des forces de contact par la méthode du pseudo inverse.

2.5.2 Estimation des états du système

Pour restituer les états du système, nous utiliserons l'observateur à modes glissants. Selon le modèle que l'on possède et les mesures disponibles, plusieurs formes d'observateurs à modes glissants peuvent être utilisées. Dans notre cas, pour le modèle de RobuCar (2.23), nous allons décrire l'observateur que nous allons utiliser dans le paragraphe suivant.

Pour les observateurs non linéaires, l'étape la plus difficile est le calcul des gains de l'observateur pour assurer la convergence en temps fini. Pour les observateurs à modes glissants non linéaires, les études théoriques existantes pour calculer ces gains sont faites pour des structures particulières de modèles.

Nous allons donc reformuler le modèle non linéaire de RobuCar donné par (2.23) pour le ramener à une forme plus adéquate pour développer un observateur à modes glissants dont la convergence et le calcul des gains seront plus simples.

D'abord, nous décomposons le vecteur d'état x en trois vecteurs :

x_a regroupe toutes les vitesses mesurées, c'est à dire les quatre vitesses de rotation des roues et la vitesse du lacet,

x_b regroupe toutes les positions mesurées, qui sont les positions longitudinale et latérale et les deux angles de braquage avant et arrière,

x_c regroupe toutes les vitesses non mesurées, c'est-à-dire les vitesses longitudinale et latérale et les vitesses des deux braquages avant et arrière.

$$x_a = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \Gamma]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_{13}]^T$$

$$x_b = [d_x \ d_y \ \alpha_f \ \alpha_r]^T = [x_6 \ x_8 \ x_{10} \ x_{12}]^T$$

$$x_c = [v_x \ v_y \ \dot{\alpha}_f \ \dot{\alpha}_r]^T = [x_5 \ x_7 \ x_9 \ x_{11}]^T$$

Le modèle (2.23) peut donc être décomposé en deux sous modèles que l'on écrit sous la formes suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_a = f_a(x) + B_a u \\ y_a = x_a \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_b = x_c \\ \dot{x}_c = f_c(x) + B_c u \\ y_b = x_b \end{cases} \quad (2.40)$$

$f_a(x)$ et $f_c(x)$ sont des composantes de $f(x)$, B_a et B_c sont des composantes de B .

Pour le premier sous système (2.39), un observateur élémentaire [Wang *et al.*, 1997] pour un système de type SISO (une seule entrée une seule sortie) peut être développé pour chaque état. Pour restituer les 5 états de ce système, nous utilisons un observateur que l'on écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = f_1(\hat{x}) + B_1 u + k_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = f_2(\hat{x}) + B_2 u + k_2 \text{sign}(x_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = f_3(\hat{x}) + B_3 u + k_3 \text{sign}(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 = f_4(\hat{x}) + B_4 u + k_4 \text{sign}(x_4 - \hat{x}_4) \\ \dot{\hat{x}}_{13} = f_{13}(\hat{x}) + B_{13} u + k_{13} \text{sign}(x_{13} - \hat{x}_{13}) \end{cases} \quad (2.41)$$

$f_i(x)$ est la $i^{\text{ème}}$ ligne de la fonction $f(x)$ donnée par (2.24), B_i est la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice B et les k_i sont les gains des observateurs. Chaque gain est choisi de tel sorte que l'observateur converge vers sa surface de glissement. Ici, les surfaces choisies sont $s_i = \tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i$ ($i = \{1, 2, 3, 4, 13\}$). Les dynamiques des erreurs d'estimation \tilde{x}_i sont

données par :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \Delta f_1 - k_1 \text{sign}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \Delta f_2 - k_2 \text{sign}(\tilde{x}_2) \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \Delta f_3 - k_3 \text{sign}(\tilde{x}_3) \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \Delta f_4 - k_4 \text{sign}(\tilde{x}_4) \\ \dot{\tilde{x}}_{13} = \Delta f_{13} - k_{13} \text{sign}(\tilde{x}_{13}) \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\Delta f_i = f_i(x) - f_i(\hat{x}).$$

La condition de glissement pour \tilde{x}_i est soit

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_i^2 \leq -\eta |s_i| \quad (2.43)$$

ou

$$\dot{s}_i = -\eta \text{sign}(s_i) \quad (2.44)$$

où η est une constante positive. Pour ramener \tilde{x}_i à sa surface de glissement, $\dot{\tilde{x}}_i$ devrait avoir un signe opposé à celui de \tilde{x}_i . Pour le faire, nous pouvons choisir k_i qui satisfait l'inégalité :

$$k_i \geq \eta + T \quad (2.45)$$

En supposant que Δf_i est bornée, nous aurons :

$$|\Delta f_i| \leq T \quad (2.46)$$

où T est une constante positive. Ainsi, l'inégalité (2.45) peut assurer le glissement sur la surface $s_i = 0$, où l'erreur d'estimation \tilde{x}_i est nulle.

Pour le deuxième sous système (2.40), nous utilisons un observateur à modes glissants d'ordre 2 pour l'estimation des états x_b et x_c [Rabhi *et al.*, 2004] [M'sirdi *et al.*, 2005] [M'sirdi *et al.*, 2006a] [M'sirdi *et al.*, 2006b] [Rabhi *et al.*, 2006] [M'Sirdi *et al.*, 2007]. L'observateur utilisé s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_b = \hat{x}_c + \lambda |x_b - \hat{x}_b|^{1/2} \text{sign}(x_b - \hat{x}_b) \\ \dot{\hat{x}}_c = f_c(\hat{x}) + B_c u + \alpha \text{sign}(x_b - \hat{x}_b) \end{cases} \quad (2.47)$$

où λ et α sont des matrices diagonales et représentent les gains de l'observateur. Leurs diagonales sont constituées respectivement de $\{\lambda_6, \lambda_8, \lambda_{10}, \lambda_{12}\}$ et $\{\alpha_5, \alpha_7, \alpha_9, \alpha_{11}\}$.

Prenant $\tilde{x}_b = x_b - \hat{x}_b$ et $\tilde{x}_c = x_c - \hat{x}_c$, les erreurs d'estimation sont donc données par les équations :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_b = \tilde{x}_c - \lambda |\tilde{x}_b|^{1/2} \text{sign}(\tilde{x}_b) \\ \dot{\tilde{x}}_c = \Delta f_c - \alpha \text{sign}(\tilde{x}_b) \end{cases} \quad (2.48)$$

où $\Delta f_c = f_c(x) - f_c(\hat{x})$.

Supposons que les états du système (2.40) sont bornés et posons Δf_j la $j^{\text{ème}}$ composante de Δf_c , alors il existe pour chacune de ces composantes une constante positive f_j^+ , telle que l'inégalité suivante est vérifiée :

$$|\Delta f_j| < f_j^+ \quad (2.49)$$

Dans certains cas, f_j^+ peut être trouvée par raisonnement physique (par exemple dans un système, l'accélération maximale est connue).

Les conditions de convergence de l'observateur (2.47) sont données par le théorème suivant :

Théorème ([Davila et al., 2005]) : *Supposons que la condition (2.49) est satisfaite pour le système (2.40) et les paramètres de l'observateur (2.47) sont choisis de telle sorte que*

$$\begin{cases} \alpha_p > f_j^+ \\ \lambda_q > \sqrt{\frac{2}{\alpha_p - f_j^+} \frac{(\alpha_p + f_j^+)^{(1+p_j)}}{(1-p_j)}} \end{cases} \quad (2.50)$$

$p = \{5, 7, 9, 11\}$ et $q = \{6, 8, 10, 12\}$ où les p_j sont des constantes à choisir tel que $0 < p_j < 1, j=1, 2, 3, 4$. Alors, l'observateur (2.47) assure la convergence des états estimés (\hat{x}_b, \hat{x}_c) vers les états réels (x_b, x_c) après une période transitoire et il existe un instant t_0 tel que pour tout $t \geq t_0$, $(\hat{x}_b, \hat{x}_c) = (x_b, x_c)$.

2.5.3 Estimation de la dérivée du vecteur d'état

Après avoir estimé les états du système avec les observateurs à modes glissants décrits précédemment, nous allons estimer les dérivées des états en utilisant un observateur différentiel à modes glissants d'ordre 2 [Levant, 1998]. La description de cet observateur est la suivante :

Soit $f(t)$ une fonction mesurable et localement bornée définie dans $[0, \infty[$. On considère aussi que ce signal est composé d'un signal de base, dérivable avec une constante de

Lipschitz $c > 0$, et d'un bruit. Le but est d'estimer la dérivée du signal de base qui est inconnu en évitant la dérivation directe (df/dt). Pour cela, on considère l'équation auxiliaire suivante :

$$\dot{z} = w \quad (2.51)$$

En appliquant l'algorithme à modes glissants-2 [Levant, 1998] pour conserver $z-f(t)=0$ ($s=z-f(t)$ est la surface de glissement), on obtient :

$$\begin{cases} w = w_1 - \lambda |z - f(t)|^{1/2} \text{sign}(z - f(t)) \\ \dot{w}_1 = -\alpha \text{sign}(z - f(t)) \end{cases} \quad (2.52)$$

où $\alpha, \lambda > 0$. Ici $w(t)$ est la sortie de l'observateur différentiel, c'est-à-dire l'estimation de la dérivée de la fonction $f(t)$. Les solutions du système (2.51), (2.52) sont comprises au sens de Filippov [Filippov, 1988].

soit la fonction $\Phi(\alpha, \lambda, c) = |\Psi(t_*)|$, où $(\Sigma(t), \Psi(t))$ est la solution de :

$$\begin{cases} \dot{\Sigma} = -|\Sigma|^{1/2} + \Psi \\ \dot{\Psi} = \begin{cases} -\frac{1}{\lambda^2}(\alpha - c), & -|\Sigma|^{1/2} + \Psi > 0 \\ -\frac{1}{\lambda^2}(\alpha + c), & -|\Sigma|^{1/2} + \Psi \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad \Sigma(0) = 0, \Psi(0) = 1 \quad (2.53)$$

$\alpha > c, \lambda \neq 0$ et $t_* = \inf \{t | t > 0, \Sigma(t) > 0, \Psi(t) < 0\}$.

Dans la pratique, $\Phi(\alpha, \lambda, c)$ doit être calculée par simulation.

La convergence de l'observateur est démontrée par le théorème suivant :

Soit $W(c, n)$ l'ensemble de tous les signaux d'entrée dont les $(n - 1)^{me}$ dérivées ont une constante de Lipschitz c .

Théorème (critère de convergence [Levant, 1998]) :

Posons $\alpha > c > 0, \lambda > 0, \Phi(\alpha, \lambda, c) < 1$. Puis, la fonction $f(t)$ est dérivable avec une constante de Lipschitz c , l'égalité $w(t) = \dot{f}(t)$ est vérifiée après un temps fini. Il n'y a pas de convergence de $w(t)$ vers $\dot{f}(t)$ pour des $f \in W(c, 2)$ si $\Phi(\alpha, \lambda, c) > 1$.

Plus $\Phi(\alpha, \lambda, c)$ est petit, plus la convergence est rapide. Φ est évidemment le même pour tous (α, λ, c) avec $\alpha = \mu_1 c, \lambda = \mu_2 c^{1/2}$, où $\mu_1 > 1, \mu_2 > 0$ sont des constantes. De même, quand λ augmente Φ diminue.

Les conditions suffisantes pour que $w(t)$ tende vers $\dot{f}(t)$ sont :

$$\begin{cases} \alpha > c \\ \lambda^2 \geq 4c \frac{\alpha+c}{\alpha-c} \end{cases} \quad (2.54)$$

La condition (2.54) résulte d'une estimation très grossière. Le calcul de Φ montre que plusieurs autres valeurs, par exemple $\lambda = c^{\frac{1}{2}}$, $\alpha = 1.1c$ (pour $\Phi = 0.988$), ou $\lambda = 0.5c^{\frac{1}{2}}$, $\alpha = 5c$ (pour $\Phi = 0.736$), peuvent aussi être prises.

Pour notre système, la dérivée de chaque état sera estimée en procédant comme suit : on pose $\dot{x}_i = w_i$, $i \in \{1, 2, \dots, 13\}$. Les dérivées w_i des états x_i sont estimées par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} w_1 = v_1 - \lambda_1 |\hat{x}_1 - x_1|^{1/2} \text{sign}(\hat{x}_1 - x_1) \\ \dot{v}_1 = -\alpha_1 \text{sign}(\hat{x}_1 - x_1) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} w_2 = v_2 - \lambda_2 |\hat{x}_2 - x_2|^{1/2} \text{sign}(\hat{x}_2 - x_2) \\ \dot{v}_2 = -\alpha_2 \text{sign}(\hat{x}_2 - x_2) \end{array} \right. \\ \vdots \\ \left\{ \begin{array}{l} w_{13} = v_{13} - \lambda_{13} |\hat{x}_{13} - x_{13}|^{1/2} \text{sign}(\hat{x}_{13} - x_{13}) \\ \dot{v}_{13} = -\alpha_{13} \text{sign}(\hat{x}_{13} - x_{13}) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2.55)$$

les gains d'observations λ_i et α_i sont calculés en respectant les conditions (2.54)

2.5.4 Estimation des forces de contact

Après avoir estimé les dérivées des états, nous allons estimer les forces de contact, longitudinales et latérales, des pneumatiques avec la chaussée par la méthode de restitution à partir des équations du modèle.

Nous avons 6 forces à estimer (F_{x1} , F_{x2} , F_{x3} , F_{x4} , F_{yf} et F_{yr}). Nous allons donc utiliser 6 équations du modèle pour restituer ces forces. En utilisant les équations de (2.13), (2.14)

et (2.15), nous avons le sous système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{J_1}{R}\dot{\hat{x}}_1 + \frac{f_1}{R}\hat{x}_1 - \frac{1}{R}u_1 = F_{x1} + \hat{x}_{10}F_{yf} \\ \frac{J_2}{R}\dot{\hat{x}}_2 + \frac{f_2}{R}\hat{x}_2 - \frac{1}{R}u_2 = F_{x2} + \hat{x}_{10}F_{yf} \\ \frac{J_1}{R}\dot{\hat{x}}_3 + \frac{f_3}{R}\hat{x}_3 - \frac{1}{R}u_3 = F_{x3} + \hat{x}_{12}F_{yr} \\ \frac{J_4}{R}\dot{\hat{x}}_4 + \frac{f_4}{R}\hat{x}_4 - \frac{1}{R}u_4 = F_{x4} + \hat{x}_{12}F_{yr} \\ M\dot{\hat{x}}_5 + f.\hat{x}_5 = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} - 2\hat{x}_{10}F_{yf} - 2\hat{x}_{12}F_{yr} \\ M\dot{\hat{x}}_7 + f.\hat{x}_7 = (F_{x1} + F_{x2})\hat{x}_{10} + (F_{x3} + F_{x4})\hat{x}_{12} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \end{array} \right. \quad (2.56)$$

Le sous système (2.56) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\varphi(\hat{x}, \dot{\hat{x}}) = E(\hat{x})F \quad (2.57)$$

tel que φ et E sont connues et F le vecteur regroupant les six forces inconnues.

$$\varphi(\hat{x}, \dot{\hat{x}}) = \begin{pmatrix} \frac{J_1}{R}\dot{\hat{x}}_1 + \frac{f_1}{R}\hat{x}_1 - \frac{1}{R}u_1 \\ \frac{J_2}{R}\dot{\hat{x}}_2 + \frac{f_2}{R}\hat{x}_2 - \frac{1}{R}u_2 \\ \frac{J_1}{R}\dot{\hat{x}}_3 + \frac{f_3}{R}\hat{x}_3 - \frac{1}{R}u_3 \\ \frac{J_4}{R}\dot{\hat{x}}_4 + \frac{f_4}{R}\hat{x}_4 - \frac{1}{R}u_4 \\ M\dot{\hat{x}}_5 + f.\hat{x}_5 \\ M\dot{\hat{x}}_7 + f.\hat{x}_7 \end{pmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \hat{x}_{10} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \hat{x}_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \hat{x}_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \hat{x}_{12} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -2\hat{x}_{10} & -2\hat{x}_{12} \\ \hat{x}_{10} & \hat{x}_{10} & \hat{x}_{12} & \hat{x}_{12} & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \\ F_{x3} \\ F_{x4} \\ F_{yf} \\ F_{yr} \end{bmatrix}$$

La matrice E est carrée mais pas inversible pour certaines valeurs de \hat{x}_{10} et \hat{x}_{12} . Nous allons donc utiliser la méthode de pseudo-inverse pour calculer les forces à partir de (2.57) :

$$\hat{F} = E^+ \varphi(\hat{x}, \dot{\hat{x}}) \quad (2.58)$$

tel que E^+ est la pseudo inverse de la matrice E .

2.5.5 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus avec l'application de la méthode présentée précédemment pour l'estimation des forces de contact entre les pneumatiques et la chaussée. Dans cette simulation, les actionneurs de braquage ne sont pas utilisés. Pour tourner, nous utilisons la différence entre les vitesses de rotation des roues gauche et celle de droite.

Dans cette simulation, les vitesses de rotation des quatre roues sont imposées. Au départ, pour faire avancer le véhicule en ligne droite, on fixe une vitesse de 20 rad/s pour chaque roue. A l'instant $t=40s$ on veut tourner à droite, donc on diminue progressivement la vitesse de la roue avant droite jusqu'à 14 rad/s puis la ramener à sa valeur initiale de 20 rad/s à l'instant $t=60s$. Puis, à l'instant $t=100s$ on tourne à gauche en réduisant la vitesse de rotation de la roue avant gauche jusqu'à 14 rad/s et revenir à la vitesse initiale à l'instant $t=120s$ pour rouler à nouveau en ligne droite.

Nous allons montrer les résultats obtenus sur :

- l'estimation des états du système avec l'observateur à modes glissants développé précédemment et qui est représenté par les deux systèmes (2.41) et (2.47)
- l'estimation des dérivées des états avec l'observateur différentiel à modes glissants représenté par le système (2.52)
- la restitution des forces de contact pneus/chaussée par la méthode de pseudo-inverse donnée par (2.58)

Estimation des états : les résultats de simulation sont obtenus en fixant les gains k_i suivant la condition (2.45) et les gains λ_i suivant les conditions (2.50). Les valeurs numériques de ces gains sont :

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_{13} = 20, \alpha_5 = \alpha_7 = 20 \text{ et } \lambda_6 = \lambda_8 = 43, c = 5.$$

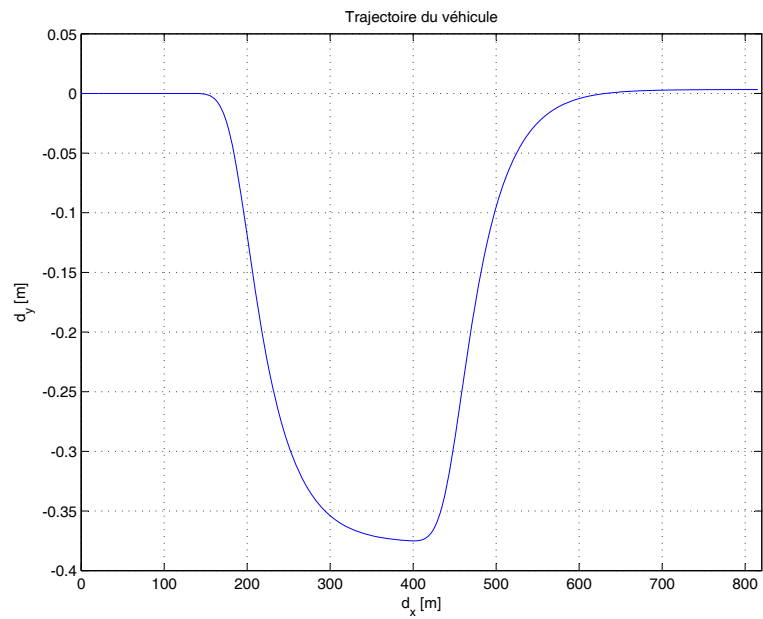


FIG. 2.6 – Trajectoire du véhicule

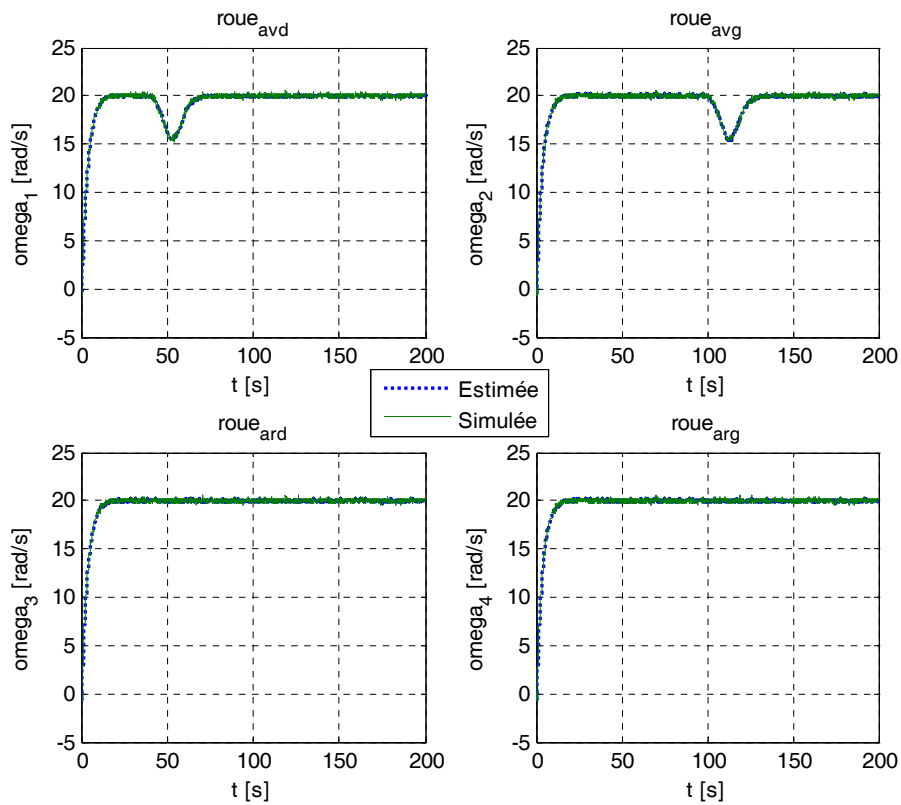


FIG. 2.7 – Estimation des vitesses de rotation des roues

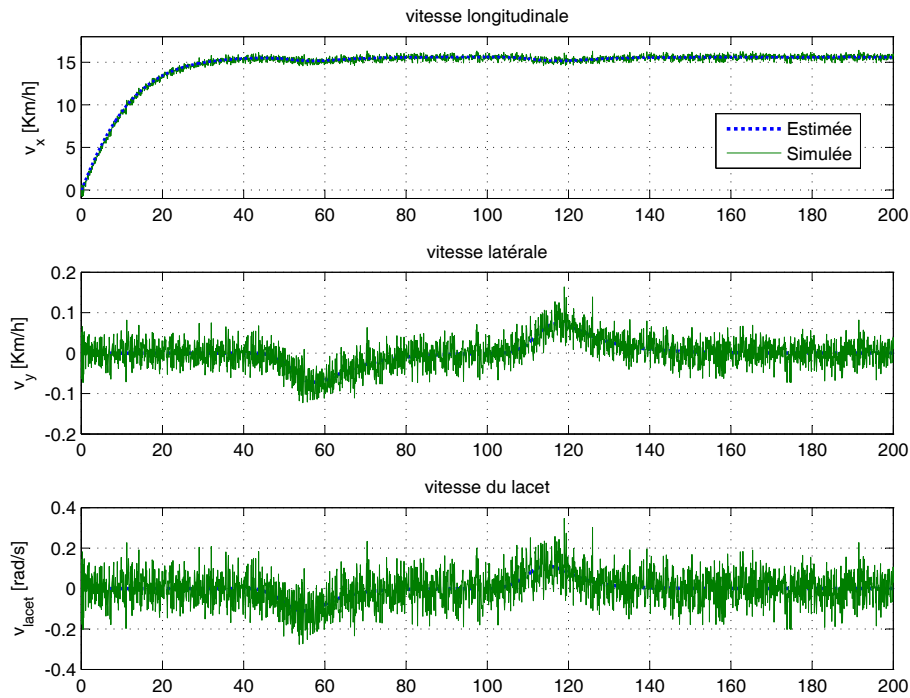


FIG. 2.8 – Estimation des vitesses longitudinale et latérale et la vitesse du lacet

La figure 2.6 montre la trajectoire du véhicule.

Les figures 2.7 et 2.8 montrent les vitesses de rotation des roues, les vitesses longitudinale et latérale et la vitesse du lacet simulées par le modèle et celles estimées par les observateurs à modes glissants.

Estimation des dérivées des états : les gains des observateurs différentiels donnés dans (2.55) sont fixés en utilisant les conditions de convergence (2.54). Leurs valeurs numériques sont :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_7 = \alpha_{13} = 2 \text{ et } \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_7 = \lambda_{13} = -10.$$

Les accélérations estimées par l'observateur différentiel sont montrées par les figures 2.9 et 2.10.

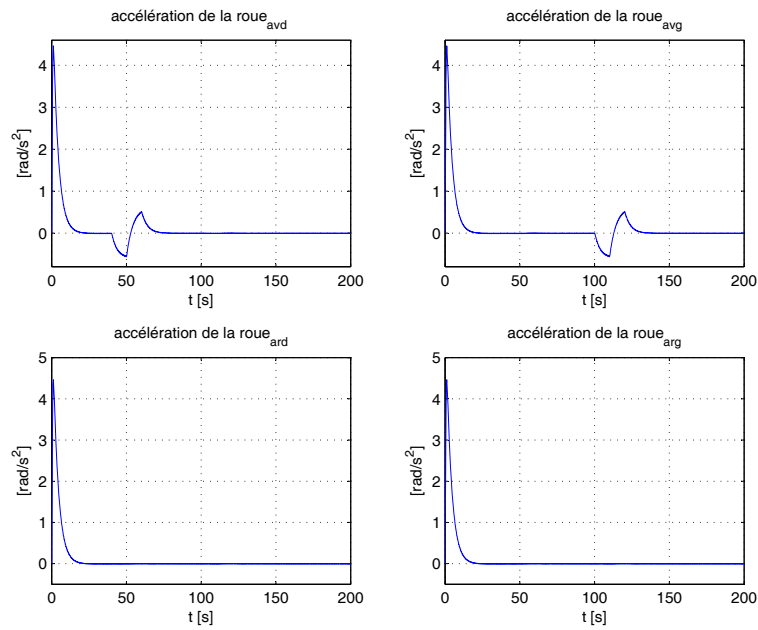


FIG. 2.9 – Estimation des accélérations de rotation des roues

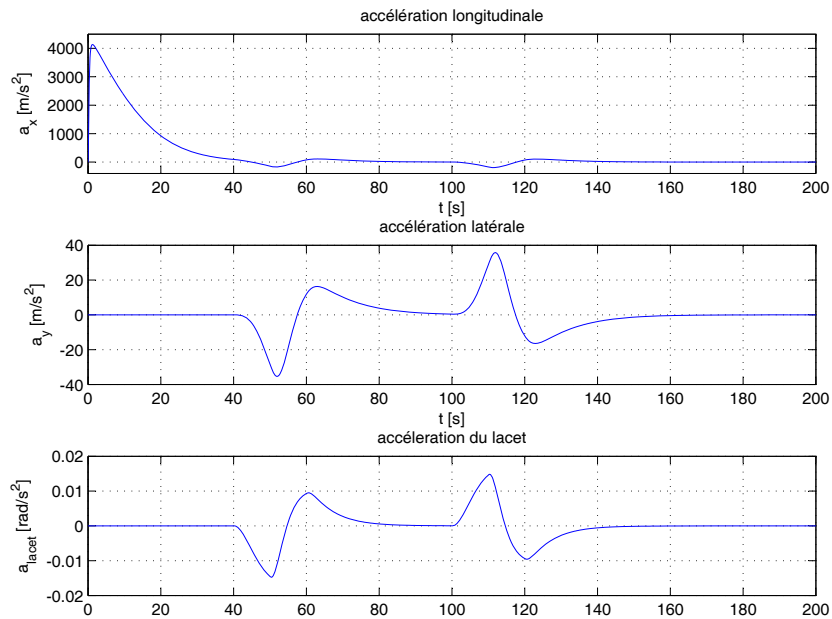


FIG. 2.10 – Estimation des accélérations longitudinale, latérale et celle du lacet

Estimation des forces : les forces estimées par la méthode de restitution développée précédemment sont données par les figures 2.11 et 2.12

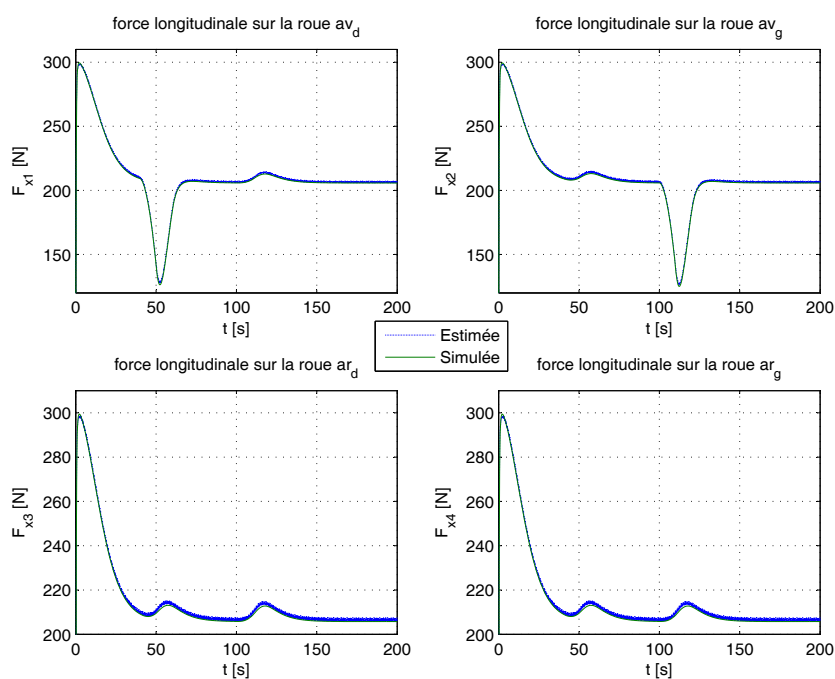


FIG. 2.11 – Estimation des forces de contact longitudinales

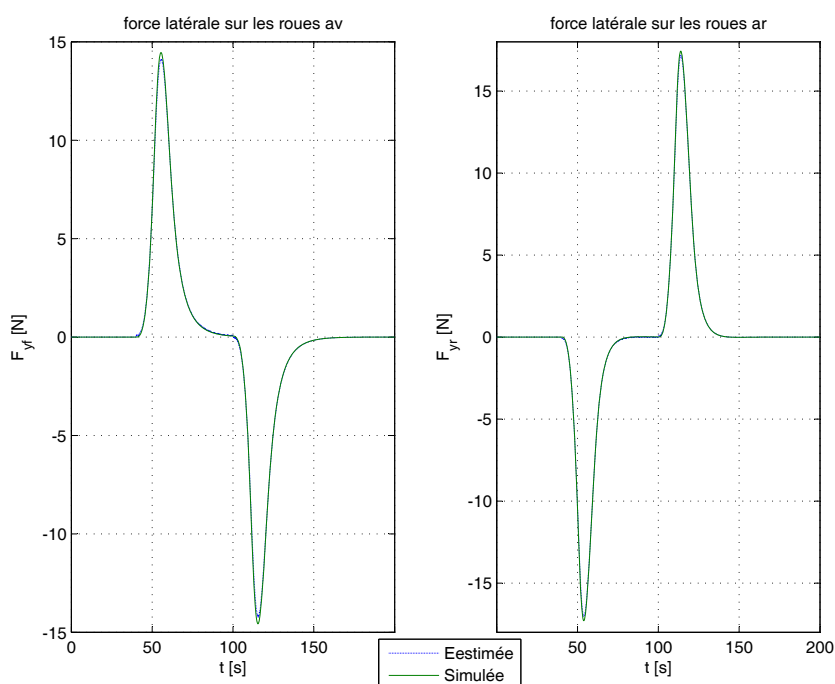


FIG. 2.12 – Estimation des forces de contact latérales

Nous avons estimé dans un premier temps les états et les sorties du système (figures 2.7 et 2.8). Ensuite, Nous avons estimé les dérivées des états (figures 2.9 et 2.10). Enfin,

nous avons restitué les forces de contact roues/chaussée (figures 2.11 et 2.12)

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord modélisé le véhicule électrique RobuCar. Le modèle dynamique est celui qui sera utilisé par la suite dans les prochains chapitres. Les dynamiques considérées dans cette modélisation sont : les dynamiques de rotation des quatre roues en contact avec la chaussée, les dynamiques des deux mouvements longitudinal et latéral du véhicule, les dynamiques des deux braquages avant et arrière et la dynamique du lacet. Ensuite, nous avons développé le modèle dynamique d'un train de trois Robucars après avoir cité quelques modèles cinématiques et dynamiques de trains de véhicules existant dans la littérature. Les deux grandeurs sur lesquelles se base le modèle dynamique de train de RobuCars sont : l'écart longitudinal entre deux véhicules successifs e_{xi} et l'angle désignant la direction dans laquelle se trouve le véhicule de devant ϕ_i .

Les deux modèles, celui d'un seul véhicule et celui d'un train, sont non linéaires affines en la commande. Les commandes sont aussi découplées ce qui nous donne plus de choix dans la perspective de réaliser des stratégies de reconfiguration en présence de pannes d'actionneurs. Le nombre important de capteurs permet aussi au système d'une part de rester observable même en cas de défaut sur quelques capteurs et d'une autre part de le reconfigurer en présence de ce type de défauts.

Sur le véhicule, sont mesurées les vitesses de rotation des quatre roues avec des codeurs incrémentaux, les deux angles de braquage avant et arrière par des codeurs absolus, les positions longitudinale et latérale du véhicule par un capteur GPS, la vitesse du lacet du véhicule par une centrale inertielle et la distance et la direction d'un obstacle se trouvant devant le véhicule par un télémètre laser (cet obstacle est le véhicule de devant dans le cas d'un train de véhicules).

Les vitesses et les accélérations du véhicule, les vitesses et accélérations de braquage, les accélérations de rotation des roues et l'accélération du lacet sont des variables non mesurées. Pour la surveillance, il est nécessaire de les connaître, et nous serons donc amenés à les estimer, en utilisant les observateurs dans le chapitre 4 relatif au train de véhicules.

Etudions tout d'abord la surveillance d'un véhicule seul, ceci fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3

Surveillance à base de modèle d'un véhicule électrique RobuCar

L'objectif dans ce chapitre est d'utiliser des méthodes de surveillance pour la détection et l'isolation des défauts capteurs et actionneurs dans un véhicule électrique seul. De manière à choisir la méthode la mieux adaptée en terme de performances en détection et localisation, nous utilisons deux méthodes de surveillance à base de modèle. L'une est à base d'observateurs et l'autre est basée sur la génération des relations de redondance analytique (espace de parité).

Dans la première méthode, le principe est d'estimer les sorties du système par des observateurs et l'erreur d'estimation est considérée comme résidu. Dans la deuxième approche, l'idée est d'éliminer les états et générer des équations, appelées relations de redondance analytique, qui ne sont fonction que des valeurs connues (entrées, mesures et leurs dérivées successives ainsi que les paramètres du modèle). Ces dérivées sont estimées avec un observateur différentiel à modes glissants.

3.1 Surveillance à base d'observateurs

La génération de résidus (ou détecteurs de défauts) à l'aide d'observateurs consiste à reconstruire l'état ou la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu

à la conception de générateurs de résidus flexibles. L'utilisation simple d'un observateur, c'est à dire utiliser toutes les entrées et sorties du système pour construire l'observateur, permet de détecter les défaillances capteurs et actionneurs. Mais plusieurs études ont montrées ([Maquin et Ragot, 2000] [Christophe *et al.*, 2004]) que tous les résidus sont sensibles à tous les défauts. Il est donc difficile, voir impossible, d'isoler ces défaillances. L'une des solutions que l'on peut apporter pour pouvoir isoler chaque défaut, provenant de l'un des capteurs ou des actionneurs, est de construire des observateurs à partir d'une partie seulement des entrées et sorties du système. Selon que l'on souhaite détecter des défauts d'actionneurs ou de capteurs on n'utilise qu'une partie des entrées ou des sorties. Pour un système à m entrées et p sorties, on peut alors construire un banc d'observateurs suivant l'une des quatre architectures suivantes :

La notation \bar{u}_i (\bar{y}_i), visible sur les figures qui suivent, représente le vecteur qui comporte toutes les entrées (sorties) sauf la $i^{\text{ème}}$.

- Un banc d'observateurs dédiés aux défauts actionneurs : le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par la $i^{\text{ème}}$ entrée et toutes les sorties, les $(m-1)$ autres entrées sont considérées comme inconnues. Dans ce cas, la sortie de cet $i^{\text{ème}}$ observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées. Par conséquent, le résidu $r_i = e_i$, qui est la différence entre la sortie y_i du système et celle de l'observateur \hat{y}_i , sera sensible aux défaillances de toutes les entrées non utilisées. Le schéma de ce type d'observateurs est illustré dans la figure 3.1.

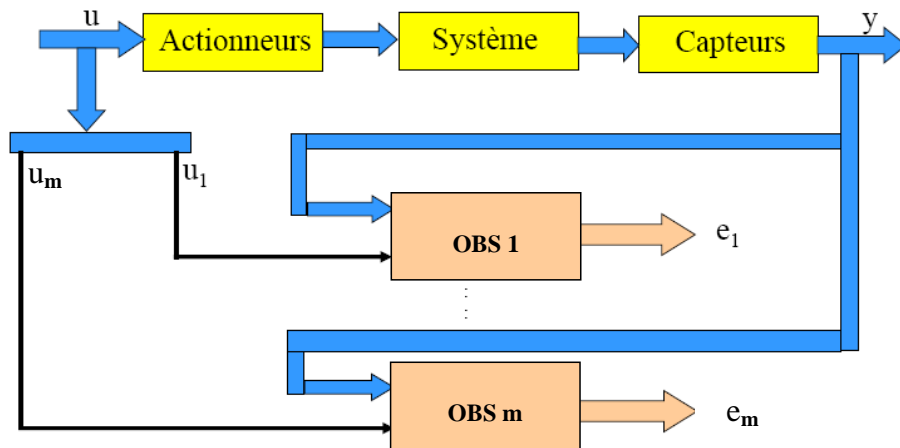


FIG. 3.1 – Observateurs dédiés à l'isolation des défauts actionneurs

- Un banc d'observateurs généralisés pour les défauts actionneurs : le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les entrées sauf la $i^{\text{ème}}$ et toutes les sorties. La sortie de cet observateur est en principe sensible aux défauts de toutes les entrées sauf ceux de la $i^{\text{ème}}$. Le résidu r_i sera donc sensible seulement aux défauts du $i^{\text{ème}}$ actionneur. Son schéma est illustré par la figure 3.2.

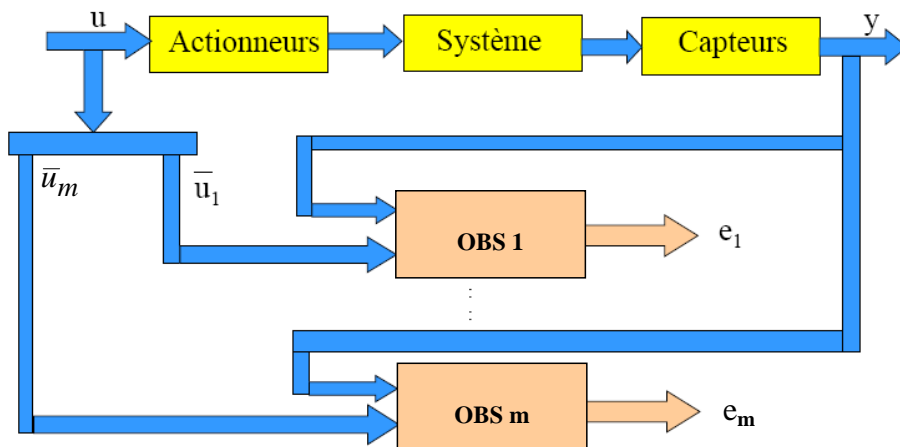


FIG. 3.2 – Observateurs généralisés pour l'isolation des défauts actionneurs

- Un banc d'observateurs dédiés aux défauts capteurs : le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les entrées et la $i^{\text{ème}}$ sortie et les $(p - 1)$ autres sorties sont considérées comme inconnues. La sortie de cet $i^{\text{ème}}$ observateur est donc insensible aux sorties non utilisées mais sensible à celle utilisée. Les résidus $\{r_1, \dots, r_{i-1}, r_{i+1}, \dots, r_p\}$

seront sensibles respectivement aux défauts des sorties $\{y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_p\}$. Le schéma de ce type de banc d'observateurs est illustré dans la figure 3.3.

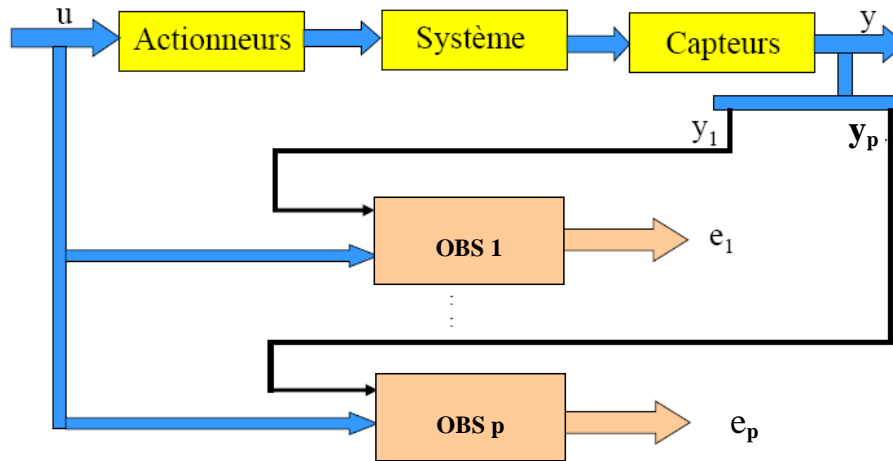


FIG. 3.3 – Observateurs dédiés à l'isolation des défauts capteurs

- Un banc d'observateurs généralisés pour les défauts capteurs : le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les entrées et toutes les sorties sauf la $i^{\text{ème}}$. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les sorties sauf ceux de la $i^{\text{ème}}$. Il y aura donc que le résidu $r_i = y_i - \hat{y}_i$ qui sera sensible aux défaillances du $i^{\text{ème}}$ capteur. Le schéma de cette structure est illustré par la figure 3.4.

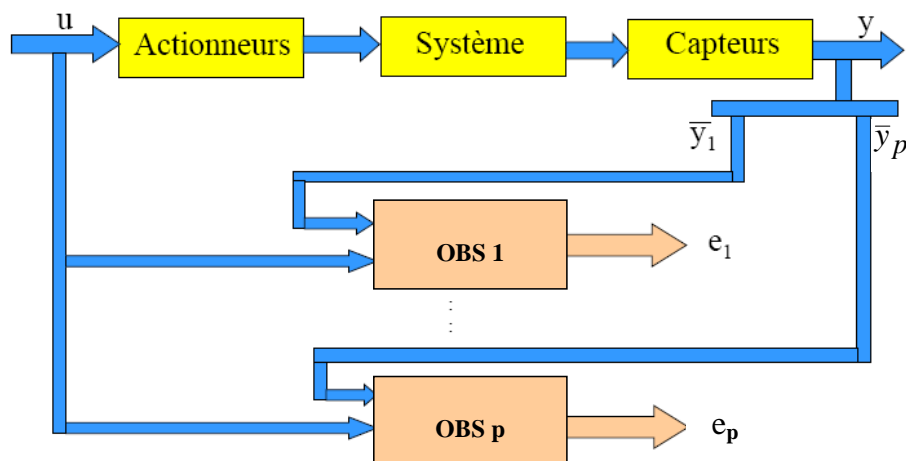


FIG. 3.4 – Observateurs généralisés pour l'isolation des défauts capteurs

Nous utilisons par la suite les deux structures des observateurs généralisés, pour détecter et isoler les défauts actionneurs et les défauts capteurs, qui sont données respectivement

par les figures 3.2 et 3.4.

3.1.1 Détection et Isolation des défauts capteurs de RobuCar

Pour détecter et isoler les éventuelles défauts qui peuvent survenir dans les capteurs de RobuCar, nous utilisons des observateurs conçus selon l'architecture décrite par la figure 3.4. Pour le modèle non linéaire de RobuCar, nous allons concevoir un banc de 9 observateurs, et à chaque fois nous enlèverons une mesure dans le vecteur des sorties pour la considérer comme inconnue. Chaque observateur est dédié à la détection d'un défaut d'un seul capteur.

Pour estimer les états du système, nous utilisons le modèle décomposé du véhicule, représenté par les deux systèmes (2.39) et (2.40), et les observateurs à modes glissants décrits précédemment et représentés par les équations (2.41) et (2.47).

Ainsi, pour détecter les défauts sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite (sortie 1) nous allons utiliser l'observateur permettant d'estimer ω_1 ($y_1 = x_1$). Dans ce cas, nous considérons cette sortie comme inconnue et nous n'utilisons que les huit autres sorties ($\omega_2, \omega_3, \omega_4, \Gamma, d_x, d_y, \alpha_f, \alpha_r$). Le gain k_1 est, dans ce cas, différent de celui calculé pour l'estimation de l'état correspondant au cas où $y_1 = \omega_1$ est disponible. On écrit alors ce premier observateur de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = f_1(\hat{x}) + B_1 u + K_1 \text{sign}(x_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_2 = f_2(\hat{x}) + B_2 u + k_2 \text{sign}(x_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = f_3(\hat{x}) + B_3 u + k_3 \text{sign}(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 = f_4(\hat{x}) + B_4 u + k_4 \text{sign}(x_4 - \hat{x}_4) \\ \dot{\hat{x}}_{13} = f_{13}(\hat{x}) + B_{13} u + k_{13} \text{sign}(x_{13} - \hat{x}_{13}) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_b = \hat{x}_c + \lambda |x_b - \hat{x}_b|^{1/2} \text{sign}(x_b - \hat{x}_b) \\ \dot{\hat{x}}_c = f_c(\hat{x}) + B_c u + \alpha \text{sign}(x_b - \hat{x}_b) \end{cases} \quad (3.2)$$

La figure 3.5 montre le schéma bloc résumant cette méthode d'isolation de défauts capteurs avec un banc de neuf observateurs.

Nous allons appliquer cette méthode pour détecter et isoler des défauts de capteurs du véhicule tout électrique RobuCar [Bouibed *et al.*, 2009e].

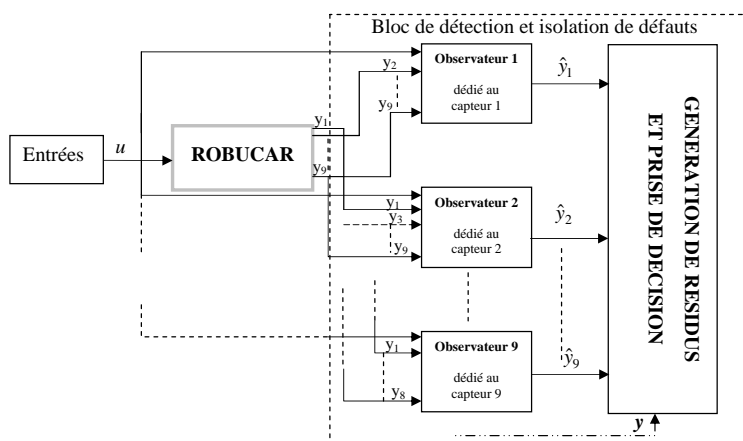


FIG. 3.5 – Détection et isolation des défauts capteurs par un banc d'observateurs

3.1.2 Détection et isolation des défauts actionneurs de RobuCar

De la même façon que pour la détection des défauts capteurs, nous allons utiliser un banc d'observateurs à entrées inconnues conçus selon l'architecture montrée par la figure 3.2. Le RobuCar contient six actionneurs, nous allons donc utiliser un banc de six observateurs à mode glissant dont chacun considère l'une des six entrées comme inconnue. On peut réécrire le modèle de RobuCar de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \bar{B}_i \bar{u}_i + B_i u_i \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.3)$$

$i = 1, \dots, 6.$

L'observateur dédié à la détection du défaut sur l'actionneur i s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + \bar{B}_i \bar{u}_i + H_i \text{sign}(x - \hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (3.4)$$

Chaque observateur nous fournit alors un ensemble de neuf résidus r_{ij} qui correspondent aux erreurs d'estimation e_{ij} ($i = 1, \dots, 6$ et $j = 1, \dots, 9$). Tous ses résidus seront représentés sous forme d'une matrice de signatures et chacune d'elles correspond à un défaut de l'un des actionneurs.

u_1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}	r_{17}	r_{18}	r_{19}
u_2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}	r_{26}	r_{27}	r_{28}	r_{29}
u_3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	r_{35}	r_{36}	r_{37}	r_{38}	r_{39}
u_4	r_{41}	r_{42}	r_{43}	r_{44}	r_{45}	r_{46}	r_{47}	r_{48}	r_{49}
u_5	r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}	r_{55}	r_{56}	r_{57}	r_{58}	r_{59}
u_6	r_{61}	r_{62}	r_{63}	r_{64}	r_{65}	r_{66}	r_{67}	r_{68}	r_{69}

TAB. 3.1 – Table de signatures de résidus pour la détection des défauts actionneurs

r_{ij} est le $i^{\text{ème}}$ résidu généré par le $j^{\text{ème}}$ observateur.

3.1.3 Résultats de simulation

Nous présentons les résultats de simulation obtenus par la méthode de banc d'observateurs pour la détection et l'isolation des défaillances capteurs et actionneurs.

Dans un premier temps, considérons les défaillances capteurs : dans cette simulation, les braquages avant et arrière sont utilisés comme des entrées. Nous allons donner des consignes de vitesses de rotation des roues ainsi que les braquages pour réaliser une trajectoire désirée du véhicule. Le véhicule roule en ligne droite horizontale à vitesse constante jusqu'à l'instant $t=45s$ où il tourne à gauche à l'aide du braquage des roues avant. À l'instant $t=65s$, le véhicule revient sur sa trajectoire horizontale puis il tourne à droite à l'instant $t=120s$ toujours à l'aide du braquage avant. Enfin, à l'instant $t=140s$ le véhicule reprend la trajectoire horizontale pour s'arrêter à la position longitudinale de $820m$.

Au cours de ce trajet, nous simulerons à chaque fois un défaut sur l'un des capteurs et nous observerons la réaction des résidus à chaque défaut.

Défaut sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite (le codeur incrémental) :

A l'instant $t=40s$, nous simulons un défaut additif sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite et nous visualisons les résultats obtenus par l'observateur et les résidus générés.

La figure 3.7 montre l'estimation des vitesses de rotation des quatre roues et l'apparition

d'un défaut sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite. Sur la figure 3.8, on remarque que le résidu r_1 est sensible à ce défaut et les autres résidus sont insensibles. Ce défaut est donc bien détecté et bien isolé.

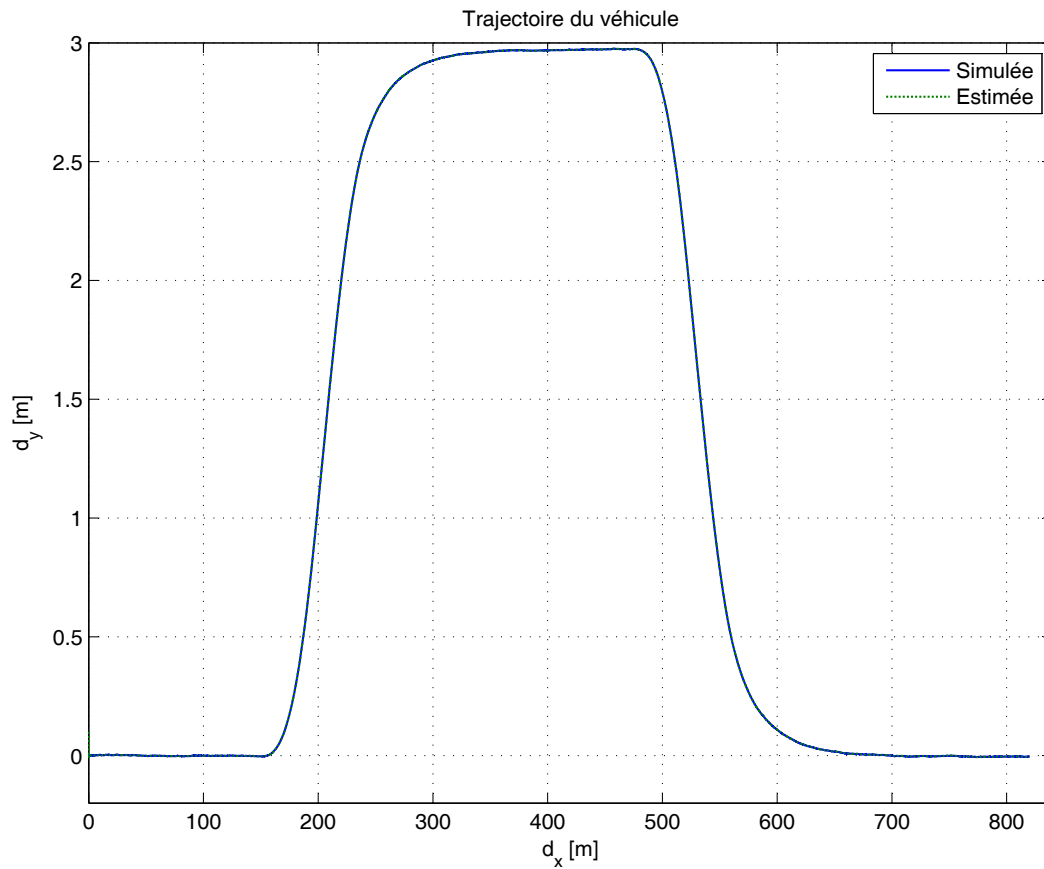


FIG. 3.6 – Trajectoire du véhicule

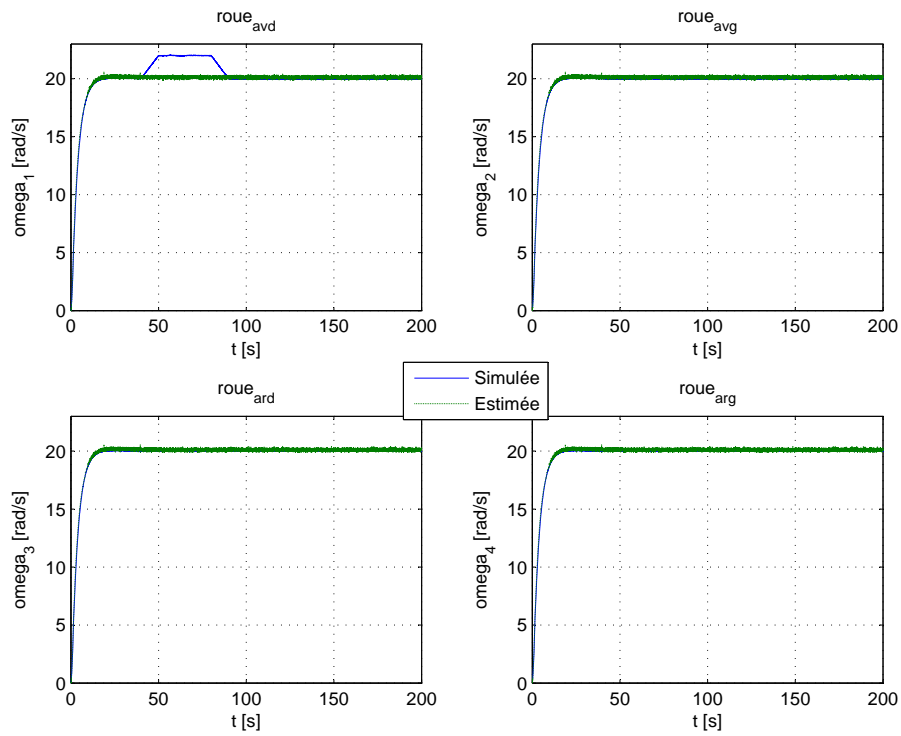


FIG. 3.7 – Les vitesses de rotation des roues

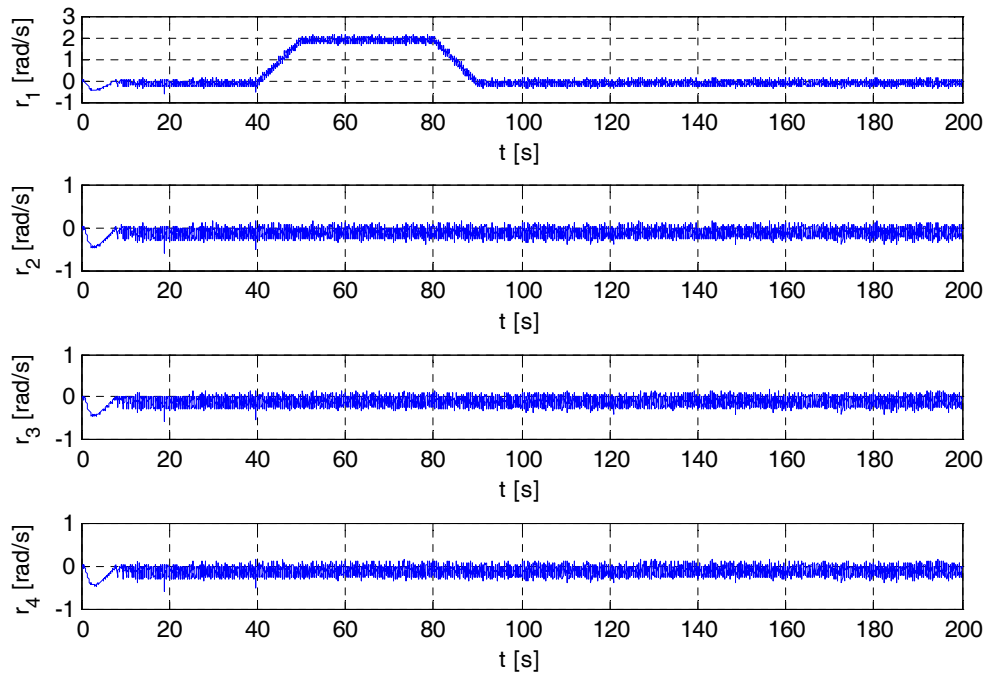


FIG. 3.8 – Détection de défauts capteurs de vitesse de rotation des roues

Défaut sur le capteur de position longitudinale (le GPS) :

De la même façon que pour le défaut sur le codeur incrémental, nous simulons un défaut additif sur le capteur GPS à l'instant $t=40s$ sous forme d'une erreur sur la position longitudinale. Nous visualisons par la suite la réaction des résidus après l'apparition de ce défaut.

La figure 3.9 montre la trajectoire du véhicule avec l'erreur sur la position longitudinale causée par le défaut. Les figures 3.10 et 3.11 montrent que seul le résidu R_5 est sensible à ce défaut. D'où la faciliter d'isoler ce défaut ainsi que les défauts des autres actionneurs.

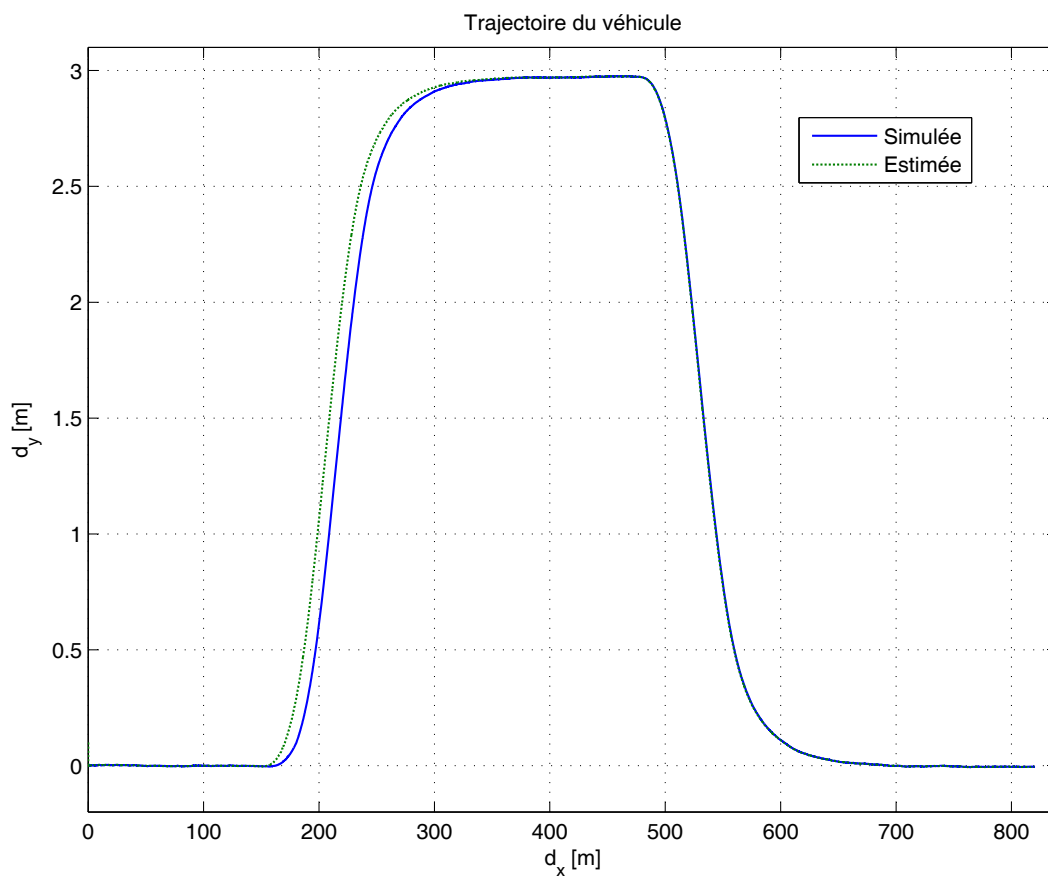
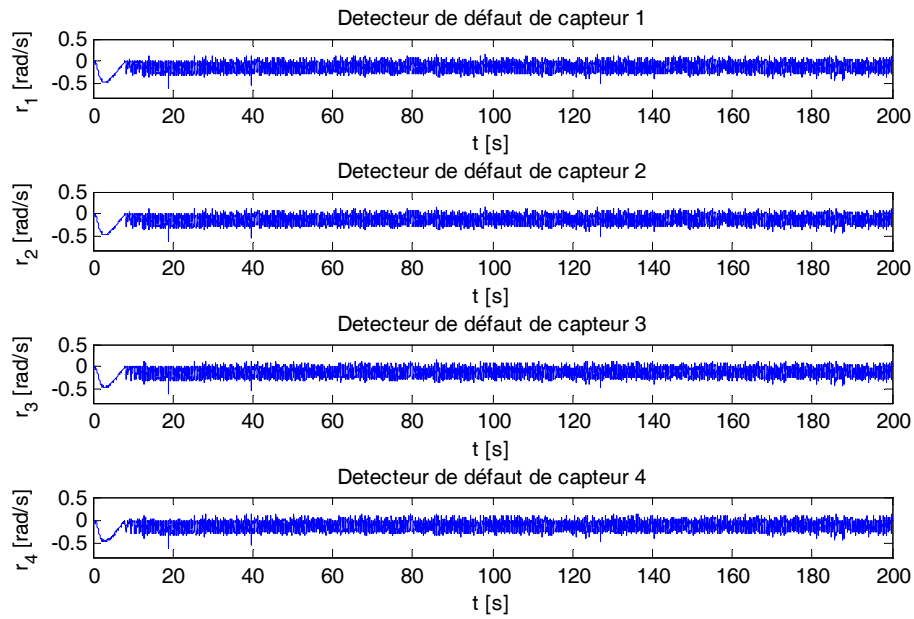
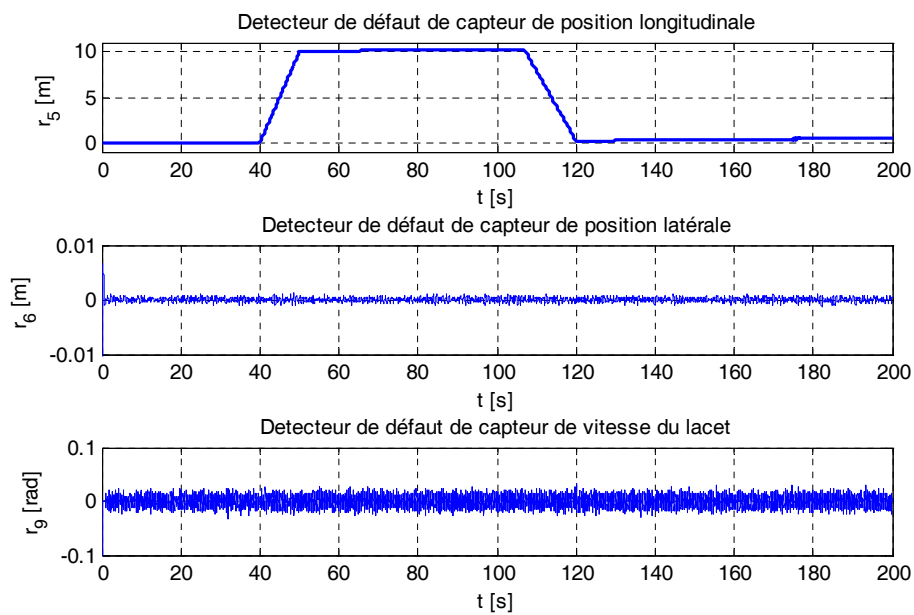


FIG. 3.9 – Trajectoire de véhicule avec un défaut sur le capteur de position longitudinale

FIG. 3.10 – Réaction des résidus r_1 , r_2 , r_3 et r_4 par rapport au défautFIG. 3.11 – Réaction des résidus r_5 , r_7 et r_9 par rapport au défaut

Nous ne présenterons pas toutes les simulations, mais de la même façon, nous détectons des défauts sur les autres capteurs (centrale inertielle, codeurs absolus,...). La méthode de multi-observateurs permet de bien détecter et de bien isoler tous les défauts capteurs.

Nous nous intéressons maintenant au défaut actionneur.

Défaut sur le moteur (actionneur) de traction de la roue avant droite :

Nous effectuons une même simulation que celle du défaut capteur mais cette fois nous simulons un défaut sur le moteur de traction de la roue avant droite. Ce défaut intervient à l'instant $t=40s$ sous forme d'un défaut additif.

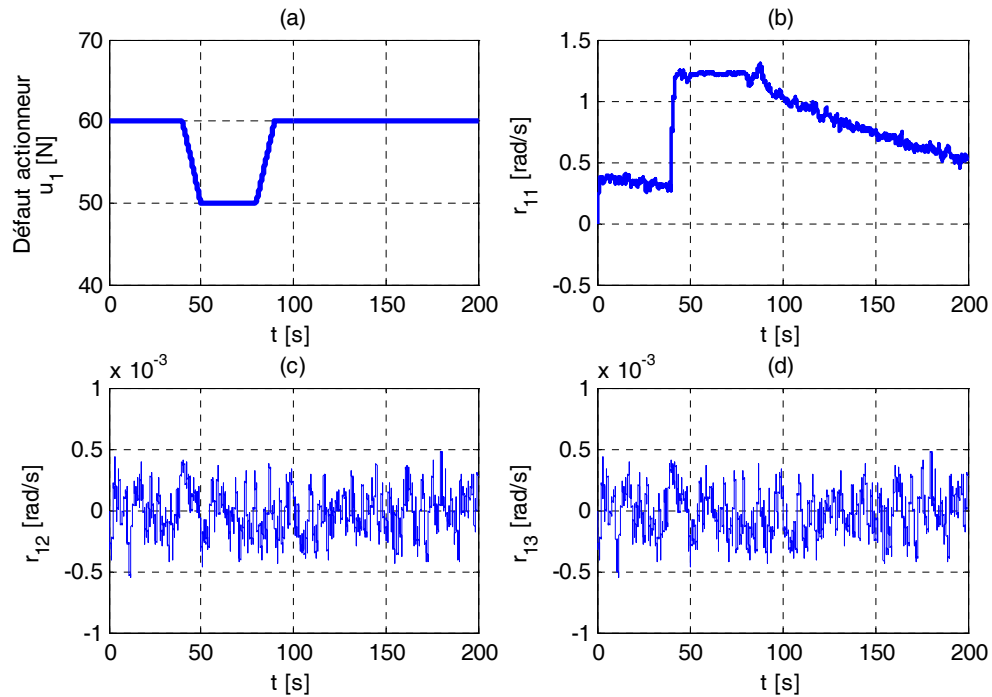


FIG. 3.12 – Défaut sur le moteur de traction de la roue avant droite et les résidus r_{11} , r_{12} et r_{13}

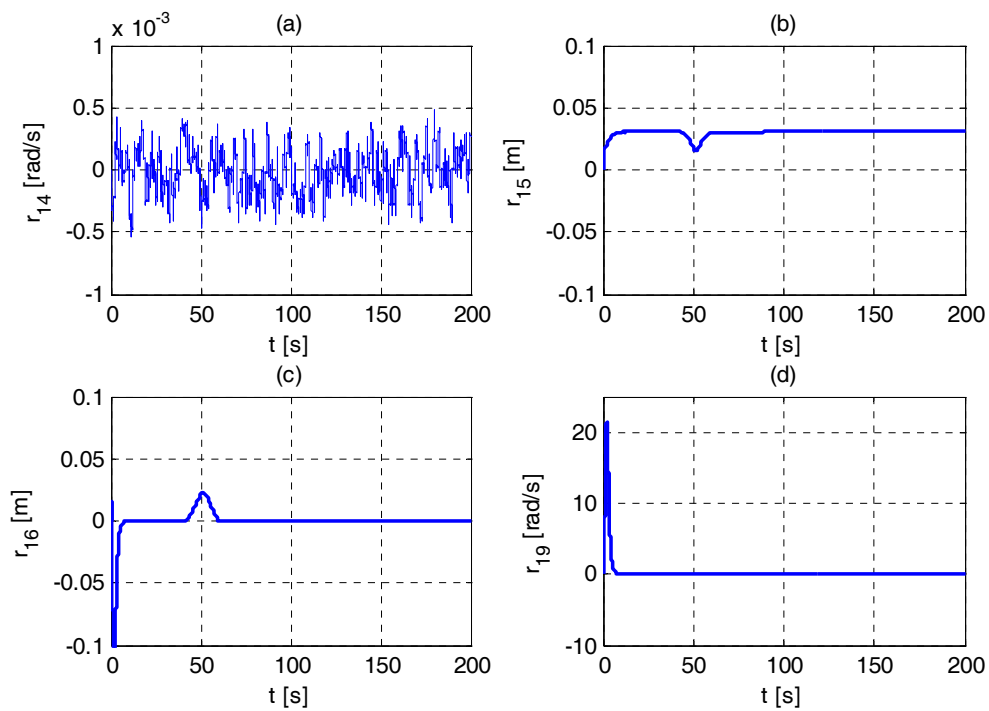


FIG. 3.13 – Réaction des résidus r_{14} , r_{15} , r_{16} et r_{19} par rapport au défaut actionneur

Les simulations montrent que, pour les défauts capteurs, l'approche proposée est intéressante, elle permet bien de localiser et isoler les défauts capteurs car chaque observateur est sensible à un défaut capteur. Pour la détection des défauts actionneurs, nous avons constaté que la méthode par multi-observateurs permet une bonne isolation. Cependant, il y a un problème des fausses alarmes durant la période transitoire causé par le temps de convergence de l'observateur.

Nous allons maintenant nous intéresser à la surveillance à base de redondance analytique, pour voir les résultats que nous pouvons obtenir à partir de cette méthode et pouvoir la comparer à l'approche par observateurs.

3.2 Surveillance à base de redondance analytique

3.2.1 Redondance analytique non linéaire

L'approche de l'espace de parité, qui est une méthode de surveillance à base de modèle, repose sur le principe de la redondance analytique. Initialement, elle est conçue spécialement pour des systèmes linéaires. Par la suite, une extension de cette méthode aux systèmes non linéaires a été développée dans des conditions particulières [Leuschen *et al.*, 2005]. Le comportement d'un système non linéaire est difficile à prévoir et à contrôler, ce qui entraîne la réduction de la sécurité et de la fiabilité. C'est pour cela que la détection de pannes est plus importante dans ce cas. Toutefois, les techniques de diagnostic de défauts à base de modèles nécessitent des modèles précis pour être efficaces. Cependant, la redondance analytique linéaire traditionnelle est généralement insatisfaisante pour les systèmes avec des fortes non-linéarités.

Si le système est observable, l'observabilité peut être exprimée en termes de capteurs, d'actionneurs, en plus de l'état et des paramètres du modèle. Cette expression est connue comme étant la matrice dérivée d'observabilité dynamique. La multiplication de cette matrice avec une matrice nulle à gauche, appelée aussi matrice de projection ou matrice de parité, va donner des relations de redondance analytique non linéaires (RRA-NL). Ces relations nous permettent de générer des résidus non linéaires qui sont des indicateurs de défauts. Ces résidus sont proches de zéro si le comportement du système est normal (sans défaut). Quand un défaut se produit, le résidu dévie considérablement de zéro (écart beaucoup plus grand que l'écart causé par les incertitudes du modèle et les bruits de mesures). Dans ce cas, on dit qu'il y a détection. Des seuils doivent être bien choisis, en vue de réduire les problèmes de fausses alarmes et de non détection. Il existe plusieurs méthodes de calcul de seuils dans la littérature.

Dans notre cas, nous supposons que les incertitudes et les bruits de mesures n'ont pas une grande influence sur ce test. Cette méthode peut être appliquée à des modèles linéaires ou non linéaires et seul le calcul de ces relations de redondance analytique est différent. Dans le cas non linéaire, l'algorithme de génération des résidus, avec la méthode de redondance analytique non linéaire, contient les étapes suivantes :

- Déterminer la forme triangulaire d'observabilité non linéaire O et la matrice de parité Ω après vérification de l'observabilité du système.
- Déterminer le vecteur dérivé d'observabilité dynamique O_{DD} .
- Trouver le rang r_j de chaque matrice d'observabilité individuelle pour chaque capteur. Garder $r_j + 1$ lignes dans chaque sous vecteur.
- Calculer les résidus en utilisant l'équation $\Omega O_{DD} = R$.
- Utiliser $N = \sum_{j=1}^m (r_j) + (m - n)$ pour déterminer le nombre de tests (résidus) indépendants qui existe. Supprimer les résidus redondants.

Pour donner tous les détails de ces étapes, considérant tout d'abord le modèle d'état non-linéaire général pouvant représenter un système dynamique.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.5)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur d'entrée, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de sortie, f , g et h sont des fonctions non linéaires aux dimensions appropriées.

Premièrement, la forme triangulaire d'observabilité non linéaire est exprimée par :

$$O = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h + L_g h u \\ L_{ff} h + L_{gf} h u + L_{fg} h u + L_{gg} h u^2 \\ \left\{ \begin{array}{l} L_{fff} h + (L_{gff} h + L_{f_gf} h + L_{ffg} h) u + \\ (L_{ggf} h + L_{gfg} h + L_{f_gg} h + L_{ggg} h) u^2 + \\ (2L_{g_f} h + L_{f_g} h) \dot{u} + 3L_{gg} h u \dot{u} + L_g h \ddot{u} \end{array} \right. \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$L_k h = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h(x)}{\partial x_i} k_i(x)$ est la dérivée de Lie de la fonction scalaire h dans la direction de la fonction vectorielle k .

On utilise la notation suivante pour exprimer les dérivées de Lie successives :

$$L_i(L_j(L_k h)) = L_i L_j L_k h = L_{ijk} h$$

Après avoir calculé l'expression d'observabilité non linéaire, la matrice de parité Ω est déduite à partir de l'équation suivante :

$$\Omega O = [0] \quad (3.7)$$

Ensuite, le vecteur dérivé d'observabilité dynamique O_{DD} est calculé en fonction des entrées et sorties ainsi que leurs dérivées successives. Si nous avons $h(x) = C.x$, comme dans notre cas, O_{DD} est donnée par l'expression suivante :

$$O_{DD} = \begin{bmatrix} y(t) - 0 \\ \dot{y}(t) - 0 \\ \ddot{y}(t) - \sum \dot{u}(t)L_g \\ \frac{d^3}{dt^3}y(t) - \begin{pmatrix} \sum \ddot{u}_i L_{g_i} + \sum \dot{u}_i L_{\dot{x}g_i} + \sum \dot{u}_i L_{g_i f} + \\ \sum \dot{u}_i L_{f g_i} + \sum u_i \sum \dot{u}_j L_{g_i g_j} + \sum \dot{u}_i \sum u_j L_{g_i g_j} \\ \vdots \end{pmatrix} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

(toutes les dérivées de Lie utilisées ici sont pour la fonction $C.x$, d'où $L_g = L_g(C.x) = g.C$).

Les résidus sont obtenus en multipliant la matrice de parité Ω par le vecteur dérivé d'observabilité dynamique O_{DD} .

$$R = \Omega O_{DD} \quad (3.9)$$

Si les rangs des matrices d'observabilité non linéaire individuelle de chaque capteur sont supérieurs ou égaux à ceux des matrices d'observabilité linéaire ($r_j(\text{nonlin}) > r_j(\text{lin})$), la méthode de redondance analytique non linéaire nous assure de générer au moins autant de résidus que la méthode linéaire.

Exemple

Pour illustrer clairement cette méthode, nous allons l'appliquer à un moteur à courant continu. Nous allons reprendre toutes les étapes de calcul des résidus pour les deux cas, linéaire et non linéaire.

Cas d'un modèle linéaire :

soit un modèle linéaire d'un moteur à courant continu représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{r}{L}x_1 - \frac{K}{L}x_2 + \frac{1}{L}u \\ \dot{x}_2 = \frac{K}{J}x_1 - \frac{F}{J}x_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = Ax + Bu \quad (3.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} x = Cx \quad (3.11)$$

$x_1 = i$ est le courant qui alimente le moteur (en Ampère), $x_2 = \omega$ est la vitesse de rotation du moteur (en Rad/s), u est la tension d'entrée (Volt) et y est le vecteur de sortie.

– Matrices d'observabilité individuelle :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_1 A \\ c_1 A^2 \end{bmatrix} \\ C_2 = \begin{bmatrix} c_2 \\ c_2 A \\ c_2 A^2 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

– Matrice d'observabilité globale :

$$O = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

– Matrice de parité :

$$\Omega O = 0 \Rightarrow \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & 0 & 0 & \Omega_{12} & 0 & 1 \\ \Omega_{21} & 1 & 0 & \Omega_{22} & 0 & 0 \\ \Omega_{31} & 0 & 1 & \Omega_{32} & 0 & 0 \\ \Omega_{41} & 0 & 0 & \Omega_{42} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\Omega_{11} = \frac{KLrJ + KL^2F}{L^2J^2}$$

$$\Omega_{12} = \frac{LK^2J - L^2F^2}{L^2J^2}$$

$$\Omega_{21} = \frac{R}{L}, \quad \Omega_{22} = \frac{K}{L}$$

$$\Omega_{31} = \frac{-J^2r^2 + LK^2F}{L^2J^2}$$

$$\Omega_{32} = \frac{-KJ^2r - KJFL}{L^2J^2}$$

$$\Omega_{41} = \frac{-K}{J} \quad \text{et} \quad \Omega_{42} = \frac{F}{J}$$

– Matrice dérivée de chaque capteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} O_{D1} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 - c_1 B u \\ \ddot{y}_2 - c_1 A B u - c_1 B \dot{u} \end{bmatrix} \\ O_{D2} = \begin{bmatrix} y_2 \\ \dot{y}_2 - c_2 B u \\ \ddot{y}_2 - c_2 A B u - c_2 B \dot{u} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

– Matrice dérivée globale :

$$O_{DD} = \begin{bmatrix} O_{D1} \\ O_{D2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 - c_1 B u \\ \ddot{y}_2 - c_1 A B u - c_1 B \dot{u} \\ y_2 \\ \dot{y}_2 \\ \ddot{y}_2 - c_2 A B u \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

– Calcul des résidus :

$$R = \Omega O_{DD} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{r}{L} y_1 + \dot{y}_1 - \frac{1}{L} u + \frac{K}{L} y_2 \\ R_2 = \frac{-J^2 r^2 + L K^2 J}{L^2 J^2} y_1 + \ddot{y}_1 + \frac{r}{L^2} u - \frac{1}{L} \dot{u} + \frac{-K J F L - K J^2 r}{L^2 J^2} y_2 \\ R_3 = -\frac{K}{J} y_1 + \frac{F}{J} y_2 + \dot{y}_2 \\ R_4 = \frac{K L^2 F + K L r J}{L^2 J^2} y_1 - \frac{L^2 F^2 - L K^2 J}{L^2 J^2} y_2 + \ddot{y}_2 - \frac{K}{J L} u \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Cas d'un modèle non linéaire :

Soit le modèle non linéaire d'un moteur à courant continu représenté par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = -\frac{K}{L} i \Omega - \frac{r}{L} i + \frac{1}{L} u \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{K}{J} i^2 - \frac{F}{J} \Omega \end{array} \right. \Rightarrow \dot{x} = f(x) + g(x) u \quad (3.19)$$

Le vecteur de mesures y est donné par :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L}x_1 - \frac{K}{L}x_1x_2 \\ \frac{K}{J}x_1^2 - \frac{F}{J}x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

– **La forme triangulaire de l'observabilité non linéaire**

La forme triangulaire de l'observabilité non linéaire est donnée par l'expression suivante :

$$O = \begin{bmatrix} h \\ L_f h + L_g h u \\ L_{ff} h + L_{gf} h u + L_{fg} h u + L_{gg} h u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ -\frac{R}{L}x_1 - \frac{k}{L}x_1x_2 + \frac{u}{L} \\ -\frac{k^2}{LJ}x_1^3 + \left(\frac{R(R+k)}{L^2} + \frac{kF}{LJ}\right)x_1x_2 + \frac{k(k+R)}{L^2}x_1x_2^2 - \frac{R+k}{L^2}x_2u \\ x_2 \\ \frac{k}{J}x_1^2 - \frac{F}{J}x_2 \\ -\left(\frac{2kR}{JL} + \frac{Fk}{J^2}\right)x_1^2 - \frac{2k^2}{JL}x_1^2x_2 + \frac{F^2}{J^2}x_2 + \frac{2k}{JL}x_1u \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

– **La matrice de parité**

La matrice de parité est la matrice qui multipliée par O donne zéro. Elle est donc obtenue de la manière suivante :

$$\Omega O = [0] \Rightarrow \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Omega_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Omega_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Omega_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\Omega_1 = \frac{(rx_1 + Kx_1x_2 - u)}{Lx_1}$$

$$\Omega_2 = \frac{-K^2x_2^2 - 2Krx_2 - r^2}{L^2} + \frac{K^2x_1^2 - KFx_2}{JL} + \frac{Kx_2u}{L^2x_1} + \frac{ru}{L^2}$$

$$\Omega_3 = -\frac{x_2}{x_1}$$

$$\Omega_4 = -\frac{K}{J}x_1 + \frac{Fx_2}{Jx_1}$$

$$\Omega_5 = \frac{2K^2x_1x_2+2Krx_1-2Ku}{LJ} + \frac{KFx_1-F^2x_2}{J^2}$$

– La forme dérivée de l'observabilité dynamique non linéaire

Cette observabilité dynamique non linéaire est représentée par l'expression O_{DD} donnée par :

$$O_{DD} = \begin{bmatrix} y(t) - 0 \\ \dot{y}(t) - 0 \\ \ddot{y}(t) - \sum \dot{u}L_g \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 - \frac{1}{L}\dot{u} \\ y_2 \\ \dot{y}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

– Calcul des résidus non linéaires

Les résidus non linéaires sont donc obtenus par l'équation suivante :

$$R = \Omega O_{DD} = \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \\ R4 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Les expressions analytiques de ces résidus sont données par :

$$\begin{cases} R1 = \dot{y}_2 - \frac{K}{J}y_1^2 + \frac{F}{J}y_2 \\ R2 = \ddot{y}_2 + \frac{2Kr}{JL}y_1^2 + \frac{2K^2}{JL}y_1^2y_2 - \frac{2K}{JL}y_1u + \frac{FK}{J^2}y_1^2 - \frac{F^2}{J^2}y_2 \\ R3 = \ddot{y}_1 - \frac{R^2}{L^2}y_1 - \frac{2rK}{L^2}y_1y_2 + \frac{r}{L^2}u - \frac{K^2}{L^2}y_1y_2^2 + \frac{K}{L^2}y_2u + \frac{K^2}{LJ}y_1^3 - \frac{KF}{JL}y_1y_2 - \frac{1}{L}\dot{u} \\ R4 = \dot{y}_1 + \frac{r}{L}y_1 + \frac{K}{L}y_1y_2 - \frac{1}{L}u \end{cases} \quad (3.27)$$

Résultats de simulation pour le cas non linéaire

Nous avons réalisé des simulations avec Matlab/Simulink pour montrer l'efficacité de la méthode de redondance analytique non linéaire appliquée au moteur à courant continu.

Trois simulations sont réalisées : La première, un défaut sur l'actionneur a été simulé. Ensuite, sur la deuxième, nous avons simulé un défaut sur le capteur de courant. Enfin, un défaut sur le capteur de vitesse a été introduit. Dans les trois cas, nous avons tracé les quatre résidus pour voir leur réaction par rapport aux trois défauts.

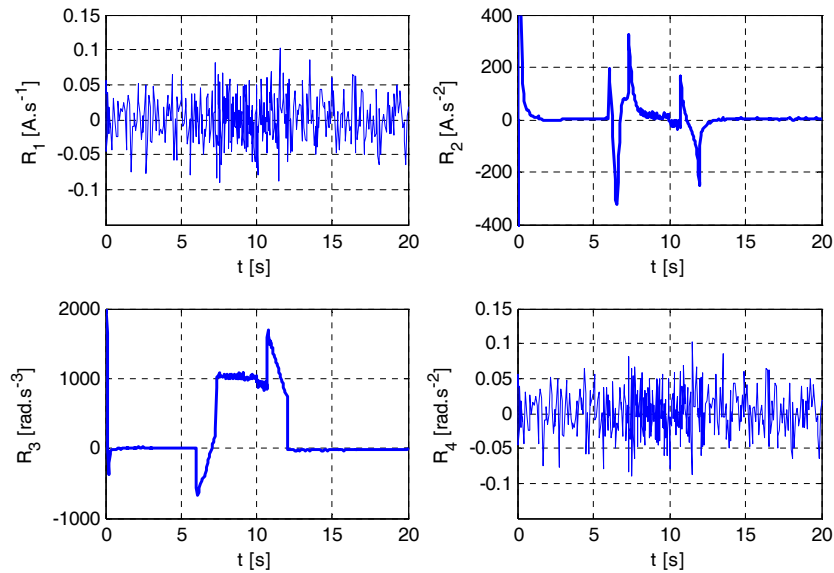


FIG. 3.14 – Réaction des résidus au défaut sur l'actionneur

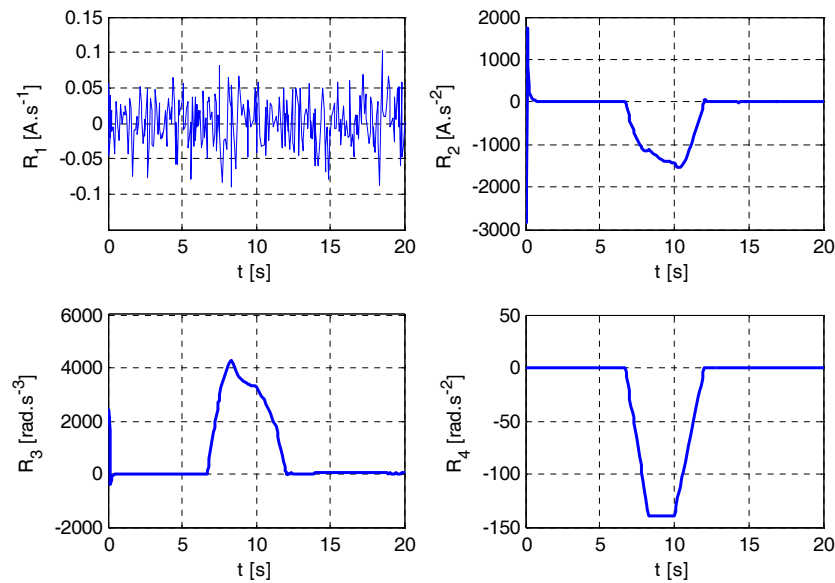


FIG. 3.15 – Réaction des résidus au défaut sur le capteur de courant

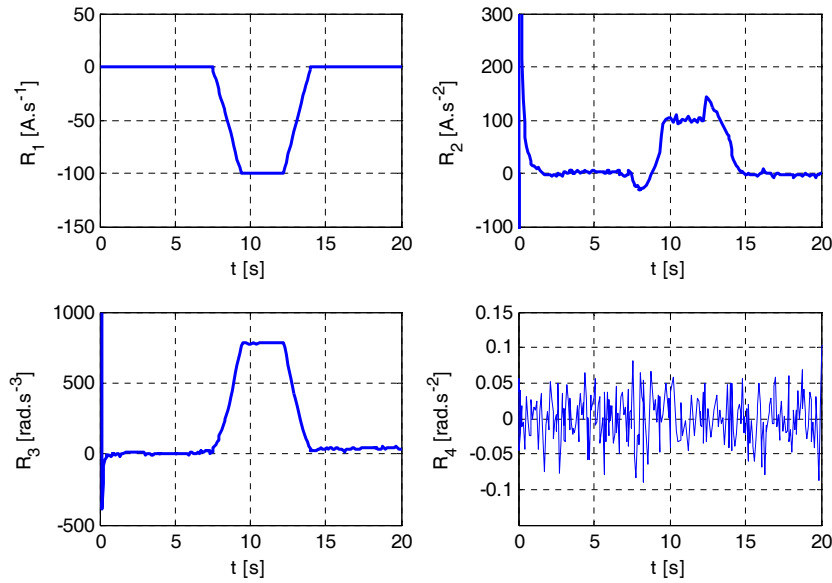


FIG. 3.16 – Réaction des résidus au défaut sur le capteur de vitesse

Les figures 3.14, 3.15 et 3.16 montrent qu'avec les quatre résidus, nous pouvons détecter et isoler tous les défauts. La table de signature 3.2 montre bien cette possibilité d'isolation.

	R_1	R_2	R_3	R_4
u	0	1	1	0
y_1	0	1	1	1
y_2	1	1	1	0

TAB. 3.2 – Table de signature des défauts sur le moteur

3.2.2 Détection de défauts capteurs ou actionneurs du RobuCar

Nous allons, maintenant, appliquer la méthode de redondance analytique non linéaire pour détecter et isoler les défaillances de capteurs et d'actionneurs du véhicule RobuCar [Bouibed *et al.*, 2009c] [Bouibed *et al.*, 2009d].

Pour générer des résidus non linéaires avec la méthode de redondance analytique non linéaire décrite précédemment, nous allons utiliser un modèle simplifié (3.28) du Robucar

pour une raison de simplification. Considérons le modèle du Robucar à 7 états qui s'écrit toujours sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_r = f_r(x_r) + B_r \cdot u_r \\ y_r = C_r \cdot x_r \end{cases} \quad (3.28)$$

$$B_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{j_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{j_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

où $x_r = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ v_x \ v_y \ \Gamma]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T$ est le vecteur d'état,

$u_r = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ est le vecteur d'entrée et y_r est le vecteur des mesures.

Notons que ce modèle n'utilise pas les angles de braquage et que tout l'état est supposé mesuré.

$$f_r(x_r) = \begin{cases} -\frac{f_1}{j_1} x_1 + \frac{RFx_1}{j_1} \\ -\frac{f_2}{j_2} x_2 + \frac{RFx_2}{j_2} \\ -\frac{f_3}{j_3} x_3 + \frac{RFx_3}{j_3} \\ -\frac{f_4}{j_4} x_4 + \frac{RFx_4}{j_4} \\ \frac{Fx_1 + Fx_2 + Fx_3 + Fx_4}{M} - f_x x_5 \\ \frac{Fy_1 + Fy_2 + Fy_3 + Fy_4}{M} - f_y x_6 \\ \frac{a}{I_z} (Fy_1 + Fy_2) - \frac{b}{I_z} (Fy_3 + Fy_4) + \\ \frac{d}{2I_z} (Fx_1 - Fx_2 + Fx_3 - Fx_4) - f_\Gamma x_7 \end{cases},$$

Une autre simplification est faite sur l'expression des forces, on ne prend en compte que les expressions des frottements secs. Ce sont les expressions linéaires par rapport aux glissements, pour les forces longitudinales, et par rapport aux angles de dérive, pour les forces latérales. Leurs expressions deviennent alors :

$$\begin{cases} Fx_i = -\alpha_2 G_i = -\alpha_2 \frac{R\omega_i - v_x}{v_x} \\ Fy_f = -\alpha'_2 \delta_f = \alpha'_2 \frac{v_y + a\Gamma}{v_x} \\ Fy_r = -\alpha'_2 \delta_r = \alpha'_2 \frac{v_y - b\Gamma}{v_x} \end{cases}$$

Génération des résidus non linéaires

La méthode de redondance analytique non linéaire décrite précédemment est utilisée avec le modèle simplifié (3.28) de Robucar pour générer des résidus. Ces derniers sont utilisés pour détecter et isoler les défauts capteurs et actionneurs.

Pour calculer les résidus, nous allons jusqu'au troisième ordre des dérivées de Lie et jusqu'à la troisième dérivée de chaque sortie pour calculer O et O_{DD} . Avec cette méthode, nous obtenons un ensemble de 27 résidus dont l'analyse montre que seuls 11 nous sont utiles pour détecter et isoler les défauts capteurs ou actionneurs. Notons que nous traitons séparément les défauts capteurs et les défauts actionneurs et qu'un seul défaut peut apparaître au même temps.

Les onze résidus retenus sont donnés par les expressions suivantes :

$$R_1 = \dot{y}_1 + \frac{f_1}{j_1} y_1 - \frac{R^2 \alpha_2 y_1}{j_1 y_5} + \frac{R \alpha_2}{j_1} - \frac{u_1}{j_1} \quad (3.29)$$

$$R_2 = \dot{y}_2 + \frac{f_2}{j_2} y_2 - \frac{R^2 \alpha_2 y_2}{j_2 y_5} + \frac{R \alpha_2}{j_2} - \frac{u_2}{j_2} \quad (3.30)$$

$$R_3 = \dot{y}_3 + \frac{f_3}{j_3} y_3 - \frac{R^2 \alpha_2 y_3}{j_3 y_5} + \frac{R \alpha_2}{j_3} - \frac{u_3}{j_3} \quad (3.31)$$

$$R_4 = \dot{y}_4 + \frac{f_4}{j_4} y_4 - \frac{R^2 \alpha_2 y_4}{j_4 y_5} + \frac{R \alpha_2}{j_4} - \frac{u_4}{j_4} \quad (3.32)$$

$$R_5 = \dot{y}_5 - \frac{R \alpha_2}{M} \left(\frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{y_5} \right) + f_x y_5 + \frac{4 \alpha_2}{M} \quad (3.33)$$

$$R_6 = \dot{y}_6 - \frac{4 \alpha_2 y_6}{M y_5} - \frac{2 \alpha_2 a y_7}{M y_5} + \frac{2 \alpha_2 b y_7}{M y_5} + f_y y_6 \quad (3.34)$$

$$R_7 = \dot{y}_7 + \frac{2 \alpha_2 a y_6}{I_z y_5} + \frac{2 \alpha_2 a^2 y_7}{I_z y_5} + \frac{2 \alpha_2 b y_6}{I_z y_5} - \frac{2 \alpha_2 b^2 y_7}{I_z y_5} + \frac{d R \alpha_2 (y_1 - y_2 + y_3 - y_4)}{2 I_z y_5} + f_\Gamma y_7 \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} R_8 = & \ddot{y}_1 - \frac{f_1^2}{j_1^2} y_1 - \frac{2 f_1 R^2 \alpha_2 y_1}{j_1^2 y_5} + \frac{f_1 R \alpha_2}{j_1^2} - \frac{R^4 \alpha_2^2 y_1}{j_1^2 y_5^2} + \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_1^2 y_5} - \frac{4 R^2 \alpha_2^2 y_1}{j_1 M y_5^2} \\ & + \frac{R^3 \alpha_2^2 y_1 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{j_1 M y_5^3} + \frac{R^2 \alpha_2 f_x y_1}{j_1 y_5} + \frac{f_1}{j_1^2} u_1 + \frac{R^2 \alpha_2 u_1}{j_1^2 y_5} - \frac{\dot{u}_1}{j_1} \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$R_9 = \ddot{y}_2 - \frac{f_2^2}{j_1^2} y_2 - \frac{2f_2 R^2 \alpha_2}{j_2^2} \frac{y_2}{y_5} + \frac{f_2 R \alpha_2}{j_2^2} - \frac{R^4 \alpha_2^2}{j_2^2} \frac{y_2}{y_5^2} + \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_2^2 y_5} - \frac{4R^2 \alpha_2^2}{j_2 M} \frac{y_2}{y_5^2} \quad (3.37)$$

$$+ \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_2 M} \frac{y_2 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{y_5^3} + \frac{R^2 \alpha_2 f_x}{j_2} \frac{y_2}{y_5} + \frac{f_2}{j_2^2} u_2 + \frac{R^2 \alpha_2}{j_2^2} \frac{u_2}{y_5} - \frac{\dot{u}_2}{j_2}$$

$$R_{10} = \ddot{y}_3 - \frac{f_3^2}{j_3^2} y_3 - \frac{2f_3 R^2 \alpha_2}{j_3^2} \frac{y_3}{y_5} + \frac{f_3 R \alpha_2}{j_3^2} - \frac{R^4 \alpha_2^2}{j_3^2} \frac{y_3}{y_5^2} + \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_3^2 y_5} - \frac{4R^2 \alpha_2^2}{j_3 M} \frac{y_3}{y_5^2} \quad (3.38)$$

$$+ \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_3 M} \frac{y_3 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{y_5^3} + \frac{R^2 \alpha_2 f_x}{j_3} \frac{y_3}{y_5} + \frac{f_3}{j_3^2} u_3 + \frac{R^2 \alpha_2}{j_3^2} \frac{u_3}{y_5} - \frac{\dot{u}_3}{j_3}$$

$$R_{11} = \ddot{y}_4 - \frac{f_4^2}{j_4^2} y_4 - \frac{2f_4 R^2 \alpha_2}{j_4^2} \frac{y_4}{y_5} + \frac{f_4 R \alpha_2}{j_4^2} - \frac{R^4 \alpha_2^2}{j_4^2} \frac{y_4}{y_5^2} + \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_4^2 y_5} - \frac{4R^2 \alpha_2^2}{j_4 M} \frac{y_4}{y_5^2} \quad (3.39)$$

$$+ \frac{R^3 \alpha_2^2}{j_4 M} \frac{y_4 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{y_5^3} + \frac{R^2 \alpha_2 f_x}{j_4} \frac{y_4}{y_5} + \frac{f_4}{j_4^2} u_4 + \frac{R^2 \alpha_2}{j_4^2} \frac{u_4}{y_5} - \frac{\dot{u}_4}{j_4}$$

Détection des défauts actionneurs

Sur l'ensemble des 11 résidus, examinons ceux qui sont sensibles à des défauts actionneurs. On remarque que pour détecter et isoler un de ces défauts, on utilise un ensemble de huit résidus suivant $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_8, R_9, R_{10}, R_{11}\}$.

Compte tenu de la décentralisation, on remarque que pour chaque défaut actionneur, deux résidus sont sensibles. Ceci peut être illustré par la table de signature suivante :

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}
u_1	1	0	0	0	1	0	0	0
u_2	0	1	0	0	0	1	0	0
u_3	0	0	1	0	0	0	1	0
u_4	0	0	0	1	0	0	0	1

TAB. 3.3 – Table de signature des défauts actionneurs

”1” dans la $i^{\text{ème}}$ ligne et dans la $j^{\text{ème}}$ colonne indique que le résidu j est sensible au défaut de l'actionneur i . La table 3.3 montre bien que nous pouvons détecter et isoler chaque défaut sur les quatre actionneurs.

Détection des défauts capteurs

Dans cette partie, on suppose qu'il ne peut y avoir que des défauts capteurs. Pour détecter et isoler l'un de ces défauts, on utilise un ensemble de sept résidus $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7\}$. Ces résidus peuvent être représentés par la table suivante :

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
y_1	1	0	0	0	1	0	1
y_2	0	0	0	0	1	0	1
y_3	0	0	1	0	1	0	1
y_4	0	0	0	1	1	0	1
y_5	1	1	1	1	1	1	1
y_6	0	0	0	0	0	1	1
y_7	0	0	0	0	0	1	1

TAB. 3.4 – Table de signature des défauts capteurs

La table 3.4 montre que nous pouvons détecter et isoler un défaut qui survient sur l'un des cinq premiers capteurs. Mais on remarque que les deux derniers capteurs ont une même signature de défaut, donc on ne peut pas isoler leurs défauts en utilisant seulement cette table. Néanmoins, il existe des techniques pour palier ce problème. Par exemple en fixant des seuils de détection différents adaptés pour chaque capteur.

3.2.3 Résultats de simulation

Pour montrer l'efficacité de la méthode de redondance analytique non linéaire pour la détection et l'isolation des défauts capteurs ou actionneurs, nous allons donner les résultats obtenus avec quatre simulations différentes, à chaque fois nous simulons un défaut et nous observons la réaction des résidus. La première fois, nous simulons un défaut sur l'actionneur de la roue avant droite u_1 . Ensuite, un défaut sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite est simulé. Dans la troisième simulation, c'est un défaut sur le capteur de vitesse longitudinale. Enfin, nous simulons un défaut sur le capteur de vitesse latérale du véhicule.

Sur les figures ci-dessous, nous montrons que les résidus qui sont sensibles au défaut considéré, les autres restant égaux à zéro.

La figure 3.17 montre la réaction des résidus sur un défaut survenu sur l'actionneur de la roue avant droite à l'instant $t = 10s$.

Les figure 3.19, 3.20 et 3.18 montrent la détection des défauts qui surviennent respecti-

vement sur le capteur de vitesse longitudinale, sur le capteur de vitesse latérale et sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite.

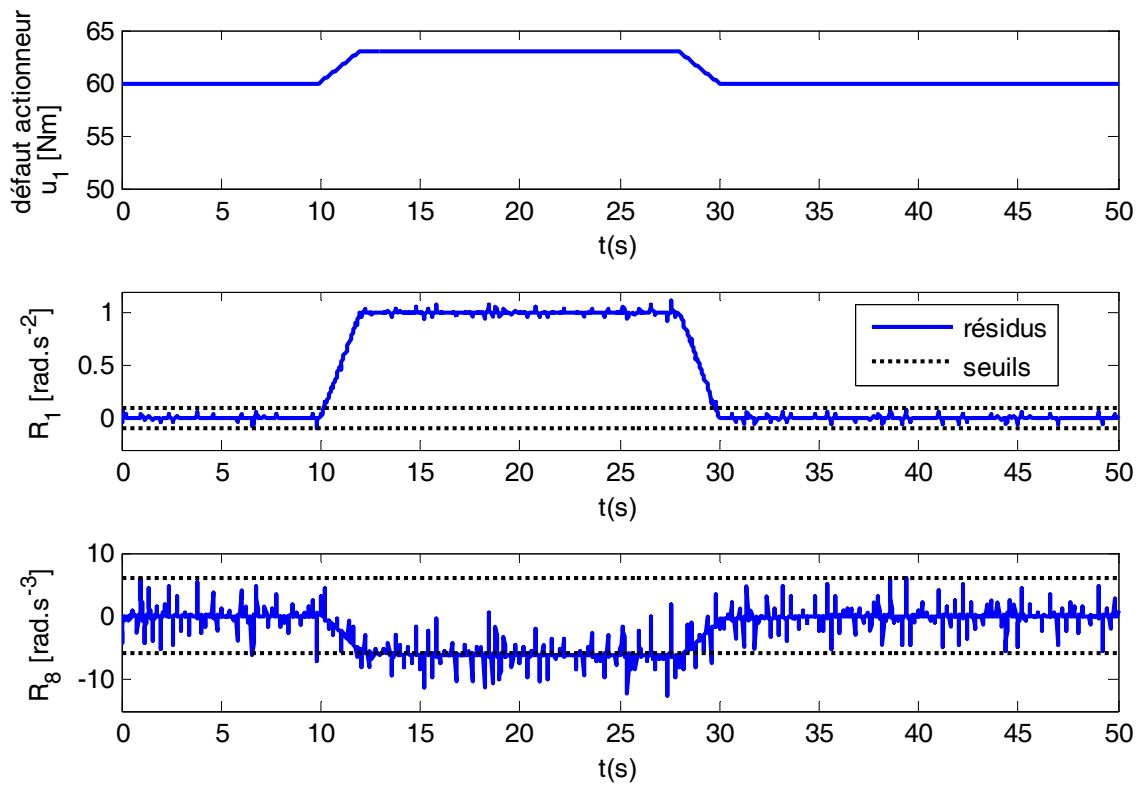


FIG. 3.17 – Détection de défaut sur l'actionneur de la roue avant droite

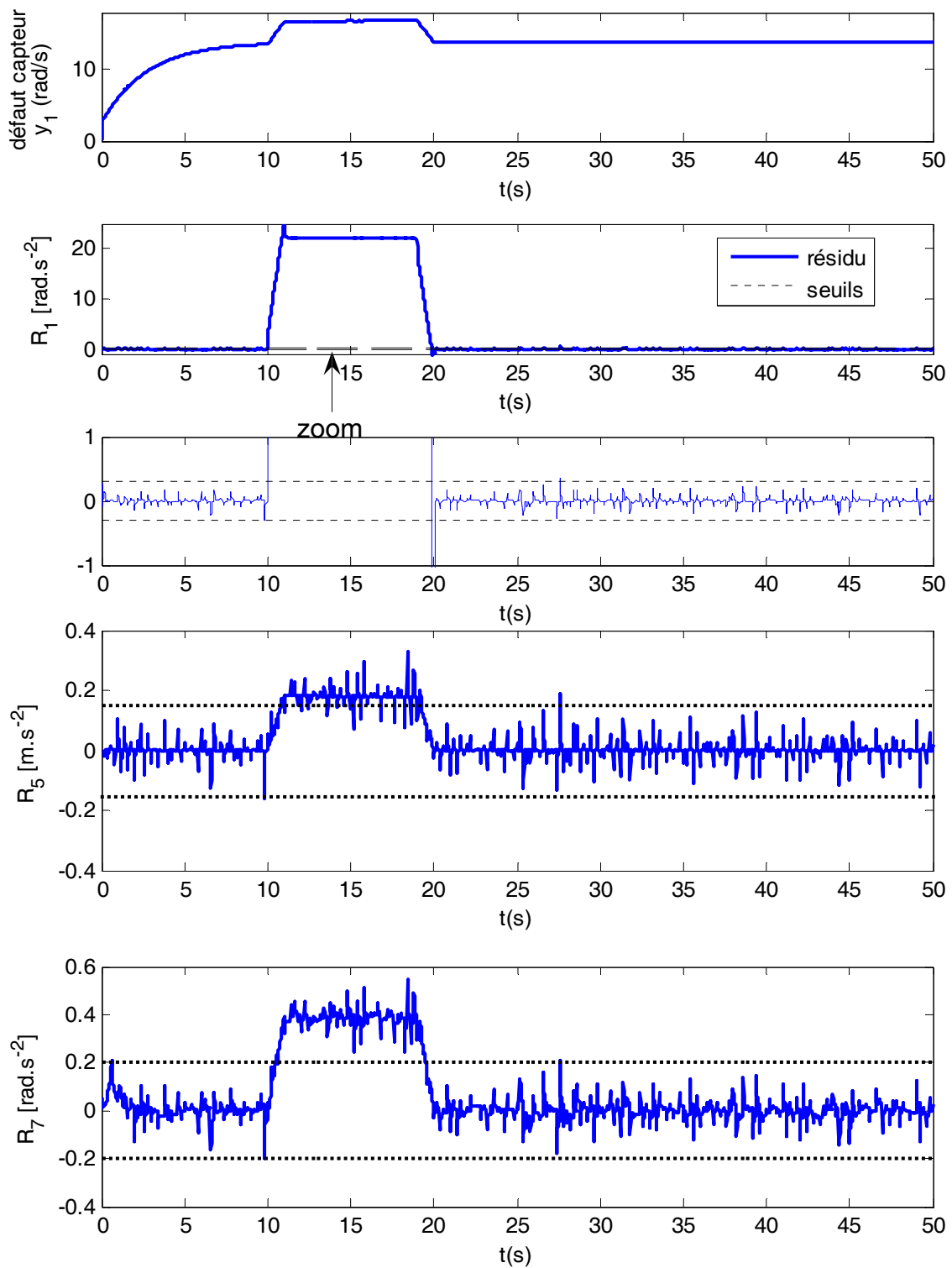


FIG. 3.18 – Détection de défaut sur le capteur de vitesse de rotation de la roue avant droite

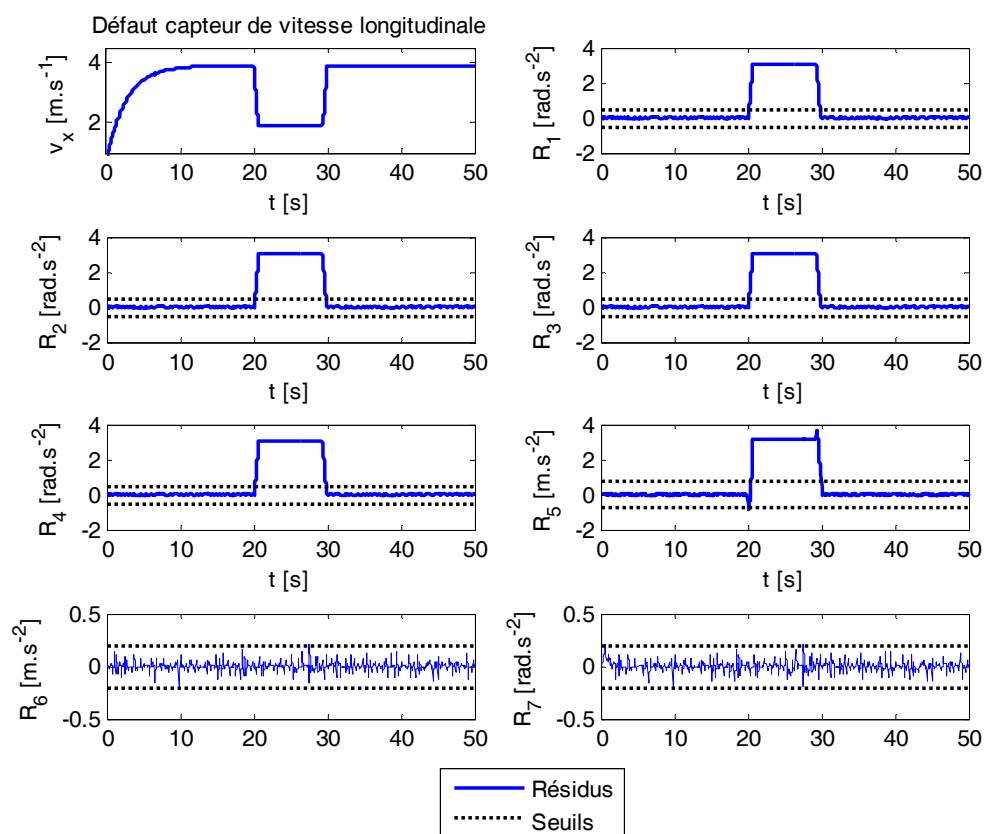


FIG. 3.19 – Détection de défaut sur le capteur de vitesse longitudinale

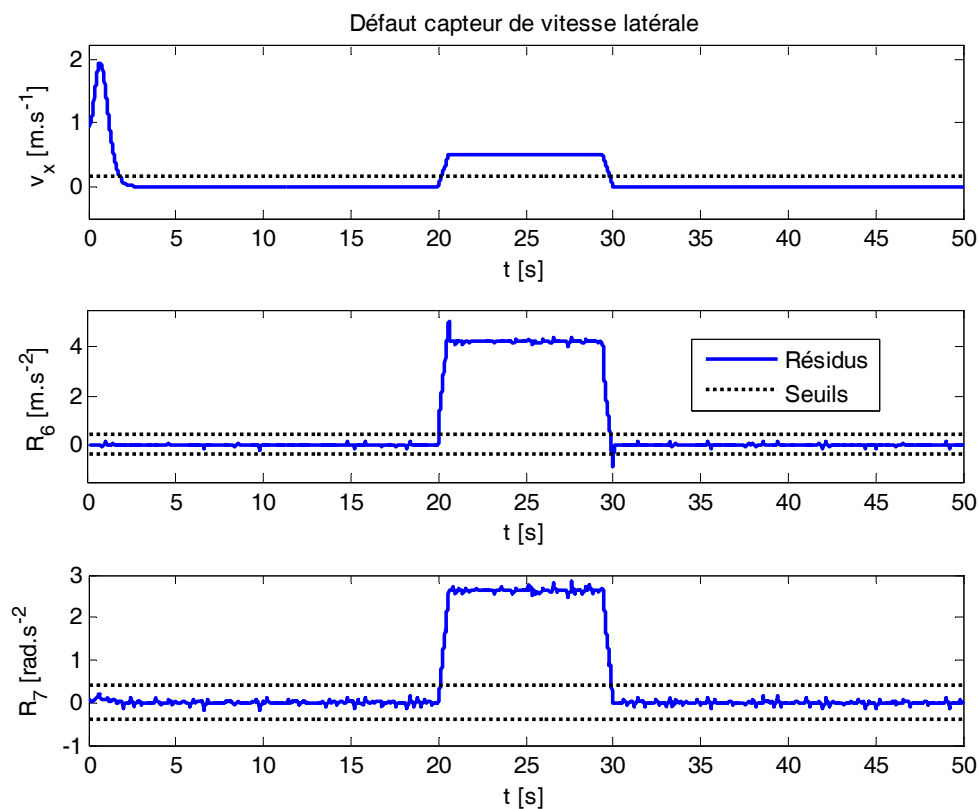


FIG. 3.20 – Détection de défaut sur le capteur de vitesse latérale

Dans la surveillance par relation de redondance analytique non linéaire, nous avons utilisé un modèle simplifié, dans lequel interviennent 7 capteurs et 4 actionneurs. Les hypothèses prises dans cette simplification de modèle sont :

- le vecteur d'état ne contient que les différentes vitesses (vitesses de rotation des roues, vitesses longitudinale et latérale et la vitesse du lacet)
- tous les états sont mesurés
- nous avons pris en considération que la partie frottement sec du modèle des forces de contact

Nous obtenons un ensemble de 11 résidus qui nous permettent de détecter et d'isoler les défauts sur les 4 actionneurs et sur 5 capteurs. La méthode ne permet pas d'isoler entre le défaut du capteur de vitesse latérale et celui de la vitesse du lacet, ces deux défauts ont une même signature théorique comme le montre le tableau 3.4.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre deux méthodes de surveillance à base de modèle ont été développées afin de détecter et d'isoler des défaillances qui surviennent sur les capteurs et sur les actionneurs dans le véhicule électrique RobuCar. La première est à base des observateurs non linéaires à modes glissants et la deuxième est basée sur la génération des relations de redondance analytique non linéaires (espace de parité non linéaire). La technique de multi observateurs est utilisée pour l'isolation des défauts. Des observateurs d'état pour isoler les défauts capteurs et les observateurs à entrées inconnues pour l'isolation des défauts actionneurs. Chaque observateur n'utilise qu'une partie des entrées/sorties et génère un ensemble de résidus qui correspond au nombre de sorties. Chaque ensemble de ces résidus constitue une signature qui est dédiée à un défaut particulier. L'idéal est d'avoir une signature pour chaque défaut d'un actionneur ou d'un capteur pour permettre une meilleure isolation.

Dans la méthode utilisant la génération des relations de redondance analytique non linéaires par la méthode de l'espace de parité, nous avons intégré des observateurs différentiels à modes glissants pour l'estimation des dérivées successives des entrées et des sorties. Les résidus obtenus par cette méthode contiennent des dérivées et les calculer par la dérivation classique amplifie fortement le bruit de mesures.

Les résultats obtenus par l'application, au véhicule électrique RobuCar, de ces deux méthodes nous ont permis de constater que la méthode par observateurs est mieux adaptée pour la détection et l'isolation des défauts capteurs. Tandis que la méthode d'espace de parité est plus performante pour l'isolation des défauts actionneurs. Ceci est dû à la décentralisation des capteurs et à la structure du modèle qui est affine en la commande.

La surveillance d'un véhicule est la première étape pour la mise en oeuvre d'un train de véhicules. En effet, toute panne intervenant sur un des véhicules du convoi entraîne des conséquences plus ou moins importantes sur le fonctionnement du convoi comme nous le verrons au chapitre suivant.

Chapitre 4

Reconfiguration d'un train de RobuCars en présence de défauts

Les systèmes technologiques modernes nécessitent des systèmes de contrôle sophistiqués afin d'accroître les performances ainsi que la sécurité. Le développement des commandes classiques par retour de l'information (état ou sortie), pour des systèmes complexes, donne des performances insatisfaisantes ou de l'instabilité en présence des dysfonctionnements des capteurs, des actionneurs ou des autres composants du système. Pour palier ce genre de problème, de nouvelles techniques sont développées pour tolérer quelques défauts tout en maintenant le système dans un état stable, et avec des performances acceptables. [Blanke *et al.*, 2006] [Yang *et al.*, 2010] [Aitouche et Bouamama, 2010]. Ceci est très important dans le cas des systèmes à risque dont le moindre défaut peut provoquer une catastrophe.

Dans les deux chapitres précédents, nous avons modélisé un train de véhicules, puis nous avons présenté deux méthodes de surveillance d'un véhicule. Ce dernier chapitre est consacré à la reconfiguration d'un train de véhicules lors de l'apparition d'un défaut sur l'un des trois véhicules. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser au fonctionnement normal du convoi. Après avoir développé une méthode de poursuite de trajectoire, nous proposerons deux stratégies pour réaliser un train de trois RobuCars. L'une basée sur le maintien de l'inter-distance fixe en utilisant les différences des vitesses de rotation

des roues entre deux véhicules successifs. Cette méthode nécessite la communication des vitesses de rotation des roues du véhicule de devant à celui qui le suit. L'autre stratégie sera basée sur la poursuite d'une trajectoire de référence connue à l'avance et le maintien d'une distance de sécurité en utilisant les mesures du télémètre laser qui donne l'inter-distance et l'angle d'orientation du véhicule de devant par rapport à son suiveur.

A partir de ce fonctionnement en mode normal du train de véhicules, nous étudierons les différents modes dégradés qui peuvent apparaître compte tenu des différentes pannes qui peuvent se produire sur les véhicules du convoi. Enfin, nous développerons des stratégies de reconfiguration de ce train de véhicules.

4.1 Commande du train de véhicules sans défauts

4.1.1 Rappel du modèle de train de véhicules Robucars

Avant de procéder au développement des stratégies pour la réalisation d'un train de trois RobuCars, nous rappelons les notations utilisées dans la modélisation des trois véhicules.

Le véhicule de tête :

$$\begin{cases} U_0 = [u_{01} \ u_{02} \ u_{03} \ u_{04} \ u_{05} \ u_{06}]^T \\ Y_0 = [y_{01} \ y_{02} \ y_{03} \ y_{04} \ y_{05} \ y_{06} \ y_{07} \ y_{08} \ y_{09}]^T \\ X_0 = [x_{01} \ x_{02} \ x_{03} \ x_{04} \ x_{05} \ x_{06} \ x_{07} \ x_{08} \ x_{09} \ x_{010} \ x_{011} \ x_{012} \ x_{013}]^T \end{cases} \quad (4.1)$$

Le modèle d'état dynamique du leader est le suivant :

$$\begin{cases} \dot{X}_0 = f_0(X_0) + B_0 \cdot U_0 \\ Y_0 = C_0 \cdot X_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Le premier véhicule suiveur :

$$\begin{cases} e_{x1} = d_{x0} - d_{x1} - L \\ \Phi_1 = \Psi_0 - \Psi_1 \end{cases} \quad (4.3)$$

$e_{x1} = x_{114} = y_{110}$ et $\Phi_1 = x_{115} = y_{111}$.

$$\begin{cases} U_1 = [u_{11} \ u_{12} \ u_{13} \ u_{14} \ u_{15} \ u_{16}]^T \\ Y_1 = [y_{11} \ y_{12} \ y_{13} \ y_{14} \ y_{15} \ y_{16} \ y_{17} \ y_{18} \ y_{19} \ y_{110} \ y_{111}]^T \\ X_1 = [x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ x_{17} \ x_{18} \ x_{19} \ x_{110} \ x_{111} \ x_{112} \ x_{113} \ x_{114} \ x_{115}]^T \end{cases} \quad (4.4)$$

Le modèle d'état dynamique du premier suiveur est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1) + B_1.U_1 \\ Y_1 = C_1.X_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$f_1(X_1) = \begin{pmatrix} -\frac{f_1}{J_1}x_{11} + \frac{RFx_{11}}{J_1} + \frac{RFy_{11}x_{110}}{J_1} \\ -\frac{f_2}{J_2}x_{12} + \frac{RFx_{12}}{J_2} + \frac{RFy_{12}x_{110}}{J_2} \\ -\frac{f_3}{J_3}x_{13} + \frac{RFx_{13}}{J_3} + \frac{RFy_{13}x_{112}}{J_3} \\ -\frac{f_4}{J_4}x_{14} + \frac{RFx_{14}}{J_4} + \frac{RFy_{14}x_{112}}{J_4} \\ \frac{Fx_{11}+Fx_{12}+Fx_{13}+Fx_{14}}{M} + \frac{Fy_{11}+Fy_{12}}{M}x_{110} + \frac{Fy_{13}+Fy_{14}}{M}x_{112} - f.x_{15} \\ x_{15} \\ \frac{Fy_{11}+Fy_{12}-Fy_{13}-Fy_{14}}{M} + \frac{Fx_{11}+Fx_{12}}{M}x_{110} - \frac{Fx_{13}+Fx_{14}}{M}x_{112} - f.x_{17} \\ x_{17} \\ -\frac{f_f}{J_f}x_{19} - \frac{k_f}{J_f}x_{110} - \frac{Fx_{11}+Fx_{12}}{J_f}D - \frac{Fy_{11}+Fy_{12}}{J_f}x_{110}D \\ x_{19} \\ -\frac{f_r}{J_r}x_{111} - \frac{k_r}{J_r}x_{112} - \frac{Fx_{13}+Fx_{14}}{J_r}D - \frac{Fy_{14}+Fy_{14}}{J_r}x_{112}D \\ x_{111} \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{I_z}[Fy_{11} + Fy_{12} - (Fx_{11} + Fx_{12})x_{110}] + \\ \frac{b}{I_z}[-Fy_{13} - Fy_{14} + (Fx_{13} + Fx_{14})x_{112}] \\ + \frac{d}{2I_z}(Fx_{11} - Fx_{12} + Fx_{13} - Fx_{14}) - f.x_{113} \end{array} \right\} \\ x_{05} - x_{15} \\ x_{013} - x_{113} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Le deuxième véhicule suiveur :

$$\begin{cases} e_{x2} = d_{x1} - d_{x2} - L \\ \Phi_2 = \Psi_1 - \Psi_2 \end{cases} \quad (4.7)$$

$e_{x2} = x_{214} = y_{210}$ et $\Phi_2 = x_{215} = y_{211}$.

$$\begin{cases} U_2 = [u_{21} \ u_{22} \ u_{23} \ u_{24} \ u_{25} \ u_{26}]^T \\ Y_2 = [y_{21} \ y_{22} \ y_{23} \ y_{24} \ y_{25} \ y_{26} \ y_{27} \ y_{28} \ y_{29} \ y_{210} \ y_{211}]^T \\ X_2 = [x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{24} \ x_{25} \ x_{26} \ x_{27} \ x_{28} \ x_{29} \ x_{210} \ x_{211} \ x_{212} \ x_{213} \ x_{214} \ x_{215}]^T \end{cases} \quad (4.8)$$

Le modèle d'état dynamique du deuxième suiveur est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = f_2(X_2) + B_2.U_2 \\ Y_2 = C_2.X_2 \end{cases} \quad (4.9)$$

4.1.2 Commande longitudinale : basée sur l'inter-distance

Pour réaliser un train de trois véhicules de type RobuCar, nous allons développer une commande longitudinale basée sur la mesure de l'écart inter véhiculaire. Le principe de cette stratégie est de maintenir les écarts entre deux véhicules successifs à des distances de sécurité désirées. Ces écarts sont mesurés par des télémètres laser placés à l'avant des deux véhicules suiveurs. Les deux premiers véhicules sont équipés des bandes réfléchissantes placées à l'arrière de chacun d'entre eux pour mieux mesurer cette inter-distance. Cette distance est constamment mesurée et comparée à une distance de sécurité qu'on souhaite avoir (elle peut être constante ou variable en fonction de la vitesse du véhicule commandé). La technique de modes glissants d'ordre deux est utilisée pour la commande longitudinale. Dans ce cas l'algorithme ne sera pas appliqué directement sur la commande u mais sur sa dérivée \dot{u} . Cette méthode est adaptée pour les systèmes non linéaires et permet une réduction considérable du phénomène de réticence (*chattering*). En plus, la commande par modes glissants est robuste aux bruits de mesures ce qui est très important pour l'expérimentation sachant que plusieurs capteurs sont nécessaires pour réaliser la commande longitudinale.

On note par e_{xi} ($i = \{1, 2\}$) l'écart mesuré par le télémètre laser et qui sépare le véhicule i avec celui qui le précède. Cet écart est visible sur la figure 4.1.

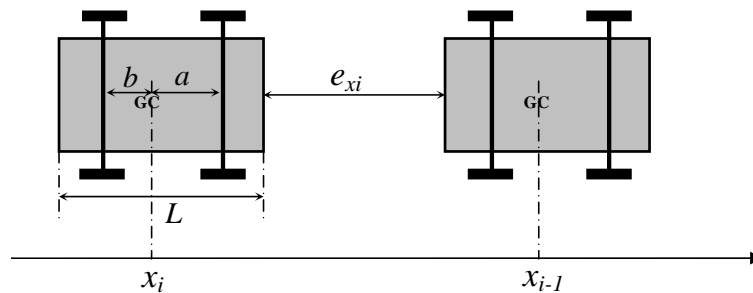


FIG. 4.1 – La distance inter-véhiculaire

Selon la figure ci-dessous, l'écart mesuré par le télémètre laser est donné par :

$$e_{xi} = dx_{i-1} - dx_i - L \quad (4.10)$$

où dx_i et dx_{i-1} sont respectivement les positions longitudinales du $i^{\text{ème}}$ et du $(i-1)^{\text{ème}}$ véhicule et L est la longueur totale de chaque véhicule.

Posons maintenant e_{di} la distance de sécurité désirée entre le $i^{\text{ème}}$ et le $(i-1)^{\text{ème}}$ véhicule qui est donnée par l'expression suivante :

$$e_{di} = d_s + \tau v_{xi} \quad (4.11)$$

où d_s est une constante et représente la distance entre deux véhicules successifs à l'arrêt, τ est un coefficient positif fixé par l'opérateur et correspond au temps de réaction d'un conducteur et v_{xi} la vitesse longitudinale du véhicule i .

Nous choisirons la surface de glissement S_i comme la différence entre la distance de sécurité désirée e_{di} et l'écart mesuré par le télémètre laser e_{xi} . Cette surface est alors exprimée par l'équation suivante :

$$S_i = e_{di} - e_{xi} \quad (4.12)$$

En remplaçant e_{di} par sa valeur donnée dans (4.11), nous aurons

$$S_i = (d_s + \tau v_{xi}) - e_{xi} \quad (4.13)$$

Les entrées de commande appliquées aux quatre roues pour le système du véhicule sont les couples moteurs, mais pour des raisons de simplification, il est préférable d'utiliser les accélérations de rotations des roues ($\omega_{ij} = \dot{x}_{ij}$) comme entrées car elles sont faciles à mesurer. Pour contrôler le $i^{\text{ème}}$ véhicule suiveur en fonction de la vitesse du leader, les entrées de commandes désirées appliquées aux quatre roues sont données par :

$$\begin{cases} u_{i1}^* = \dot{x}_{i1} = -\frac{f_1}{J_1}x_{i1} + \frac{RFx_{i1}}{J_1} + \frac{RFy_{i1}x_{i10}}{J_1} + \frac{1}{J_1}u_{i1} \\ u_{i2}^* = \dot{x}_{i2} = -\frac{f_2}{J_2}x_{i2} + \frac{RFx_{i2}}{J_2} + \frac{RFy_{i2}x_{i10}}{J_2} + \frac{1}{J_2}u_{i2} \\ u_{i3}^* = \dot{x}_{i3} = -\frac{f_3}{J_3}x_{i3} + \frac{RFx_{i3}}{J_3} + \frac{RFy_{i3}x_{i12}}{J_3} + \frac{1}{J_3}u_{i3} \\ u_{i4}^* = \dot{x}_{i4} = -\frac{f_4}{J_4}x_{i4} + \frac{RFx_{i4}}{J_4} + \frac{RFy_{i4}x_{i12}}{J_4} + \frac{1}{J_4}u_{i4} \end{cases} \quad (4.14)$$

Pour appliquer cette commande, nous allons poser les hypothèses suivantes :

– Les quatre roues roulent à une même vitesse de rotation :

$$\omega_{i1} = \omega_{i2} = \omega_{i3} = \omega_{i4} = \omega_i \quad (4.15)$$

et

$$v_{xi} = \frac{R(\omega_{i1} + \omega_{i2} + \omega_{i3} + \omega_{i4})}{4} = R\omega_i \quad (4.16)$$

L'algorithme de Twisting [Levant, 1993] est appliqué aux véhicules suiveurs afin de réaliser un suivi longitudinal automatique du véhicule de tête. Cet algorithme est donné par :

$$\dot{u}_i^* = \begin{cases} -u_i^* & \text{si } |u_i^*| > |u_{i_eq}| \\ -K_{im} \text{sign}(S_i) & \text{si } S_i \dot{S}_i > 0 \text{ et } |u_i^*| \leq |u_{i_eq}| \\ -k_{im} \text{sign}(S_i) & \text{si } S_i \dot{S}_i \leq 0 \text{ et } |u_i^*| \leq |u_{i_eq}| \end{cases} \quad (4.17)$$

où u_{i_eq} est la commande équivalente déterminée par la résolution de l'équation $\dot{S}_i = 0$. Les gains K_{im} et k_{im} sont déterminés pour satisfaire les conditions d'application de l'algorithme de Twisting qui est l'algorithme à modes glissants d'ordre deux qui converge en un temps fini. Ces conditions sont données par :

$$\begin{cases} K_{im} > k_{im} > 0 \\ k_{im} > 4 \frac{C_{im}}{s_{i0}} \\ k_{im} > \frac{C_{i0}}{c_{im}} \\ K_{im} > \frac{C_{im} k_{im}}{c_{im}} + \frac{2C_{i0}}{c_{im}} \end{cases} \quad (4.18)$$

Les constantes C_{im} , c_{im} , C_{i0} et s_{i0} sont définies par les quatre hypothèses de travail nécessaires à l'application de l'algorithme à mode glissant pour un système non linéaire en général. Ces hypothèses sont décrites ci-dessous.

Hypothèses de travail

Pour un système non linéaire général qui s'écrit sous la forme

$$\dot{X} = f(X, t, u) \quad (4.19)$$

nous posons les quatre hypothèses suivantes [Nouvelière, 2002] :

1. L'entrée de commande est telle que $|u| \leq U_{max}$, où U_{max} est une constante réelle positive, telle que u soit une fonction bornée et discontinue du temps. Par ailleurs, l'équation (4.19) est supposée admettre des solutions, au sens de Filippov, sur la variété glissante d'ordre deux $S = \dot{S} = 0$ pour tout t . On pose : $U = \{u : |u| \leq U_{max}\}$.
2. Il existe $u_1 \in [0, U_{max}]$ telle que, pour toute fonction continue $u(t)$ avec $u(t) > u_1$, il existe t_1 tel que $S(x, t)u(t) > 0$ pour tout $t > t_1$.
3. Il existe des constantes s_0 , c_m et C_m telles que, pour tout $(X, t) \in \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}$ avec $|S(X, t)| < s_0$, nous ayons :

$$0 < c_m \leq \frac{\partial \dot{S}}{\partial u} \leq C_m \quad (4.20)$$

L'ensemble $(X, t : |S(X, t)| < s_0)$ est appelé région de linéarité.

4. Il existe une constante C_0 telle que, à l'intérieur de la région de linéarité, on ait :

$$|L_u L_u S(X, t)| < C_0 \quad (4.21)$$

où $L_u S(X, t) = \frac{\partial S(X, t)}{\partial t} + \frac{\partial S(X, t)}{\partial X} f(X, t, u)$

Détermination de u_{i_eq} :

Pour déterminer la commande équivalente u_{i_eq} , nous allons résoudre l'équation $\dot{S}_i = 0$.

$$\dot{S}_i = 0 \Rightarrow \tau \dot{v}_{xi} - \dot{e}_{xi} = 0 \quad (4.22)$$

En utilisant (4.15) et (4.16) nous obtenons :

$$\tau R u_i^* - \dot{e}_{xi} = 0 \quad (4.23)$$

d'où

$$u_{i_eq}^* = \frac{\dot{e}_{xi}}{\tau R} \quad (4.24)$$

4.1.3 Commande latérale : basée sur une trajectoire de référence

Après avoir développé une commande pour maintenir les écarts entre les véhicules à des distances de sécurité, nous allons réaliser un suivi de trajectoire de référence qu'on

impose pour tous les véhicules. Ceci nous permettra d'obtenir un train de véhicules qui suit un parcours désiré tout en gardant des inter-distances convenables. La stratégie de cette méthode est la génération d'une trajectoire de référence qu'on souhaite imposer aux véhicules sous forme d'une expression de la position latérale d_y de chaque véhicule en fonction de la position longitudinale d_x qu'on récupère du capteur GPS. Ainsi la trajectoire est calculée en temps réel indépendamment du temps est de la vitesse du véhicule. L'avantage de cette méthode est que ça permet aux véhicules suiveurs d'éviter les coupures de virages qui est le problème des méthodes de régulation de l'écart latéral entre le leader et le suiveur.

La génération d'une trajectoire de référence a été utilisée dans [Dumont, 2006] dans le cas d'un seul véhicule et nous allons l'étendre au train de véhicules dans notre cas. Pour que chaque véhicule suive cette trajectoire, nous utilisons une commande de braquage en considérant comme erreur la différence entre la position latérale désirée $d_{y_{des}}$ qui est donnée par le générateur de trajectoire et la position latérale d_y issue du capteur GPS du véhicule.

Les deux figures 4.2 et 4.3 montrent les deux schémas de simulation des véhicules leader et suiveur avec la génération de la trajectoire de référence et la commande de l'inter-distance ainsi que le braquage avant.

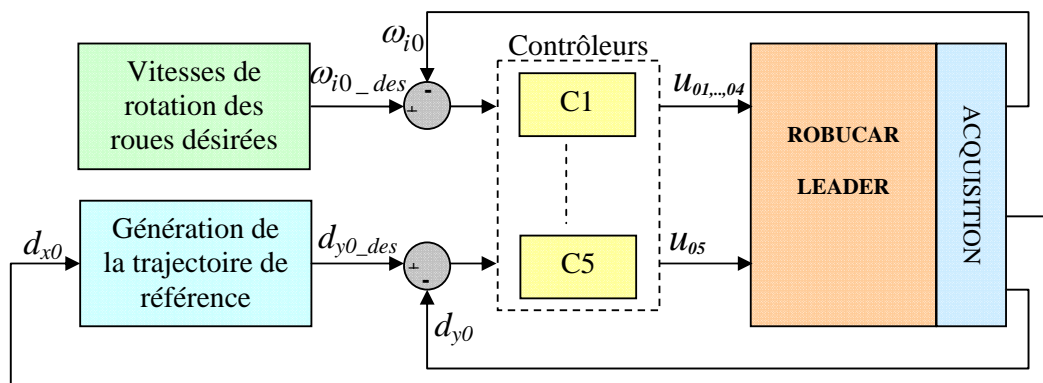


FIG. 4.2 – Commande du véhicule leader avec trajectoire de référence en fonctionnement normal

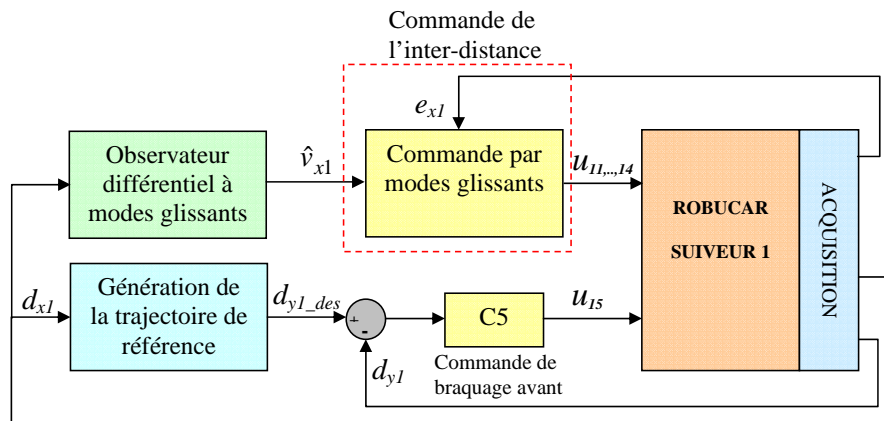


FIG. 4.3 – Commande du véhicule suiveur avec trajectoire de référence en fonctionnement normal

4.2 Reconfiguration d'un train de véhicules

4.2.1 Surveillance du train de véhicules

La modélisation d'un train de véhicules fait apparaître des équations relatives à chacun des véhicules, et des relations liant les véhicules. L'application des méthodes de surveillance sur ce modèle conduirait à mettre en place un système centralisé de surveillance alimenté par l'ensemble des informations des capteurs de chaque véhicule, de manière à détecter et isoler les défauts. Cette solution n'est naturellement pas envisageable, la surveillance ne peut être que distribuée. Chaque véhicule ayant son propre système de surveillance. Ainsi dans chaque véhicule, nous implantons une des méthodes de surveillance développées dans le troisième chapitre. Il serait intéressant de compléter le modèle de chaque véhicule avec les équations de vitesse le liant aux autres ((4.3)), mais ceci nécessiterait de développer une communication bidirectionnelle entre les véhicules, ce cas n'a pas été développé dans le cadre de la thèse.

Les méthodes de surveillance développées au chapitre précédent, nous permettent de détecter un défaut sur un véhicule, et selon la nature du défaut de reconfigurer le véhicule pour qu'il poursuive sa trajectoire. Dans certains cas, la reconfiguration ne sera pas possible et la panne pourra conduire à un arrêt du véhicule. Nous distinguons les trois cas

suivants :

Cas A : Défaut pour lequel la commande est tolérante et donc pour lequel il n'y a pas d'impact sur la trajectoire et la vitesse du véhicule. Cette situation est illustrée par quelques cas de défaillances capteurs et actionneurs.

Cas B : Défaut qui conduit à une altération de la vitesse d'un véhicule ou une faible perturbation de la trajectoire. Cette situation est illustrée par deux cas de défaillances : une défaillance du capteur de position et une défaillance d'un moteur de traction.

Cas C : Défaut qui ne permet plus de poursuivre la mission, arrêt du véhicule ou blocage d'actionneur rendant impossible de suivre la trajectoire.

En dehors du fonctionnement normal, chaque véhicule peut se trouver dans un de ces trois cas.

Le tableau 4.1 résume les différentes situations de défaillance dans lesquelles le train de véhicules peut se trouver et les différentes stratégies de reconfiguration qui sont possibles. V_1 , V_2 et V_3 représentent les trois véhicules. "N" signifie que le véhicule est en fonctionnement normal (sans défauts).

Les situations colorées sur le tableau ne sont pas traitées dans ce travail.

V_1	V_2	V_3	Stratégie
N	N	N	Commande du train en fonctionnement normal
Cas A	N	N	Multi-observateurs pour un défaut capteur et commutation de la commande pour un défaut actionneur
N	Cas A	N	
N	N	Cas A	
Cas B	N	N	Reconfigurer le leader et adapter la commande des suiveurs
N	Cas B	N	Adapter la commande des véhicules, nécessite la communication entre les véhicules
N	N	Cas B	
Cas C	N	N	Reconstruction d'un nouveau train et nécessite de nouvelles commandes
N	Cas C	N	
N	N	Cas C	Abandon du V_3 et constitution du train avec V_1 et V_2

TAB. 4.1 – Différentes situations de défaut dans le train de véhicules

Pour la situation qui nécessite une communication entre les véhicules, nous traitons

que l'aspect reconfiguratuion et pas l'aspect communication.

En cas de panne importante conduisant à l'arrêt du véhicule, la stratégie mise en place devrait permettre l'abandon du véhicule défaillant et la reconstruction d'un train de véhicules avec les véhicules restants. Cette stratégie nécessite la génération de nouvelles commandes pour modifier la constitution du train de véhicules, nous n'abordons pas ce sujet dans les travaux présentés.

Nous traitons quelques scénarios de l'apparition de défauts avec la reconfiguration appropriée. Nous considérons quelques défauts capteurs et actionneurs les plus pertinents et nous choisirons la stratégie de reconfiguration adaptée pour chaque défaut. L'idée est de choisir les commandes à appliquer pour chaque situation en fonction du type de défaut détecté par le module de surveillance. L'objectif est de permettre au train de véhicules de poursuivre son parcours même en présence d'une panne (mode dégradé), si ceci est possible. Les situations pour lesquelles nous développons des stratégies de reconfiguration sont les suivantes :

- Défaut capteur dont le système reste observable (cas A)
- Panne du système de direction avant (cas A)
- Panne de l'un des moteurs de traction (cas A)
- Défaut sur le capteur GPS du véhicule suiveur (cas B)

4.2.2 Défaut capteur dont le système reste observable

L'étude de l'observabilité du système de véhicule électrique RobuCar, effectuée lors de la thèse précédente [Dumont, 2006], montre que le système reste observable si on perd l'un des capteurs sauf si on perd l'une des positions longitudinale et latérale (perte des données GPS). Alors, dans ce cas, nous considérons les défaillances des autres capteurs et nous utilisons la méthode de multi-observateurs développée dans le chapitre précédent pour la reconfiguration. Le principe est que lorsqu'un capteur est défaillant, le bloc de surveillance permet de localiser ce défaut et envoie une information à un commutateur. Ce dernier sélectionne la bonne sortie d'un observateur qui n'utilise pas le capteur défaillant dans son estimation. Les estimations de cet observateur sont alors utilisées par le bloc de

commande.

Cette méthode de reconfiguration est illustrée par la figure 4.4

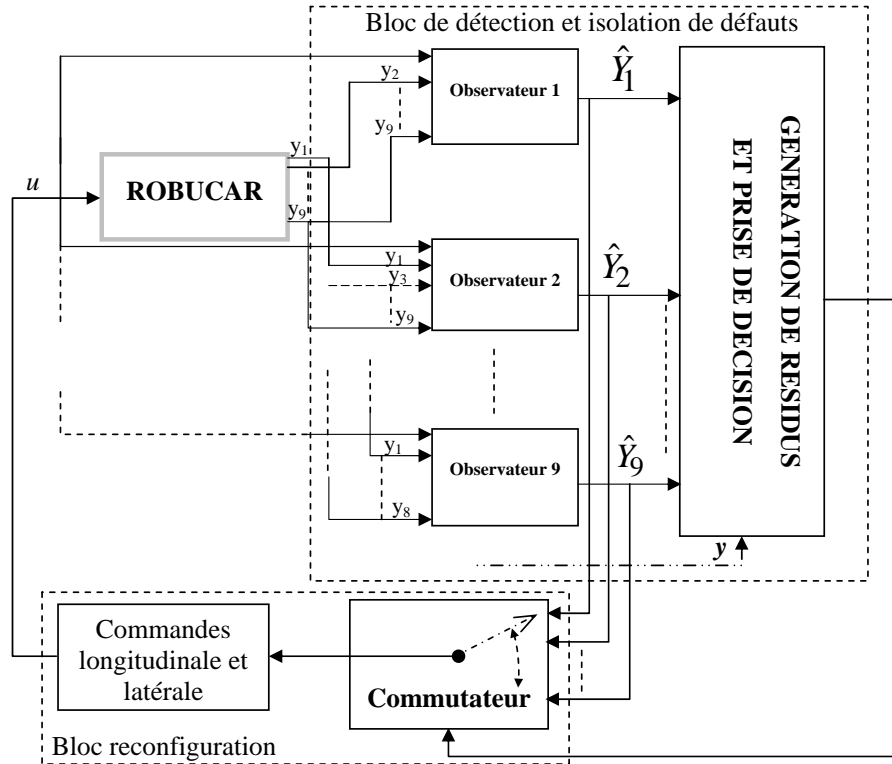


FIG. 4.4 – La reconfiguration par des multi-observateurs

où \hat{Y}_i représente le vecteur de sortie estimé par le i^{em} observateur.

Cette méthode de reconfiguration utilise une commutation pour sélectionner l'observateur qui n'est pas affecté par le défaut. Ces commutations génèrent des régimes transitoires dont nous n'avons pas étudié la stabilité. On considère que la commande et le système restent stables après la commutation.

4.2.3 Panne du système de direction avant

Quand le système de direction avant de l'un des véhicules tombe en panne, nous utilisons le système de direction arrière pour effectuer des braquages. En fonctionnement normal, les véhicules utilisent le système de direction des roues avant. Quand un défaut de cet actionneur est détecté par le bloc de surveillance, une information est envoyée à un commutateur placé devant la commande de braquage. Ainsi ce commutateur change de

position pour choisir d'envoyer la commande vers le système de braquage arrière.

4.2.4 Panne de l'un des moteurs de traction

Dans ce cas, nous allons faire en sorte que la traction soit assurée par les deux moteurs de traction des roues arrière (ou avant). Pour le faire, nous utilisons la même stratégie que pour la panne du système de direction. Le commutateur, dans ce cas, est placé devant la commande longitudinale. Lorsqu'un défaut est détecté sur l'un des moteurs avant, le commutateur envoie les commandes seulement pour les moteurs arrière. Lorsque le défaut est sur l'un des moteurs arrière, les commandes sont envoyées pour les moteurs des roues avant.

4.2.5 Défaut sur le capteur GPS du véhicule suiveur

En fonctionnement normal, comme nous l'avons précisé précédemment, tous les véhicules sont commandés en braquage en utilisant la génération d'une trajectoire de référence en récupérant les coordonnées GPS du véhicule commandé. L'erreur entre les deux positions latérales désirée et mesurée est utilisée par la commande de braquage avant. En cas d'une panne, détectée par le module de surveillance, sur le GPS de l'un des véhicules suiveurs, la génération de la trajectoire de référence n'est plus valable. La stratégie dans ce cas est que le module de reconfiguration fasse basculer la commande latérale vers la commande basée sur la mesure de l'angle d'orientation, mesuré par le télémètre laser, entre le véhicule commandé et celui de devant. Le braquage sera commandé dans ce cas en fonction de cet angle qu'on doit ramener vers zéro.

Une autre stratégie de reconfiguration est possible en cas d'une panne sur le GPS. Elle est basée sur l'utilisation de la communication entre les véhicules. Dans ce cas, pour réaliser le train de véhicules, le suiveur utilise les mesures de vitesses de rotation des roues du véhicule qui le précède. L'objectif de la commande est de maintenir à zéro les différences entre les vitesses de rotation des roues du leader et celles de son suiveur ($\omega_{ij_l} - \omega_{ij_s} = 0$). Par conséquent, la distance entre les deux véhicules restera constante et égale à la distance initiale. Dans ce cas, pour tourner, le véhicule leader doit utiliser la différence entre les vitesses de rotations des roues gauche et celles des roues droite, le véhicule suiveur utilisera

la même chose automatiquement. Si le leader utilise le système de direction pour réaliser des braquages, une commande de braquage pour le suiveur est nécessaire en utilisant la différence entre les deux angles de braquage, celle du leader et celle du suiveur.

L'inconvénient de ses deux stratégies est que le véhicule suiveur coupe les virages car la commande réagit au même temps que le leader tourne. Il faut donc choisir des distances entre les véhicules les plus faibles possible pour minimiser cet inconvénient.

Description de la commande

Nous supposons que maintenir l'écart constant entre deux véhicules successifs correspond au maintien de l'écart entre le centre de la $j^{\text{ème}}$ roue du véhicule $i^{\text{ème}}$ et celui de son homologue du $(i - 1)^{\text{ème}}$ véhicule. Cet écart sera défini par ew_i . Ceci veut donc dire que les différences entre les vitesses de rotation seront maintenues à zéro. On peut l'exprimer avec l'expression suivante :

$$e_{xi} = C_1 \Rightarrow ew_i = C_2 \Rightarrow R\omega_{(i-1)j} - R\omega_{ij} = 0 \quad (4.25)$$

où C_1 et C_2 sont des constantes quelconques.

$i = 1, 2, 3$: nombre de véhicules.

$j = 1, 2, 3, 4$: nombre de roues.

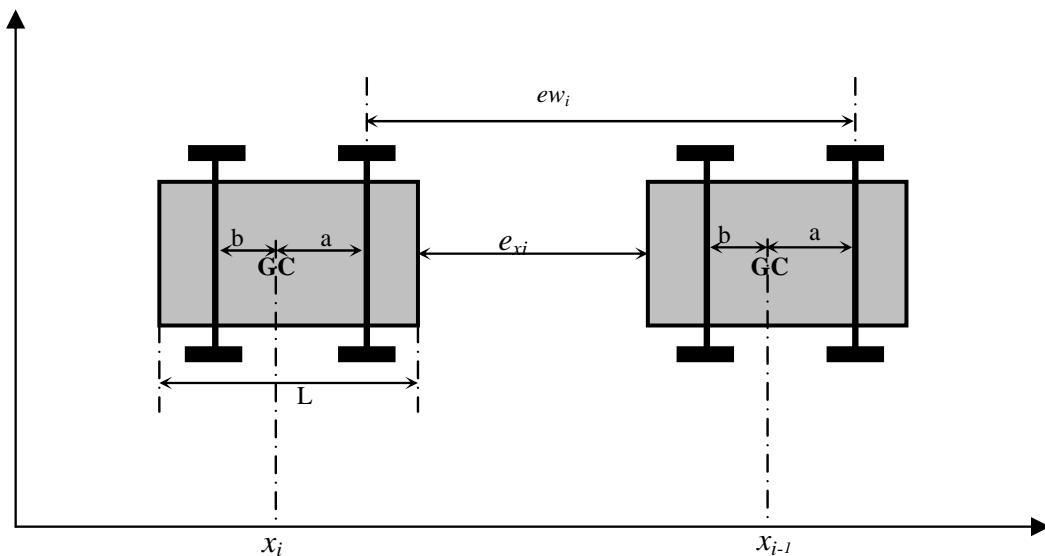


FIG. 4.5 – La distance entre les roue ew_i

De l'équation (4.25), nous pouvons déduire :

$$\omega_{(i-1)j} - \omega_{ij} = 0 \quad (4.26)$$

Les entrées des systèmes de traction sont les couples moteur T_{ij} , mais en raison de simplification il est préférable de prendre comme entrées les accélérations de rotation des roues qui sont facile à mesurer. Dans ce cas, pour contrôler le véhicule suiveur suivant le profil de vitesse du leader, nous choisissons l'entrée de chaque roue de véhicule comme suit :

$$u_{ij}^* = \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{J_{ij}} [-f_{ij}\omega_{ij} + R_i F x_{ij} + T_{ij}] \quad (4.27)$$

où $\dot{\omega}_{ij}$ est l'accélération angulaire de la roue j du véhicule i .

La surface de glissement choisie pour la commande de la roue j du véhicule suiveur i est de la forme suivante :

$$S_{ij} = \omega_{(i-1)j} - \omega_{ij} \quad (4.28)$$

La commande appliquée à la roue j du véhicule i apparaît à la première dérivée de la surface de glissement S_{ij} . Donc le système est de degré relatif 1. L'algorithme de Twisting à mode glissant sera donc appliqué pour réaliser un suivi de véhicules autonomes. Cet algorithme est celui donné dans (4.29) que nous rappelons ci-dessous.

$$\dot{u}_{ij}^* = \begin{cases} -u_{ij}^* & \text{si } |u_{ij}^*| > |u_{ij-eq}| \\ -K_{ijm} \text{sign}(S_{ij}) & \text{si } S_{ij}\dot{S}_{ij} > 0 \text{ et } |u_{ij}^*| \leq |u_{ij-eq}| \\ -k_{ijm} \text{sign}(S_{ij}) & \text{si } S_{ij}\dot{S}_{ij} \leq 0 \text{ et } |u_{ij}^*| \leq |u_{ij-eq}| \end{cases} \quad (4.29)$$

Les gains de l'algorithme sont choisis de la même façon en respectant les conditions (4.18).

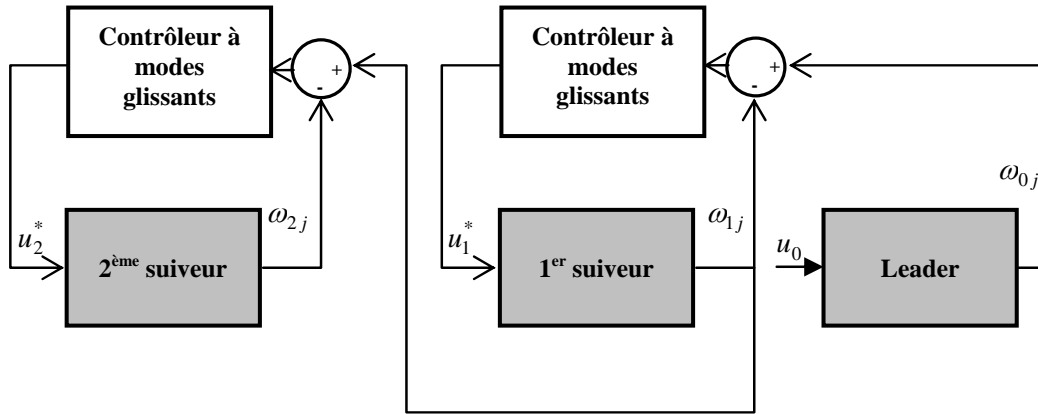


FIG. 4.6 – Commande par mode glissant du train de trois véhicules en fonction des différences de vitesses de rotation des roues

où

$$u_0 = [u_{01} \ u_{02} \ u_{03} \ u_{04}]^T$$

$$u_1^* = [u_{11}^* \ u_{12}^* \ u_{13}^* \ u_{14}^*]^T$$

$$u_2^* = [u_{21}^* \ u_{22}^* \ u_{23}^* \ u_{24}^*]^T$$

4.3 Résultats des Simulations

Dans cette partie, nous allons donner les résultats obtenus par la simulation des différents algorithmes présentés précédemment en utilisant Matlab/Simulink. Dans un premier temps, nous allons simuler un train de trois véhicules RobuCar en fonctionnement normal avec la génération d'une trajectoire de référence pour chaque véhicule, la commande des angles de braquage avant et le maintien des écarts entre les véhicules à des distances de sécurité désirées. Ensuite, nous allons simuler un défaut sur le système de direction avant du véhicule de tête. Dans ce cas, le système de reconfiguration fait basculer automatiquement la commande latérale vers la commande de braquage arrière.

4.3.1 Poursuite de trajectoire de référence en absence de défaut

Au fonctionnement normal, la trajectoire de référence est suivie par tous les véhicules avec la commande de braquage avant et les distances de sécurité sont maintenues par les

commandes par modes glissants en récupérant les distances mesurées par les télémètres laser.

La figure 4.7 montre la trajectoire de référence et les trajectoires des trois véhicules. On remarque que cette trajectoire de référence est bien suivie par les trois véhicules et que les distances de sécurité entre les véhicules sont respectées comme le montre la figure 4.8. Initialement les véhicules sont placés à un mètre l'un derrière l'autre et après un petit instant transitoire, nécessaire pour la stabilisation de la commande, les inter-distances se stabilisent à environ $5,2\text{ m}$.

La figure 4.9 montre les entrées de commande des braquages avant et arrière des trois véhicules. On remarque que seules les commandes des braquages avant sont utilisées et celles des braquages arrière sont nulles. La figure 4.10 montre bien que les angles de braquage arrière restent tout le temps nuls.

La figure 4.11 montre les vitesses longitudinales et latérales des trois véhicules.

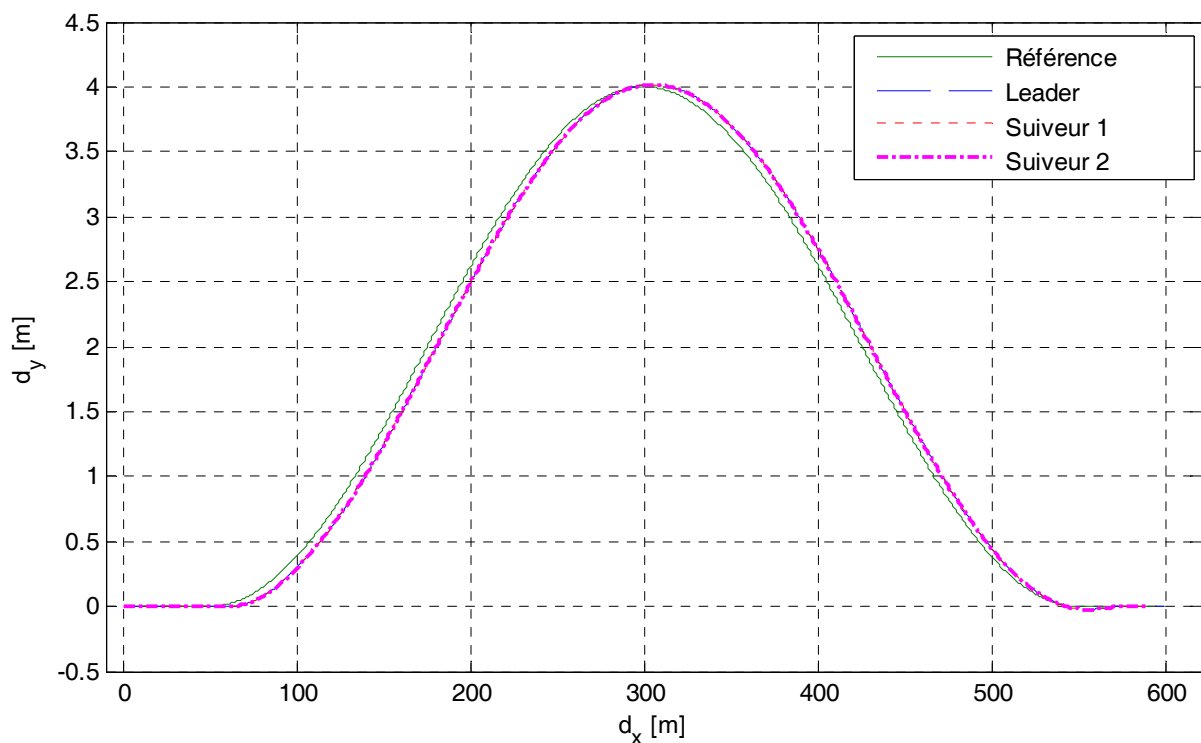


FIG. 4.7 – Poursuite de la trajectoire de référence des trois véhicules en fonctionnement normal

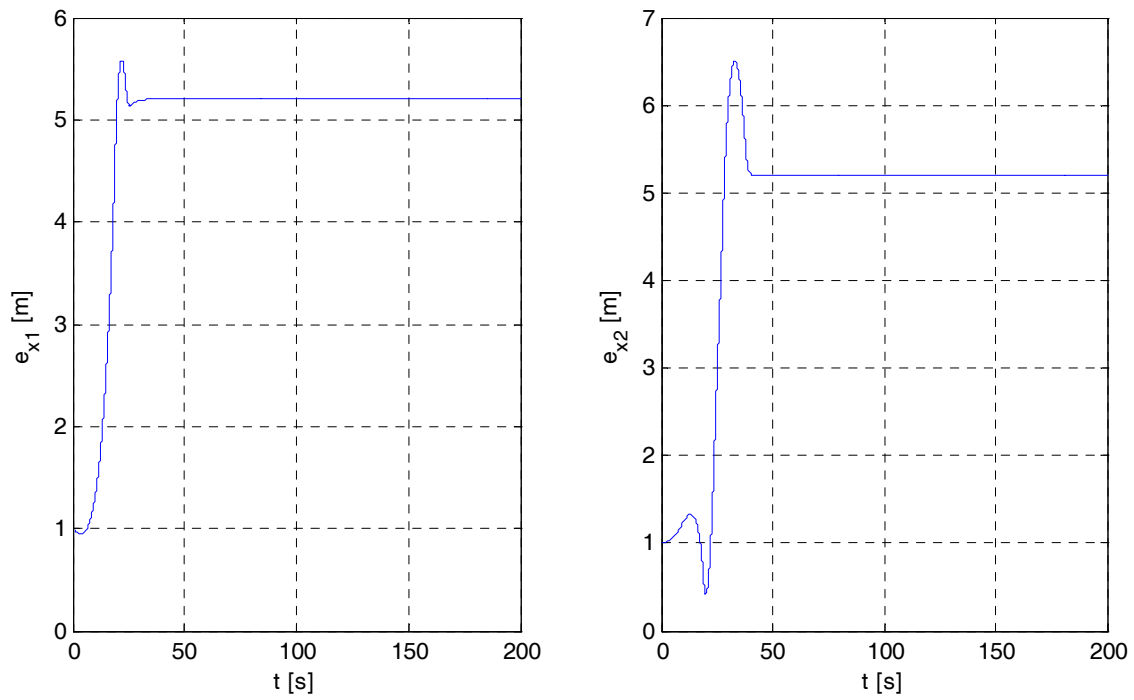


FIG. 4.8 – Les inter-distances entre les véhicules

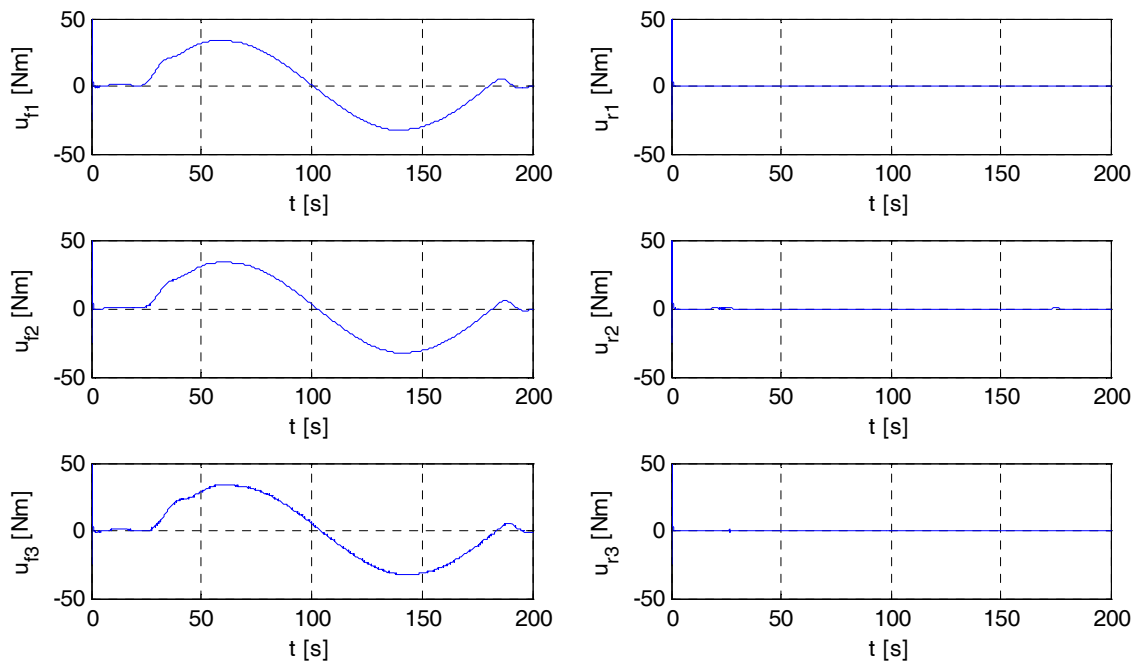


FIG. 4.9 – Commandes des braquages avant et arrière en fonctionnement normal

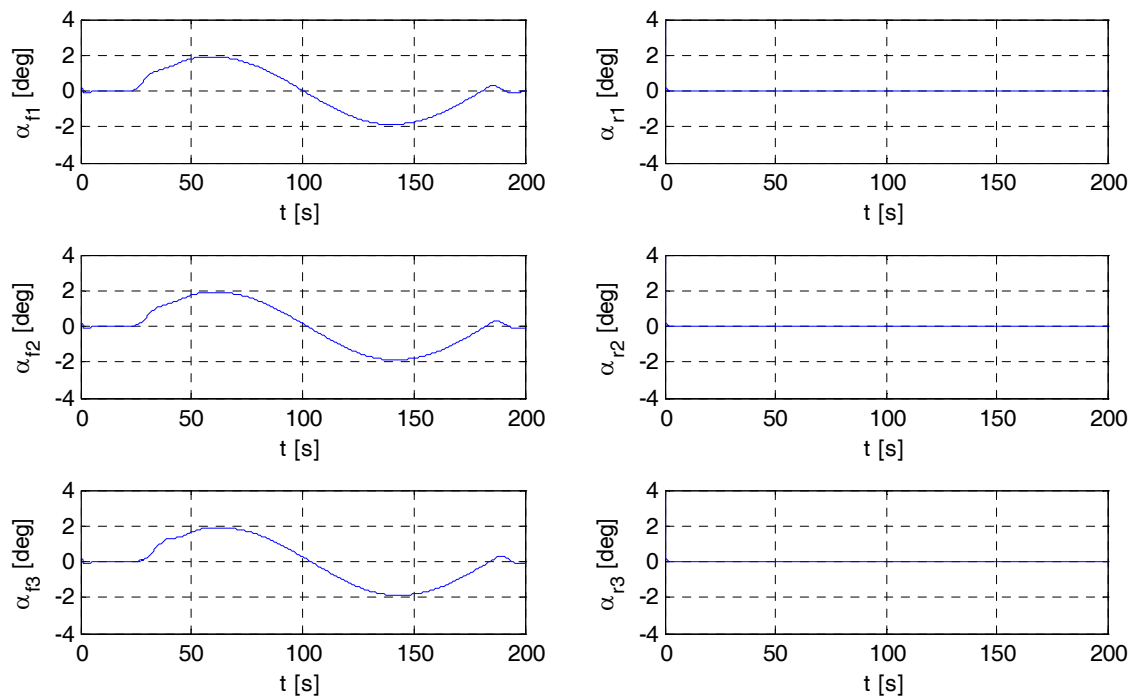


FIG. 4.10 – Braquages avant et arrière des trois véhicules en fonctionnement normal

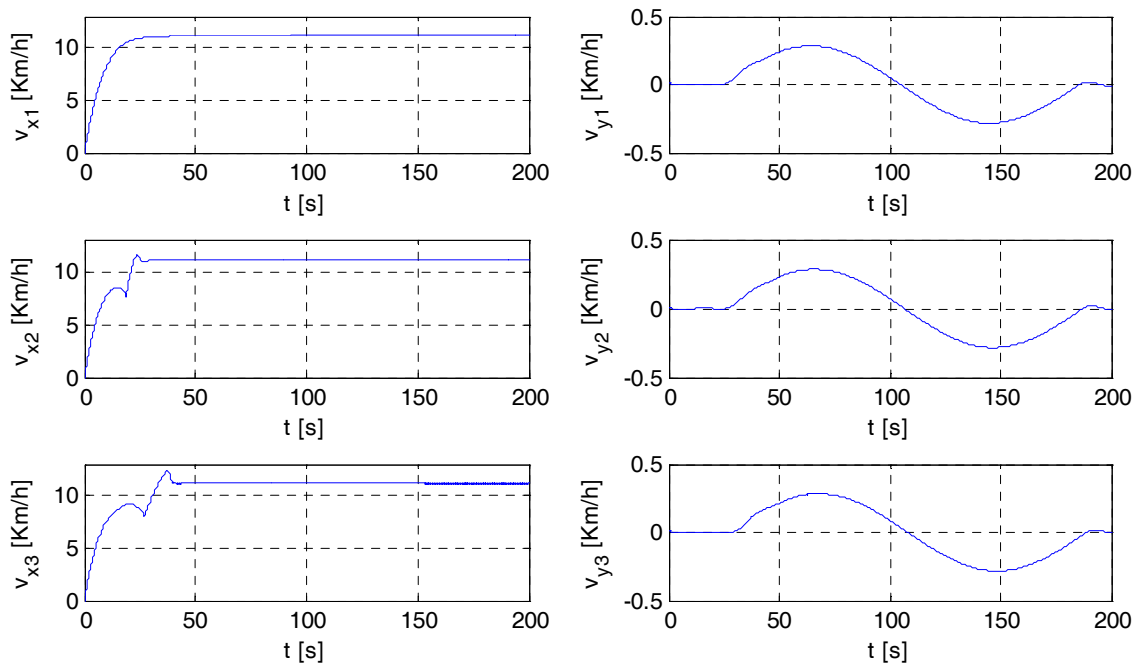


FIG. 4.11 – Vitesses longitudinales et latérales des trois véhicules en fonctionnement normal

Les résultats obtenus pour le cas de fonctionnement normal de tous les véhicules du

train montrent que tous les véhicules suivent la trajectoire de référence. On constate aussi que les inter-distances sont bien maintenues à des distances souhaitées. Les figures montrent aussi que seul le système de direction avant est utilisé pour le braquage.

4.3.2 Poursuite de trajectoire de référence avec un défaut sur le système de direction avant du premier véhicule

Dans cette partie, un défaut sur l'actionneur de braquage des roues avant du véhicule de tête est simulé à l'instant $t=150$ s. Dès que ce défaut est détecté, le véhicule bascule vers la commande de braquage arrière.

La figure 4.3.2 montre les trajectoires des trois véhicules qui suivent la trajectoire de référence. On remarque que la trajectoire du leader dévie un petit peu de la trajectoire de référence au moment de l'apparition de défaut avant de corriger sa trajectoire juste après grâce au braquage arrière. En ce qui concerne les distances de sécurité, elles sont maintenues constantes comme le montre la figure 4.13.

La figure 4.14 montre les entrées de commande des braquages avant et arrière des trois véhicules. On remarque qu'à l'instant d'apparition de défaut, la commande de braquage arrière du véhicule de tête devient différente de zéro. Ceci montre le basculement de la commande vers le braquage arrière. Ce défaut est visible sur la figure de la commande de braquage avant à partir de l'instant $t=150$ s.

Sur la figure 4.15, on remarque ce passage du braquage avant vers le braquage arrière du premier véhicule à l'instant de l'apparition de défaut.

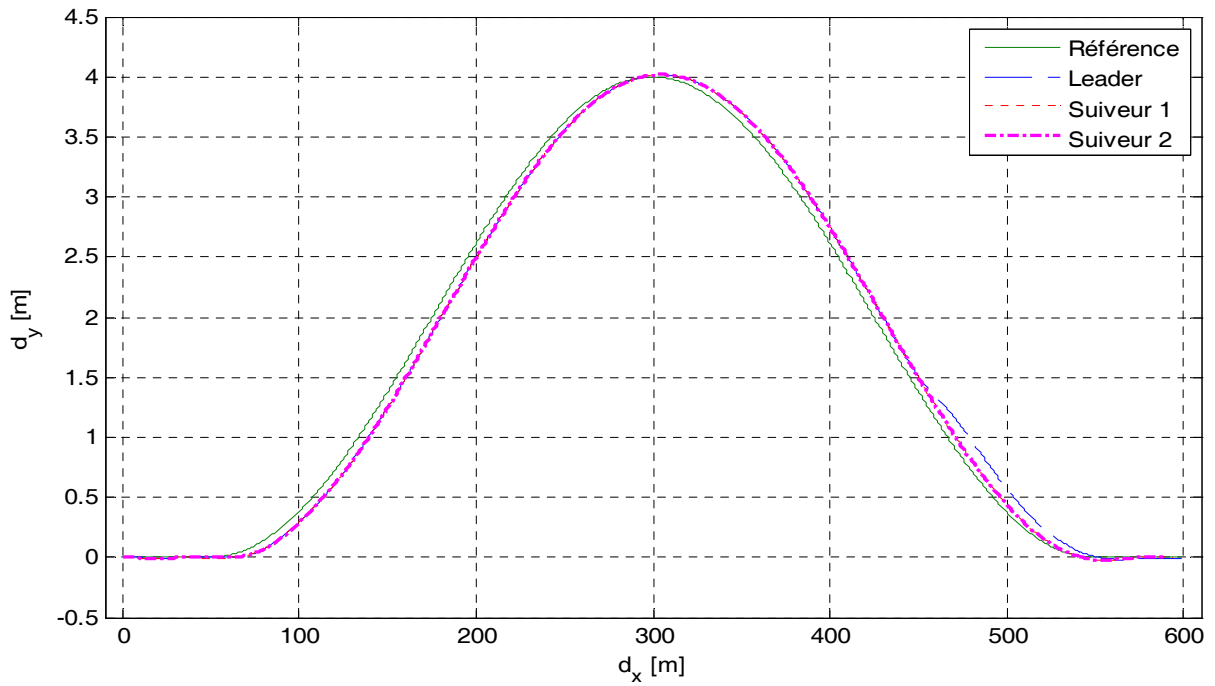


FIG. 4.12 – Poursuite de la trajectoire de référence des trois véhicules avec un défaut sur le système de direction avant du véhicule leader

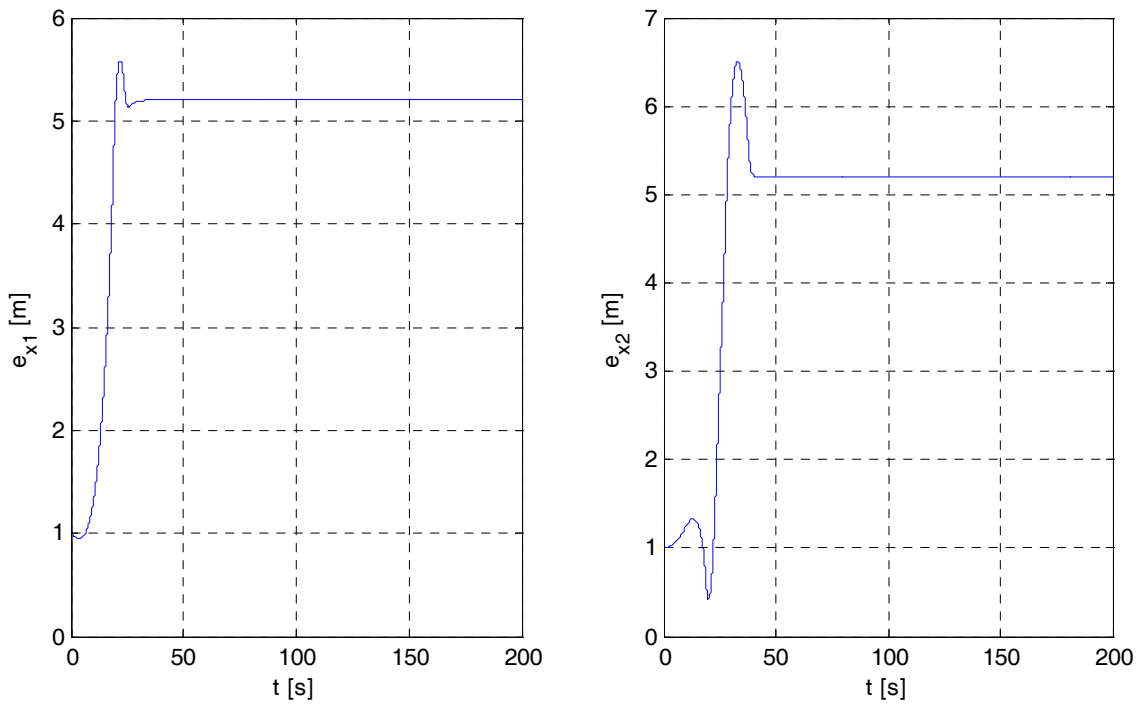


FIG. 4.13 – Les inter-distances entre les véhicules

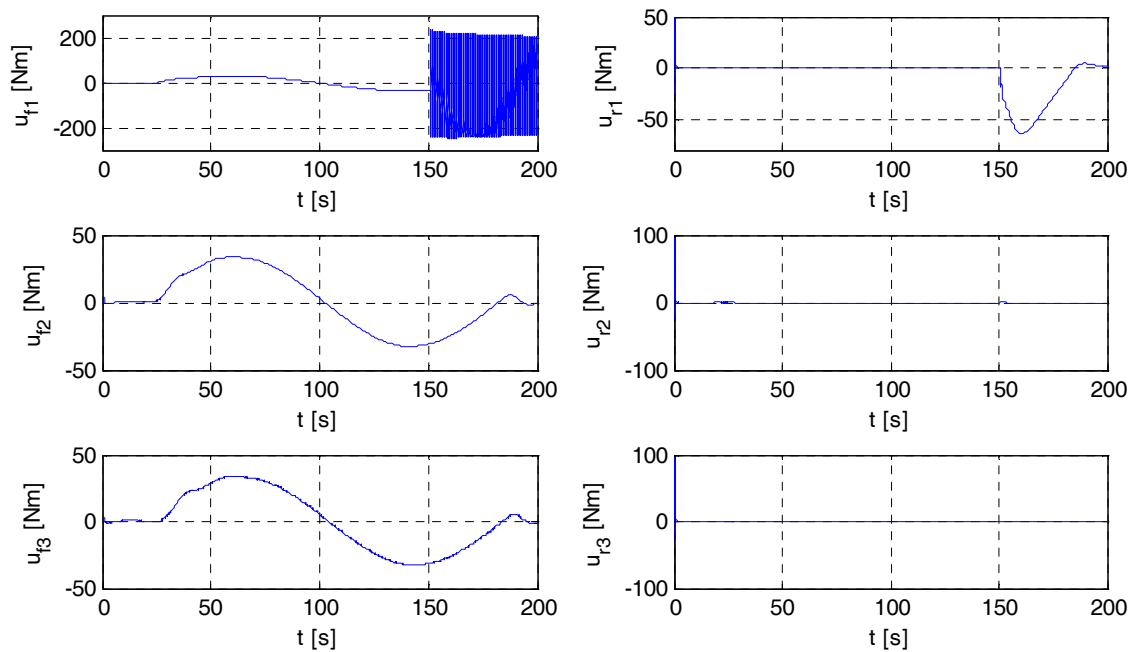


FIG. 4.14 – Commandes des braquages avant et arrière avec défaut d'actionneur de braquage avant du véhicule leader

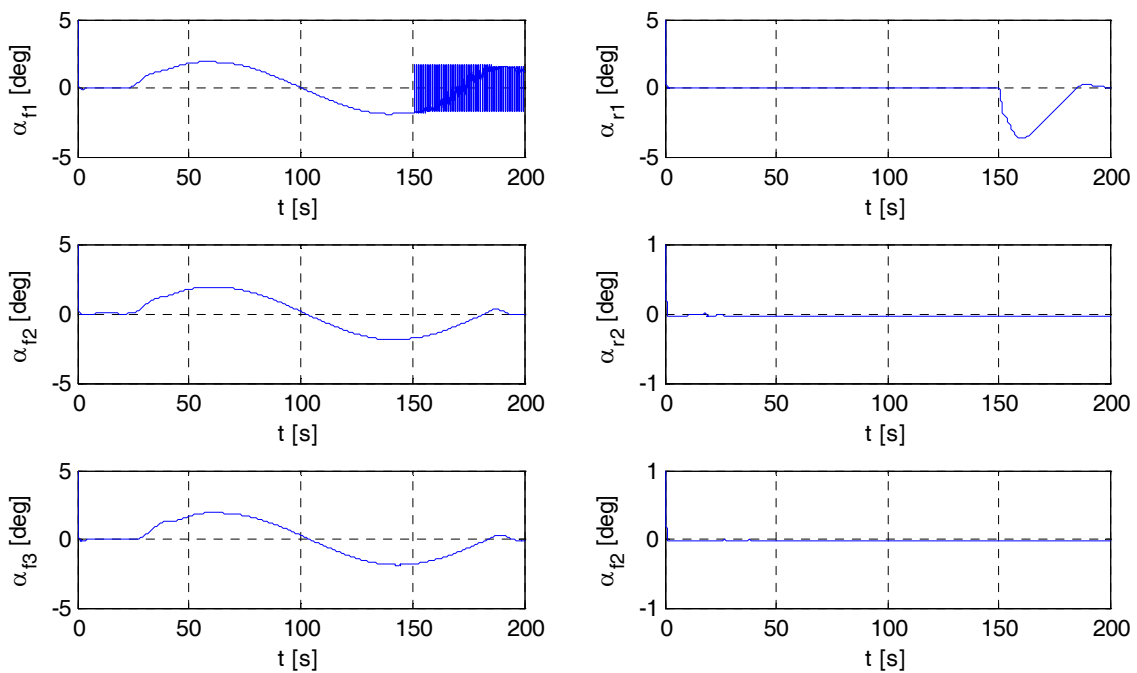


FIG. 4.15 – Braquages avant et arrière des trois véhicules avec défaut

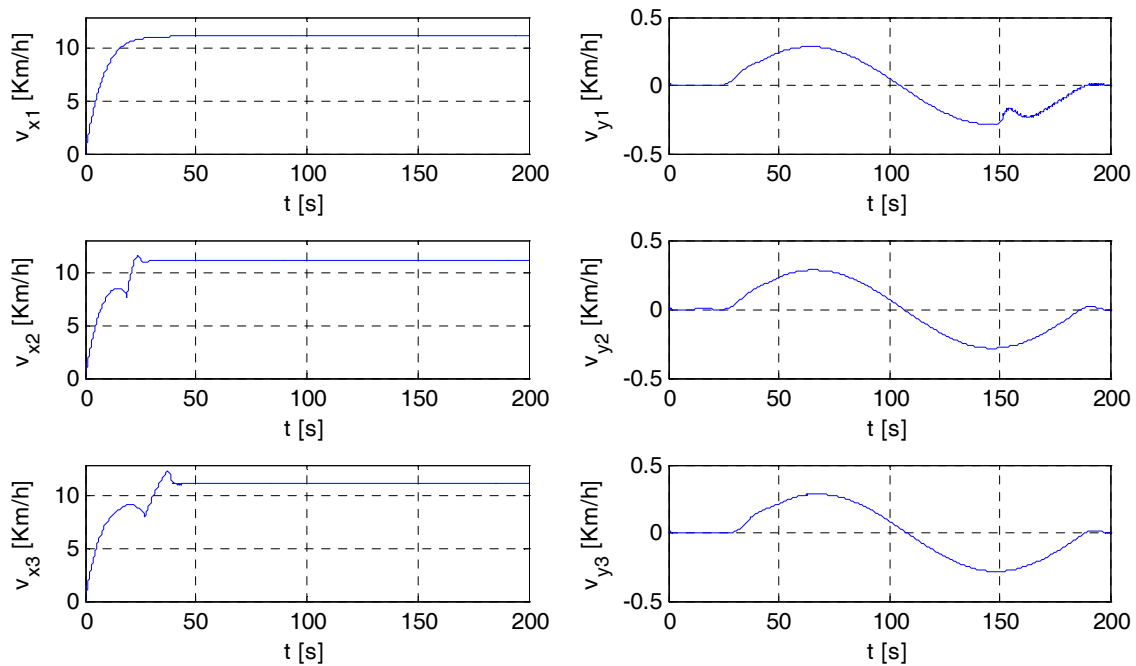


FIG. 4.16 – Vitesses longitudinales et latérales des trois véhicules avec défaut

Les résultats obtenus par la simulation du cas de fonctionnement du train de véhicules avec un défaut sur le système de direction avant du véhicule de tête montrent que la stratégie de reconfiguration que nous avons adoptée fonctionne bien. Les figures montrent que les véhicules continuent à suivre la trajectoire de référence malgré ce défaut. Elles montrent aussi comment à l'instant de l'apparition du défaut la commande de direction a commuté du système de direction avant vers celui de l'arrière.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une commande longitudinale et une autre latérale pour le fonctionnement sans défaut du train de véhicule. La commande longitudinale consiste à maintenir les distances de sécurité entre les véhicules à des distances souhaitées. Ces distances désirées sont comparées à celles mesurées par les télémètres laser et les différences sont utilisées pour calculer les entrées à envoyer aux quatre moteurs de traction en utilisant des commandes par modes glissants. La commande latérale est basé sur la génération d'une trajectoire de référence qui est imposée aux trois véhicules. La différence

entre la trajectoire de référence et celle donnée par le capteur GPS est utilisée pour calculer la commande de braquage avant. En cas d'une panne sur le système de direction avant, cette commande sera employée pour contrôler le braquage arrière pour permettre au véhicule de suivre sa trajectoire. Dans le cas d'une panne sur le capteur GPS de l'un des véhicules suiveurs, cette commande latérale à base d'une trajectoire de référence ne peut pas fonctionner. La stratégie consiste alors à basculer vers une autre commande qui est basée sur l'utilisation des vitesses de rotation des roues du véhicule qui précède le véhicule commandé. L'objectif de la commande est de maintenir à zéro les différences entre les vitesses de rotation des roues de ces deux véhicules. Dans cette stratégie, nous avons constaté par les résultats obtenus que les suiveurs coupent les virages. C'est pourquoi il est nécessaire de choisir des inter-distances les plus petites possibles pour réduire cet inconvénient.

En cas d'une panne de l'un des moteurs de traction avant, la stratégie adoptée est de n'utiliser que les deux moteurs des deux roues arrière. Les deux roues de l'avant ne reçoivent plus de couples de la part des moteurs, dans ce cas elles restent libres. La même stratégie est possible dans le cas d'une panne sur l'un des moteurs des roues arrière.

Conclusions générales et perspectives

1 Conclusions

Ce mémoire présente une contribution à la surveillance et la reconfiguration des systèmes non linéaires affines en la commande appliquées aux véhicules électriques. Une première étape de modélisation a été effectuée. A partir des caractéristiques du véhicule, un modèle intégrant les différentes forces s'appliquant sur le véhicule a été établi. A partir du modèle d'un véhicule, nous avons proposé une modélisation d'un convoi de véhicules. Pour superviser ce convoi, nous nous sommes d'abord intéressés à la surveillance d'un véhicule. Deux méthodes de diagnostic de défauts ont été développées afin de détecter et de localiser les défauts capteurs et actionneurs d'un véhicule électrique autonome à quatre roues motrices. L'une à base d'observateurs non linéaires à modes glissants et l'autre par la génération des relations de redondance analytique non linéaires.

La première approche utilise la technique de multi-observateurs pour une meilleure localisation de défauts. Un banc d'observateurs à entrées inconnues est utilisé dans lequel chaque observateur utilise seulement une partie des entrées/sorties et génère un ensemble de résidus. Chaque ensemble de ces résidus constitue une signature différente dédiée à un défaut particulier. Grâce à la différence de ces signatures, chaque défaut capteur et actionneur peut être détecté et localisé. Cette méthode est aussi capable de détecter et d'isoler des défauts multiples à condition que le système reste observable.

La deuxième approche consiste à étendre la méthode de l'espace de parité aux systèmes non linéaires. Le principe est le même que dans le cas linéaire et consiste à éliminer les états inconnus pour obtenir des relations qui ne sont fonction que des variables connues (entrées, sorties et paramètres du système). En plus de la génération des relations de

redondance analytique non linéaires par la méthode de l'espace de parité, nous avons intégré des observateurs différentiels à modes glissants d'ordre supérieur pour l'estimation des dérivées successives des entrées et des sorties.

Après avoir appliqué les deux approches au modèle non linéaire du véhicule, nous avons constaté que la méthode des observateurs donne une meilleure sensibilité et une meilleure localisation des défauts capteurs. Tandis que la méthode de l'espace de parité non linéaire est meilleure pour la détection et l'isolation des défauts actionneurs.

Avec ces méthodes, nous avons constitué par la suite un bloc de diagnostic pour un train de véhicules intelligents afin de réaliser un système de reconfiguration. Ce système choisit les commandes nécessaires pour les véhicules constituant le train en fonction des défauts détectés par le bloc de diagnostic. Quelques commandes sont prédéfinies selon le type de défaut capteur ou actionneur. En fonctionnement normal, le train de véhicules fonctionne avec les commandes initiales qui sont la commande de l'inter-distance utilisant les mesures des télémètres laser et la commande du braquage utilisant une trajectoire de référence et les mesures du GPS. Le système de reconfiguration réagit seulement en cas de l'apparition d'un défaut pour changer la commande ou utiliser les estimations de l'un des observateurs insensible à ce défaut. Les commandes initiales pour le fonctionnement normal sont :

- La commande longitudinale : elle permet de maintenir la distance de sécurité entre les véhicules. En fonction de la différence entre la distance de sécurité désirée, fixée par l'opérateur, et celle mesurée par le télémètre laser, une commande des moteurs de traction/freinage est calculée en utilisant un contrôleur à modes glissants d'ordre deux.
- La commande latérale : elle permet aux trois véhicules qui constituent le train de suivre une trajectoire de référence. En fonction de l'erreur entre la trajectoire de référence et celle du véhicule donnée par le capteur GPS, une commande de braquage avant est générée en utilisant la méthode de modes glissants.

Nous avons choisi quelques scénarios de défauts sur les capteurs et sur les actionneurs et nous avons développé la stratégie de reconfiguration appropriée. L'objectif est que le train de véhicules puisse poursuivre son parcours en présence d'une panne (mode dégradé). Les situations pour lesquelles le train de véhicules nécessite des stratégies de reconfiguration

sont :

- Défaut pour lequel la commande est tolérante et donc pour lequel il n’y a pas d’impact sur la trajectoire et la vitesse du véhicule. Cette situation est illustrée par quelques cas de défaillances capteurs et actionneurs.
- Défaut qui conduit à une altération de la vitesse d’un véhicule ou une faible perturbation de la trajectoire. Cette situation est illustrée par deux cas de défaillances : une défaillance du capteur de position et une défaillance d’un moteur de traction. Lorsque la panne survient sur le véhicule leader, les commandes des véhicules suivants sont adaptées aux variations du premier véhicule. La stratégie est un peu différente lorsque la panne affecte un des véhicules suivants ; en effet, dans ce cas, il est nécessaire d’avoir une communication entre les véhicules, de manière à d’une part adaptée la commande au véhicule qui suit le véhicule défaillant, mais également adapté la vitesse des véhicules qui précèdent, c’est à dire les ralentir.
- Défaut qui ne permet plus de poursuivre la mission, arrêt du véhicule ou blocage d’actionneur rendant impossible de suivre la trajectoire. Pour cette situation, le cas le plus simple est celui où c’est le dernier véhicule suiveur qui s’arrête et les autres suivent la mission. Dans les autres cas, une stratégie de reconfiguration totale du convoi est nécessaire, avec sortie du convoi des véhicules qui suivent le véhicule arrêté et reconstitution d’un nouveau convoi.

Différentes stratégies ont été simulées : en cas d’une panne sur le système de direction avant, cette commande sera utilisée pour contrôler le braquage arrière pour permettre au véhicule de suivre sa trajectoire.

En cas d’une panne de l’un des moteurs de traction avant, la stratégie adoptée était de n’utiliser que les deux moteurs des deux roues arrière. Les deux roues avant ne reçoivent pas de couples de la part des moteurs, dans ce cas elles restent libres. La même stratégie est possible dans le cas d’une panne sur l’un des moteurs des roues arrière.

2 Perspectives

2.1 Modélisation

Dans la modélisation que nous avons présentée pour le véhicule électrique, nous avons pris des hypothèses pour le cas de faibles vitesses. Par conséquent, nous avons négligé quelques dynamiques qui ne sont pas négligeables dans le cas des vitesses plus élevées. Nous avons aussi considéré que les dynamiques du roulis et de tangage sont négligeables. Le modèle présenté est valable pour le véhicule que nous avons utilisé (RobuCar), qui est un véhicule léger et qui roule à une vitesse relativement faible. Pour permettre l'extension de ce modèle vers un cas général, une prise en compte de toutes les dynamiques du véhicule devrait être envisagée. Dans ce cas le modèle obtenu sera valable pour d'autres véhicules électriques à quatre roues motrices qui ont des vitesses maximales plus élevées et qui ont une masse supérieure à celle du RobuCar.

2.2 Diagnostic

Le point à améliorer dans les travaux à venir dans cette partie est l'extension des méthodes de diagnostic utilisées dans cette thèse vers la détection des défauts multiples et simultanés des capteurs et des actionneurs. Un autre point à ajouter est aussi l'analyse des résidus et le calcul des seuils pour permettre une meilleure détection et une meilleure isolation. Dans cette thèse, nous n'avons pas abordé le problème de robustesse qui est un des problèmes posés dans le cas de la surveillance. En effet, nous avons considéré que le modèle dynamique du véhicule que nous avons développé n'était pas assujéti à des erreurs de modélisation importantes puisque notre objectif principal étant la reconfiguration du train de véhicules. Bien sûr, dans les perspectives, on pourrait envisager de développer des commandes robustes à ces variations de paramètres.

2.3 Reconfiguration

Dans ce mémoire, nous avons considéré seulement quelques défauts pour lesquels nous avons développé des stratégies de reconfiguration. Les perspectives dans ce domaine sont de considérer le plus possible de défauts actionneurs et capteurs et de développer des

commandes plus intelligentes et tolérantes aux fautes. Une étude de stabilité de l'ensemble du convoi est nécessaire lors du passage d'une commande à une autre.

2.4 Implémentation

L'objectif final de ce travail est d'implémenter les algorithmes développés sur le système réel. Pour le faire, une première validation des résultats sera effectuée par des simulateurs de véhicules CALLAS et CarSim. Ensuite, une implémentation sur les véhicules RobuCar du laboratoire LAGIS sera possible. Nous avons déjà commencé à travailler sur le logiciel CarSim que vient d'acquérir le laboratoire. Notre première étape était de concevoir un véhicule de type RobuCar que nous avons implémenté dans le logiciel prévu initialement pour des véhicules classiques (1 seul moteur). Les contraintes d'implantation des méthodes en temps réel sur le véhicule pourront faire l'objet de développement futur, et nous avons vu que lors d'une reconfiguration du convoi de véhicules, il sera nécessaire d'intégrer les aspects communication entre véhicules.

Enfin, les travaux développés dans le cadre de cette thèse contribueront au développement du projet InTraDE (Intelligent Transportation for Dynamic Environment). Ce projet, initié par le LAGIS et lancé officiellement à Polytech'Lille le 28 Janvier 2010, vise à concevoir, produire, tester et évaluer l'impact économique, écologique et social d'un prototype de véhicule intelligent pour le transport de marchandises dans les zones portuaires et confinées.

Annexe A

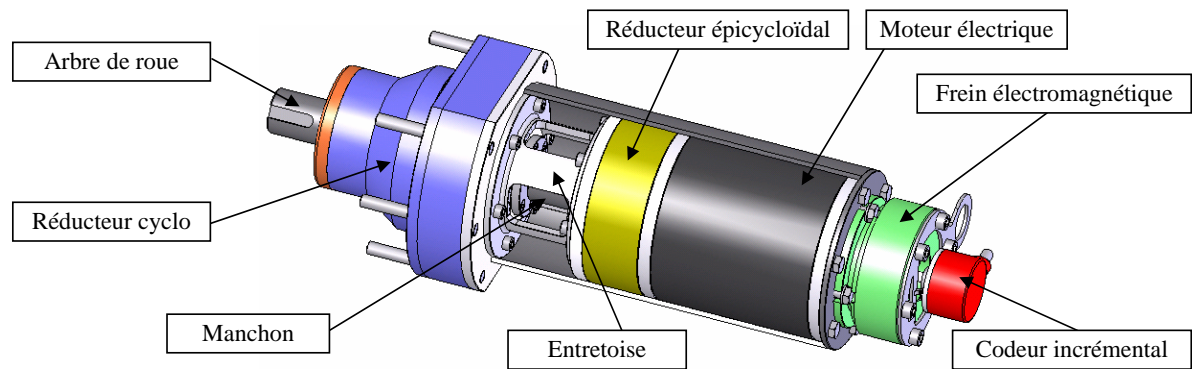
Description de RobuCar

La société française ROBOSOFT qui est spécialisée dans les solutions de robotique, commercialise plusieurs types de robots électriques autonomes à roues, sans conducteur et filoguidés, destinés à évoluer dans des milieux sains ou hostiles, ou à accomplir des missions spécifiques (transports dangereux, déminage, explorations,...). Le type de robot que dispose le LAGIS est le véhicule " Robucar ". Deux ponts identiques et indépendants, caractéristiques de cette gamme, constituent la partie cycle du Robucar.

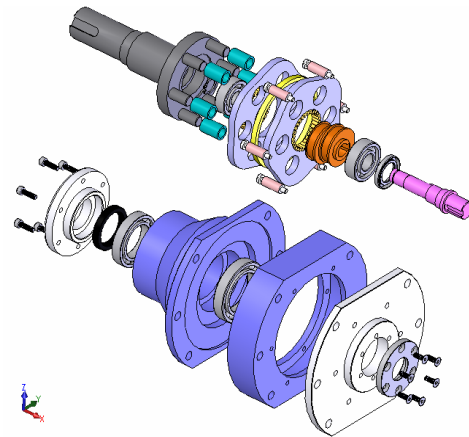
Un pont comporte :

- deux roues entraînées chacune par un motoréducteur électrique 48V et ralenties par un frein électromagnétique à manque de courant figure A.1 ;
- un dispositif de suspension à 2 triangles superposés (type Mac Pherson) figure A.2 ;
- une commande de braquage par un vérin électrique 48V figure A.3.

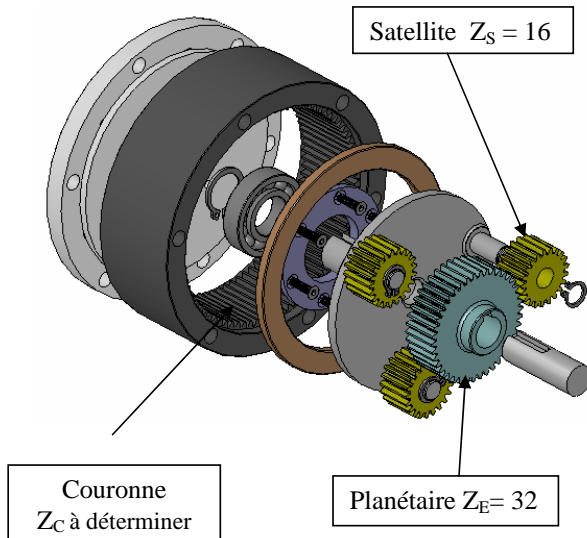
Sur chaque pont, les motoréducteurs et le vérin sont gérés par un calculateur à microcontrôleur. Un bus de terrain assure la liaison entre les deux calculateurs et un PC embarqué. Celui-ci communique à l'occasion avec le PC extérieur de supervision par une liaison sans fil.

**Réducteur cyclo :**

Equivalent : SUMITOMO
 Série : CYCLO 6000
 Référence : CNF 6100/SY
 Vitesse d'entrée Maxi : 1750 tr/mn
 Puissance de sortie : 1796 W
 Couple de sortie : 145 N.m
 Charge radiale : 5180 N
 $\eta_{CYCLO} = 0,88$
 Rapport de réduction : 5

**Train épicycloïdal :**

$\eta_{TRAIN} = 0,9$

**Moteur électrique**

MP100S B14
 Moteur à courant continu
 48 V
 $P_m = 900$ W
 $\eta_{MOTEUR} = 0,9$
 Vitesse : 3500 tr/mn
 Protection IP20-IP44

**Frein électromagnétique**

SB-28 DELTRAN
 Frein de sécurité à manque
 de courant
 Tension : 24 V
 Résistance : 36 Ω
 Puissance 20 W
 Couple de freinage : 9 N.m



FIG. A.1 – Détail du système de traction/freinage

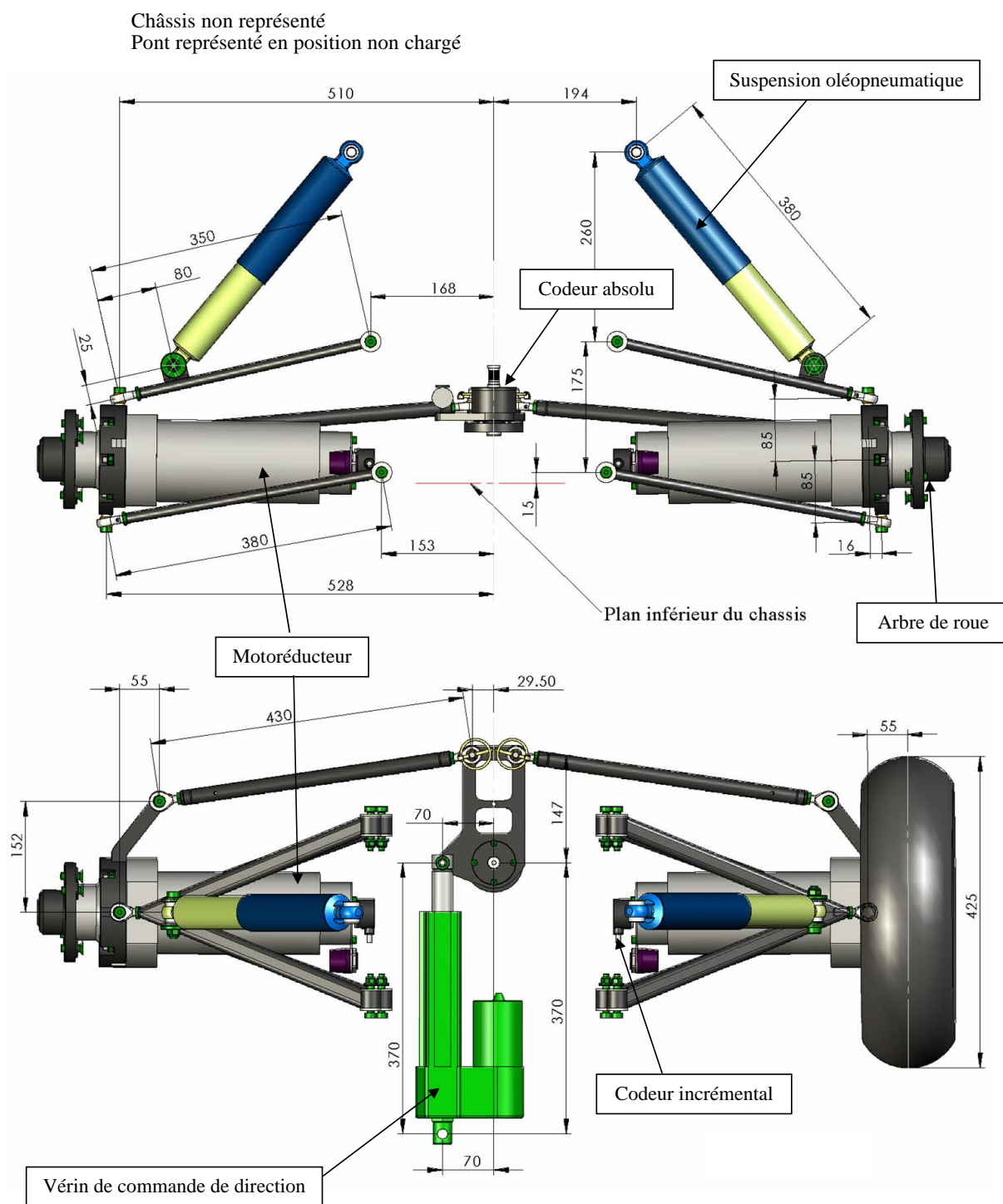
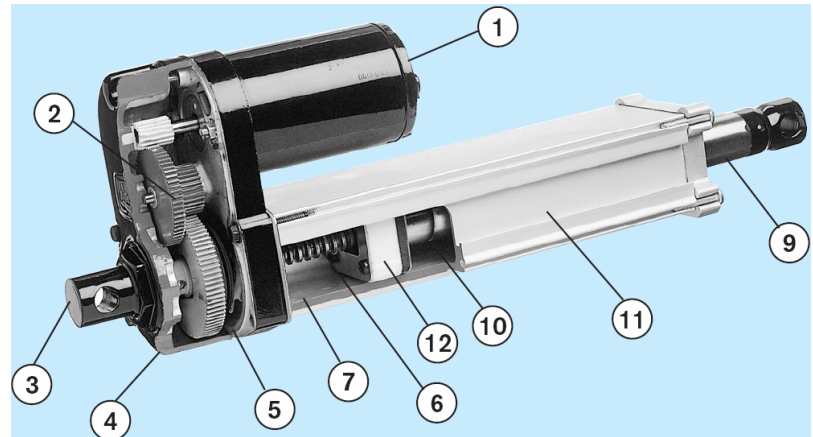


FIG. A.2 – Détail de la direction et de la suspension du RobuCar

- 1 - Moteur CC + protection thermique
- 2 - Train d'engrenages
- 3 - Chape à incréments de 30°
- 4 - Boîtier de réduction étanche
- 5 - Embrayage de surcharge
- 6 - Vis ACME ou vis à billes
- 7 - Ecrou à billes avec frein de maintien
- 9 - Tube d'extension acier inox
- 10 - Ecrou
- 11 - Tube de protection profilé alu
- 12 - Dispositif anti-rotation



Sens de déplacement de la tige
 Sortie : tension positive
 Rentrée : tension négative

Exemple de désignation	DA	24	-	20A65	M	25
Type de vérin LA14	DA					
Tension d'alimentation 24 Vcc 36 Vcc		24 36				
Tiret			-			
Rapport de réduction / type / diamètre / pas de vis 5:1 / vis acme / 15,88 mm / 5,08 mm 10:1 / vis acme / 15,88 mm / 5,08 mm 20:1 / vis acme / 15,88 mm / 5,08 mm 5:1 / vis à billes / 15,88 mm / 5,08 mm 10:1 / vis à billes / 15,88 mm / 5,08 mm 20:1 / vis à billes / 15,88 mm / 5,08 mm 20:1 / vis à billes / 15,88 mm / 5,08 mm avec engrenages cémentés				05A65 10A65 20A65 05B65 10B65 20B65 21B65		
Unités Métriques					M	
Course 5 cm 10 cm 15 cm 20 cm						05 10 15 20

Tableau des valeurs limites

Modele	Charge dynamique max. [N]	Vitesse à charge min. [mm/s]	Vitesse à charge max. [mm/s]
DA24-05A65	1100	54	32
DA36-05A65	1100	54	32
DA24-05B65	2250	61	37
DA36-05B65	2250	61	37
DA24-10A65	2250	30	18
DA36-10A65	2250	30	18
DA24-10B65	4500	30	19
DA36-10B65	4500	30	19
DA24-20A65	2250	15	12
DA36-20A65	2250	15	12
DA24-20B65	4500	15	12
DA36-20B65	4500	15	12
DA24-21B65	6800	15	11
DA36-21B65	6800	15	11

FIG. A.3 – Le vérin électrique

A.1 Capteurs installés sur le RobuCar

A.1.1 Le GPS

Le système GPS (Global Positioning System) est un système de localisation par satellites. 24 satellites tournent autour de la terre deux fois par jour à 20 000 kilomètres

d'altitude en transmettant leur position et leur altitude. Le signal une fois reçu, le récepteur GPS calcule sa position en mesurant l'intervalle entre la transmission et la réception pour déterminer la distance entre le récepteur et les satellites. Après calcul des coordonnées (avec un minimum de 3 satellites, un quatrième permet d'augmenter la précision), ce système permet aux utilisateurs de se situer partout dans le monde, que ce soit dans l'espace, sur mer et à terre.

Afin d'accroître la précision du GPS (50m environ) il est possible d'utiliser des systèmes différentiels qui comparent la position donnée par les satellites à celle d'une borne fixe au sol (de position exacte connue). Par exemple, le GPS SAGITTA de Thalès fournit des positions centimétriques.

Enfin, toujours dans un souci de précision, il est possible d'utiliser des modules de localisation GPS hybrides intégrant un gyromètre et une interface odomètre (c'est le cas du GPS Capricorn2001 de DSNP) Il est alors possible d'atteindre des précisions au mètre voir au centimètre pour les systèmes les plus performants.

A.1.2 La centrale inertielle

Une centrale inertielle est un dispositif muni de gyroscopes, d'accéléromètres et d'un calculateur qui permet à un véhicule de connaître sa position et sa vitesse dans l'espace. Le gyromètre fournit les accélérations angulaires sur trois axes et l'accéléromètre donne les accélérations linéaires sur trois axes du repère local. Par intégrations successives, on peut facilement obtenir les vitesses et les positions. D'autre part, la centrale inertielle peut être utilisée pour corriger les données odométriques.

Sur le véhicule RobuCar, la centrale inertielle sert à mesurer la vitesse du lacet

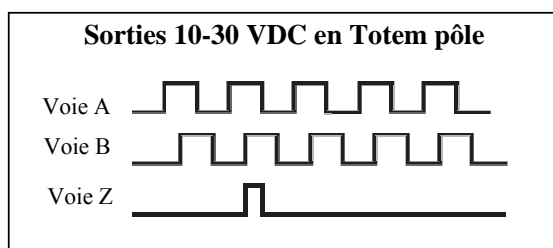
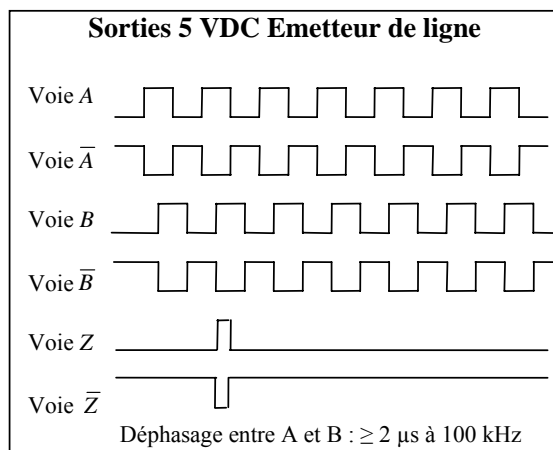
A.1.3 Le codeur incrémental

- Résolution jusqu'à 2048 impulsions
- Sorties A, B, Z en Totem pôle NPN et PNP
Sorties $A\bar{A}$, $B\bar{B}$, $Z\bar{Z}$ en Emetteur de ligne pour RS422
- Faible encombrement
- Serrage concentrique par bague



Caractéristiques électriques

Alimentation 5 VDC \pm 10 % ou 10-30 VDC
Consommation 60 mA
Fréquence de commutation maxi 100 kHz
Diagramme des sorties
 pour une rotation en sens horaire et vue sur l'axe

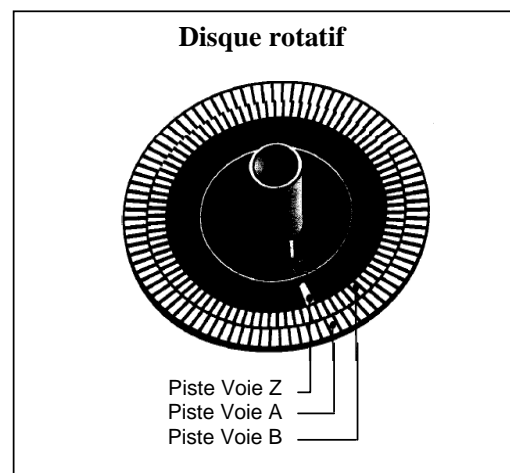


Affectation des couleurs du câble

10-30 VDC		5 VDC	
Totem pôle		Emetteur de ligne	
Voie A	vert	Voie A	vert
		Voie \bar{A}	rouge
Voie B	jaune	Voie B	jaune
		Voie \bar{B}	bleu
Voie Z	rose	Voie Z	rose
		Voie \bar{Z}	gris
+U alim.	brun	+U alim.	brun
0V alim.	blanc	0V alim.	blanc

Caractéristiques mécaniques

Vitesse maxi 12 000 tr/min
Couple $\leq 0,2 \text{ N.cm}$
Moment d'inertie $3 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Vibration IEC68 $\leq 100 \text{ m/s}^2$ 16 ... 2000 Hz
Choc IEC68 $\leq 500 \text{ m/s}^2$ 11ms
Poids 100 g
Température d'utilisation $-25^\circ \dots +85^\circ$
Humidité relative 95 % sans condensation
Protection IP64



Références de commande

Exécution			
0	Alésage $\varnothing 6 \text{ mm}$, pour pige $\varnothing 3 \text{ mm}$ (non fournie)		
1	Alésage $\varnothing 6 \text{ mm}$, avec ressort anti-rotation		
Sorties et alimentation			
22	Emetteur de ligne, alimentation 5 VDC		
60	Totem pôle, alimentation 10-30 VDC		
Raccordement			
41	Presse-étoupe radial avec câble blindé de 1 m		
Résolution (nombre d'impulsions par tour)			
49	5 imp	09	250 imp
39	50	13	360
40	60	14	400
41	100	15	500
06	200	22	1000
		23	1024 imp
		24	1250
		26	1500
		28	2000
		29	2048

GI338. □ □ □ □ □ □

FIG. A.4 – Caractéristiques détaillées du codeur incrémental

A.1.4 Le codeur absolu



- Résolution 13 bits
- Code gray ou binaire
- Sorties en Totem pôle NPN et PNP protégées
- Positionnement électrique du zéro
- Fonction ENABLE pour mettre les sorties codeur en haute impédance
- Faible consommation

Caractéristiques électriques

Alimentation	10 à 30 VDC
Consommation	60 mA
Fréquence de commutation	800 kHz max
Précision	$\pm \frac{1}{2}$ LSB
Caractéristiques des sorties	
Niveau haut $\geq U_{\text{alim}} - 3.5 \text{ V}$ pour $I = 20 \text{ mA}$	
Niveau bas $\leq 0.5 \text{ V}$ pour $I = 20 \text{ mA}$	
Charge max. 30 mA par sortie	

Caractéristiques mécaniques

Vitesse maxi	10 000 tr/min
Couple	$\leq 1 \text{ N.cm}$
Moment d'inertie	$1,45 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
Vibration	IEC68 $\leq 100 \text{ m/s}^2$ 16 ... 2000 Hz
Choc	IEC68 $\leq 2000 \text{ m/s}^2$ 6ms
Poids	250 g
Température d'utilisation	$-25^\circ \dots +85^\circ$
Humidité relative	95 % sans condensation
Protection	IP64

Caractéristiques des entrées

Niveau haut $\geq 0,7 U_{\text{alim}}$, niveau bas $\leq 0,3 \text{ V}$

Entrée ZERO

Permet le calage à zéro du codeur.

Entrée reliée par une résistance de rappel interne de 10 k Ω au 0V. Le calage à zéro du codeur est réalisé en envoyant une impulsion +U alim sur l'entrée zéro.

Entrée V/R

Sélection du sens d'évolution du code.

Entrée reliée par une résistance de rappel interne de 10 k à U alim : code croissant pour la rotation dans le sens horaire

Affectation des couleurs du câble

Borne	Cable	Designation
1	violet	2 ^e / D0
2	blanc/brun	2 ^e / D1
3	blanc/vert	2 ^e / D2
4	blanc/jaune	2 ^e / D3
5	blanc/gris	2 ^e / D4
6	blanc/rose	2 ^e / D5
7	blanc/bleu	2 ^e / D6
8	blanc/rouge	2 ^e / D7
9	blanc/noir	2 ^e / D8
10	brun/vert	2 ^e / D9
11	brun/jaune	2 ^e / D10
12	brun/gris	2 ^e / D11
13	brun/rose	2 ^e / D12
14	vert/gris	—
15	bleu	0V alim.
16	bleu/jaune	DV
17	brun	V/R
18	rose	STORE
19	rouge	+ U alim.
20	rouge/jaune	ZERO
21	jaune	ENABLE

Références de commande

GA240 à bride standard	
0	Axe $\varnothing 10 \text{ mm}$
A	Axe $\varnothing 10 \text{ mm}$ + joint d'étanchéité
Code et résolution	
10	Code Gray 13 bits, alimentation 10-30 VDC
12	Code binaire 13 bits, alimentation 10-30 VDC
Raccordement	
61	Presse-étoupe radial avec câble blindé de 1 m
C1	Embase radiale mâle
W0	Embase radiale mâle + connecteur femelle

GA240. □ □ □ □ 02

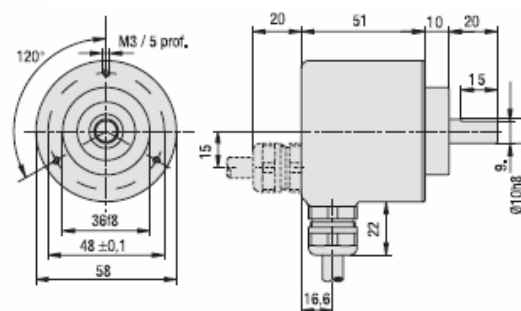


FIG. A.5 – Caractéristiques détaillées du codeur absolu

A.1.5 Le télémètre laser



Le laser SICK LMS221

Couverture	180 °
Portée	80 m
Résolution Angulaire	1 ... 0,25 °
Temps de réponse	13 ... 52 ms
Résolution	10 mm
Erreur Systematique	+/- 35 mm
Erreur Statistique(1 sigma)	10 mm
Classe Laser	1
Indice de Protection	IP 67
Temperature de fonctionnement	-30 °C ... +50 °C
Temperature de stockage	-30 °C ... +70 °C
Interface	RS-422 RS-232
Vitesses de transmission	9,6 / 19,2 / 38,4 / 500 kBaud
Sorties	2 x relay/1 x PNP, 3 x PNP
Alimentation	24 V DC +/- 15%
Consommation	20 W
Poids	9 kg
Consommation de chauffage	6 A
Dimensions (L x W x H)	196 x 352 x 266 mm

FIG. A.6 – Caractéristiques du télémètre laser SICK LMS221

Le télémètre laser LMS émet des impulsions laser qui sont réfléchies par un objet. Le temps mis entre l'émission et la réception de l'impulsion est directement proportionnel à la distance entre le laser et l'objet. Le faisceau émis est dévié par un miroir tournant, permettant ainsi de balayer une surface de 180°. A partir de la mesure du temps séparant l'émission de la réception, on déduit la distance capteur -obstacle; connaissant la position angulaire du "tir" on peut en déduire la position exacte de l'objet dans un plan (coordonnées polaires). Il peut être connecté sur une interface série standard (RS232) ou différentielle (RS422).

Pour permettre son fonctionnement à basse température, un système de chauffage est intégré et déclenché par un thermostat à une température $\leq 10^{\circ}C$.

Annexe B

Changement de repère

B.1 Définition des repères

Pour définir le mouvement d'un véhicule dans l'espace Euclidien à trois dimensions, deux repères sont utilisés. Le premier repère est le repère inertiel global R_0 de référence. Le repère inertiel est lié à la Terre et peut être considéré comme Galiléen. $R_0(X_0, Y_0, Z_0)$ est orienté comme suit :

- X_0 : orienté vers le nord.
- Y_0 : orienté vers le ouest.
- Z_0 : orienté vers le haut.

Ensuite, un repère local $R(X, Y, Z)$ ayant comme origine le centre géométrique CG. Ce repère est relatif à la mécanique de mouvement dont les axes sont liés à la géométrie de l'appareil.

Ces deux repères sont visibles sur la figure B.1.

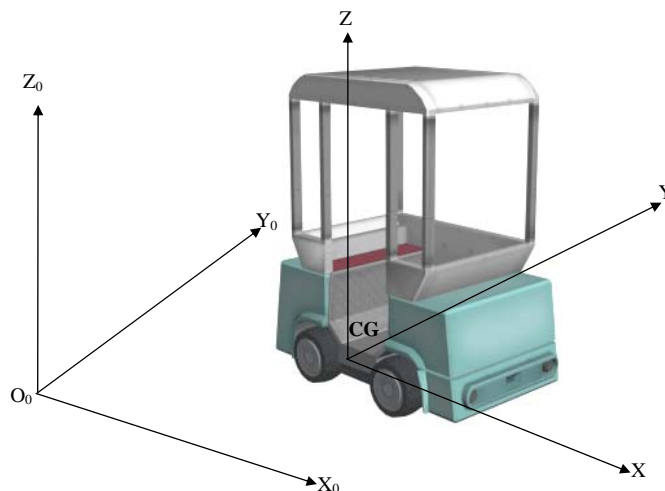


FIG. B.1 – Les repères pour localiser le véhicule dans l'espace

B.2 Définition des matrices de passage

Une paramétrisation en lacet, tangage, roulis est utilisée pour décrire la position et l'orientation du véhicule dans le repère R_0 . La configuration de l'appareil est décrit au moyen de trois rotations élémentaires définies par trois angles d'orientation à savoir le lacet ψ , le roulis ϕ , le tangage θ .

$$B(X_0, Y_0, Z_0) \xrightarrow{H_\psi} B(U, V, Z_0) \xrightarrow{H_\theta} B(X, V, W) \xrightarrow{H_\phi} B(X, Y, Z)$$

Où $B(X_0, Y_0, Z_0)$ est la base du repère R_0 , $B(X, Y, Z)$ la base du repère local R , $B(U, V, Z_0)$ et $B(X, V, W)$ sont les bases intermédiaires et H_ψ , H_θ , H_ϕ les matrices de rotation orthogonales.

$$H_\psi = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ dans la base } (X_0, Y_0, Z_0)$$

La rotation d'angle de lacet, comptée positivement dans le sens direct par rapport à Z_0 , donne la matrice de passage H_ψ entre les bases $B(X_0, Y_0, Z_0)$ et $B(U, V, Z_0)$.

$$H_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \text{ dans la base } (U, V, Z_0)$$

La seconde rotation d'angle d'assiette θ décrivant le tangage autour de l'axe V , donne la matrice de passage H_θ entre les bases $B(U, V, Z_0)$ et $B(X, V, W)$.

$$H_\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \text{ dans la base } (X, V, W)$$

La dernière rotation d'angle de roulis ϕ s'effectue autour de l'axe X de la nouvelle base. Elle donne la matrice H_ϕ entre les bases $B(X, V, W)$ et $B(X, Y, Z)$.

La matrice de rotation qui décrit la transformation entre le repère global et le repère local du véhicule est donnée par :

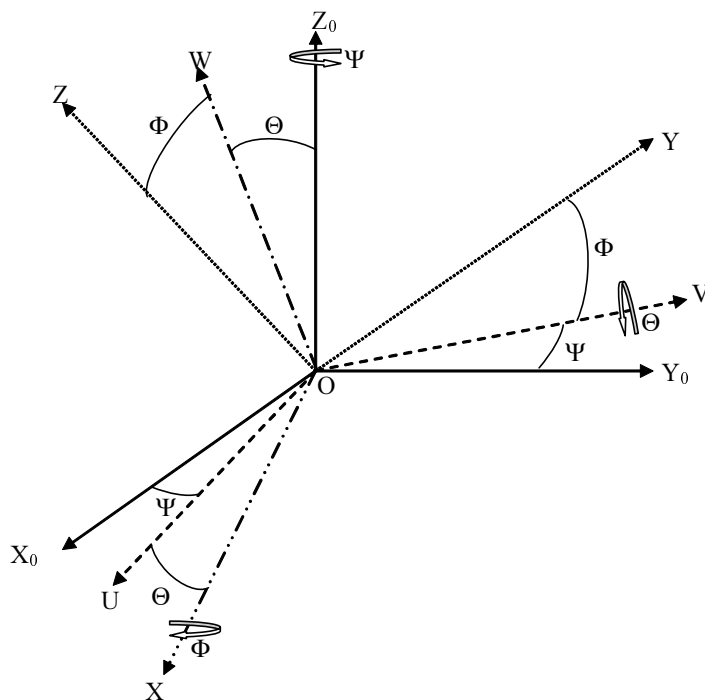
$$J_1(\eta_2) = H_\psi H_\theta H_\phi \tag{B.1}$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi \\ -\sin\theta & -\cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

sachant que

$$\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$$

La figure B.2 représente les trois rotations de passage entre le repère global R_0 et le repère relatif lié au véhicule R .

FIG. B.2 – Les trois rotations de passage entre les repères R_0 et R

B.3 Transformation des vitesses de translation et de rotation

B.3.1 Vitesse de translation

A l'aide de la matrice de changement de base (B.1), la transformation des composantes des vitesses de translation, par rapport à R_0 , peut s'exprimer de la manière suivante à l'aide des notations suivantes :

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1$$

Avec $\eta_1 = [x_0, y_0, z_0]^T$ le vecteur position du véhicule par rapport à R_0 dont les composantes sont exprimées dans R_0 , $\dot{\eta}_1$ le vecteur vitesse par rapport à R_0 exprimé dans R_0 et $\nu_1 = [u, v, w]^T$ le vecteur vitesse de translation de l'appareil par rapport à R_0 exprimé dans R .

B.3.2 Vitesse de rotation

Pour trois angles ϕ , θ , ψ donnés correspond une position du repère R par rapport au repère R_0 . Mais pour une position du repère R par rapport au repère R_0 , il existe une infinité d'angles ϕ , θ , ψ . La rotation du repère local par rapport au repère global, notée R/R_0 , est définie par trois paramètres.

Les bases intermédiaires $B(U, V, Z_0)$ et $B(X, V, W)$ définissent respectivement les repères R_ψ et R_θ . Nous pouvons écrire :

$$R/R_0 = R_\psi/R_0 + R_\theta/R_\psi + R/R_\theta$$

Le vecteur vitesse de rotation du repère local par rapport au repère global peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\vec{\Omega}_{\xi R_0} = \dot{\psi} \vec{Z}_0 + \dot{\theta} \vec{V} + \dot{\phi} \vec{X}$$

Ce vecteur vitesse de rotation peut être exprimé dans différentes bases, à savoir globale, locale et intermédiaire. Nous obtenons finalement dans la base intermédiaire $B_\theta(X, V, W)$:

$$\vec{\Omega}_{B_\theta} = \begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_V \\ \omega_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \cos \theta \end{pmatrix}$$

avec $\dot{\psi} \vec{Z}_0 = -\dot{\psi} \sin \theta \vec{X} + \dot{\psi} \cos \theta \vec{W}$ d'après la transformation $B(U, V, Z_0) \xrightarrow{H_\theta} B(X, V, W)$. Nous pouvons alors exprimer le vecteur des vitesses de rotation dans la base locale B_R par la transformation $\Omega_R = H_\phi^T \Omega_{B_R}$. Ce qui nous donne :

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta \\ \dot{\psi} \cos \theta \cos \phi - \dot{\theta} \sin \phi \end{pmatrix}$$

d'où

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$$

En inversant la matrice de passage pour $\theta \neq \frac{\pi}{2} + k\pi$, nous obtenons la matrice $J_2(\eta_2)$ qui permet de lier l'expression des composantes des vitesses de rotations dans le repère global et le repère local.

$$J_2(\eta_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{pmatrix}$$

Le deuxième relation cinématique permet de relier $\dot{\eta}_2$ le vecteur vitesse de rotation par rapport à R_0 exprimé dans R_0 et $\nu_2 = [p, q, r]^T$ le vecteur vitesse de rotation par rapport à R_0 exprimé dans R :

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2 \tag{B.2}$$

Bibliographie

- [Ackermann et Bünte, 1997] ACKERMANN, J. et BÜNTE, T. (1997). Yaw disturbance attenuation by robust decoupling of car steering. *Control Engineering Practice*, 5(8): 1131–1136.
- [Aitouche et Bouamama, 2010] AITOUCHE, A. et BOUAMAMA, B. O. (2010). Sensor location with respect to fault tolerance properties. *International Journal of Automation and control*, 4(3).
- [Alloum, 1994] ALLOUM, A. (1994). *Modélisation et commande dynamique d'une automobile pour la sécurité de conduite*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.
- [Baille *et al.*, 1999] BAILLE, G., GARNIER, P., MATHIEU, H. et PISSARD-GIBOLLET, R. (1999). Le cycab. Rapport technique de l'inria, INRIA, Rhône-Alpes.
- [Bakker *et al.*, 1987] BAKKER, E., NYBORG, L. et PACEJKA, H. (1987). Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies. *Society of Automotive Engineers*, (870421).
- [Barbot *et al.*, 2002] BARBOT, J., DJEMAI, M. et BOUKHOBZA, T. (2002). *Sliding Mode Control in Engineering*, chapitre Sliding mode observers, pages 103–130. Numéro 11 de Control Engineering. Marcel Dekker, New York.
- [Bestle et Zeitz, 1983] BESTLE, D. et ZEITZ, M. (1983). Canonical form observer design for nonlinear time-invariant systems. *International Journal of Control*, 38(2):419–431.
- [Biswas *et al.*, 2003] BISWAS, G., SIMON, G., MAHADEVAN, N., NARASIMHAN, S., RAMIREZ, J. et KARSAI, G. (2003). A robust method for hybrid diagnosis of complex systems. *In Proceedings of the 5th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 1125–1131. Citeseer.

-
- [Blanke *et al.*, 2006] BLANKE, M., KINNAERT, M., LUNZE, J. et STAROSWIECKI, M. (2006). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.
- [Bliman *et al.*, 1995] BLIMAN, P., BONALD, T. et SORINE, M. (1995). Hysteresis operators and tyre friction models. application to vehicle dynamic simulation. *In Proceedings of ICIAM 95*, Hamburg, Germany.
- [Bliman et Sorine, 1993] BLIMAN, P. et SORINE, M. (1993). A system-theoretic approach of systems with hysteresis application to friction modelling and compensation. *In Proceedings of 2nd European Control Conference*, Gröningen, The Netherlands.
- [Bom *et al.*, 2005a] BOM, J., THUILOT, B., MARMOITON, F. et MARTINET, P. (2005a). A global control strategy for urban vehicles platooning relying on nonlinear decoupling laws. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2875–2880.
- [Bom *et al.*, 2005b] BOM, J., THUILOT, B., MARMOITON, F. et MARTINET, P. (2005b). Nonlinear control for urban vehicles platooning, relying upon a unique kinematic gps. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4138–4143.
- [Boucher, 1997] BOUCHER, R. (1997). Sur la modélisation des pneumatiques dans les véhicules à roues. Mémoire de dea, Université de Technologie de Compiègne.
- [Bouibed *et al.*, 2009a] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2009a). *Modelling and Control of a Train of Autonomous Electric Vehicles*, volume 5928 de *Lecture Notes in Computer Science*, subject collections Intelligent Robotics and Applications, pages 126–134. SpringerLink.
- [Bouibed *et al.*, 2009b] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2009b). Modelling and control of a train of autonomous electric vehicles. *In International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, pages 126–134, Singapore.
- [Bouibed *et al.*, 2009c] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2009c). Nonlinear parity space applied to an autonomous vehicle. *In IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 198–203, Changchun, China.

-
- [Bouibed *et al.*, 2009d] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2009d). Nonlinear parity space applied to an electric autonomous vehicle. *Journal of Energy and Power Engineering*, 3(12):10–18.
- [Bouibed *et al.*, 2009e] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2009e). Sensor fault detection by sliding mode observer applied to an autonomous vehicle. In *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications*, pages 621–626, Zouk Mosbeh, Lebanon.
- [Bouibed *et al.*, 2010] BOUIBED, K., AITOUICHE, A. et BAYART, M. (2010). Sensor and actuator fault detection and isolation using two model based approaches : Application to an autonomous electric vehicle. In *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, Marrakech, Morocco.
- [Bouibed *et al.*, 2008a] BOUIBED, K., AITOUICHE, A., RABHI, A. et BAYART, M. (2008a). Estimation des forces de contact roue-sol par un observateur différentiel. In *Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'2008*, Bucarest, Roumanie.
- [Bouibed *et al.*, 2008b] BOUIBED, K., AITOUICHE, A., RABHI, A. et BAYART, M. (2008b). Estimation of contact forces of a four-wheel steering electric vehicle by differential sliding mode observer. In *1st IEEE Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, volume 1019, pages 541–546, Annaba, Algeria.
- [Canudas-De-Wit *et al.*, 2003] CANUDAS-DE-WIT, C., TSIOTRAS, P., VELENIS, E., BASSET, M. et GISSINGER, G. (2003). Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Vehicle System Dynamics*, 39(3):189–226.
- [Chafouk *et al.*, 2007] CHAFOUK, H., HOBLOS, G., LANGLOIS, N., GONIDEC, S. L. et RAGOT, J. (2007). Soft computing algorithm to data validation in aerospace systems using parity space approach. *Journal of Aerospace Engineering*, 20(3):165–171.
- [Chen, 1995] CHEN, Y. (1995). *Effect of communication delays on the performance of vehicle platoons*. Thèse de doctorat, University of California, Berkeley.
- [Chien et Ioannou, 1992] CHIEN, C. C. et IOANNOU, P. (1992). Automatic vehicle following. In *American Control Conference*, pages 1748 –1752.

- [Chien *et al.*, 1994] CHIEN, C. C., IOANNOU, P. et LAI, M. C. (1994). Entrainment and vehicle following controllers design for autonomous intelligent vehicles. *In American Control Conference, 1994*, volume 1, pages 6–10.
- [Chow et Willsky, 1984] CHOW, E. et WILLSKY, A. (1984). Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 29(7):603–614.
- [Christophe *et al.*, 2004] CHRISTOPHE, C., COCQUEMPOT, V. et JIANG, B. (2004). Link between high-gain observer-based and parity space residuals for fdi. *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 26(4):325.
- [Claeys *et al.*, 2001] CLAEYS, X., DEWIT, C. C., YI, J., HOROWITZ, R., ALVAREZ, L. et RICHARD, L. (2001). A new 3d dynamic tire/road friction model for vehicle simulation and control. *In Proceedings of the ASME-IMECE World Conference*, New York, USA.
- [Daviet et Parent, 1996] DAVIET, P. et PARENT, M. (1996). Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon. *In IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 41–46.
- [Davila *et al.*, 2005] DAVILA, J., FRIDMAN, L. et LEVANT, A. (2005). Second-order sliding-mode observer for mechanical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11):1785–1789.
- [Davila *et al.*, 2006] DAVILA, J., FRIDMAN, L. et POZNYAK, A. (2006). Observation and identification of mechanical systems via second order sliding modes. *International Journal of Control*, 79(10):1251–1262.
- [De Wit et Brogliato, 1999] DE WIT, C. et BROGLIATO, B. (1999). Stability issues for vehicle platooning in automated highway systems. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, (Hawaii USA)*, pages 1377–1382.
- [Deur *et al.*, 2001] DEUR, J., ASGARI, J. et HROVAT, D. (2001). A dynamic tire friction model for combined longitudinal and lateral motion. *In proceedings of the ASME-IMECE World Conference*, New York, USA.
- [Deutsch, 1970] DEUTSCH, C. (1970). *Dynamique des véhicules routiers : données de base*. ONSER.

-
- [Ding et Frank, 1991a] DING, X. et FRANK, P. (1991a). An approach to robust residual generation and evaluation. *In IEEE Conference on Decision and Control*, pages 656–661.
- [Ding et Frank, 1991b] DING, X. et FRANK, P. (1991b). Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. *Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes*, pages 271–276.
- [Drakunov, 1992] DRAKUNOV, S. V. (1992). Sliding mode observers based on equivalent control method. *In 31st IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2368–2369, Tucson, Arizona.
- [Drakunov et Utkin, 1995] DRAKUNOV, S. V. et UTKIN, V. I. (1995). Sliding mode observers. *In IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3376–3379.
- [Düstegör et al., 2006] DÜSTEGÖR, D., FRISK, E., COCQUEMPOT, V., KRYSANDER, M. et STAROSWIECKI, M. (2006). Structural analysis of fault isolability in the damadics benchmark. *Control Engineering Practice*, 14(6):597 – 608.
- [Dumont, 2006] DUMONT, P.-E. (2006). *Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 Sciences et Technologies.
- [Emani-Naeini et al., 1988] EMANI-NAEINI, A., AKHTER, M. et ROCK, S. (1988). Effect of model uncertainty on failure detection : The threshold selector. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 33(12):1106–1115.
- [Esfandiari et Khalil, 1989] ESFANDIARI, F. et KHALIL, H. K. (1989). Observer based control of fully linearizable nonlinear systems. *In IEEE Conference On Decision and Control*, pages 84–89.
- [Fancher et al., 1997] FANCHER, P., BERNARD, J., CLOVER, C. et WINKLER, C. (1997). Representing truck tire characteristics in simulations of braking and braking-in-a-turn maneuvers. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 27:207–220.
- [Filippov, 1960] FILIPPOV, A. F. (1960). Differential equations with discontinuous right-hand side. *Mat. Sb. (N.S.)*, 51(93):99–128. version originale en russe, traduite en anglais en 1964.

- [Filippov, 1988] FILIPPOV, A. F. (1988,). *Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides*, volume 18 de *Mathematics and its Applications*. Kluwer Academic Publishers. Originally published in Russian, Hardcover.
- [Gao et al., 2007] GAO, Z., DING, S. X. et MA, Y. (2007). Robust fault estimation for vehicle lateral dynamic systems. *In Supervision and Safety of Technical Processes*, pages 1039 – 1043. Elsevier Science Ltd, Oxford.
- [Gao et Wang, 2006] GAO, Z. et WANG, H. (2006). Descriptor observer approaches for multivariable systems with measurement noises and application in fault detection and diagnosis. *Systems & Control Letters*, 55(4):304 – 313.
- [Garnier et Fraichard, 1996] GARNIER, P. et FRAICHARD, T. (1996). A fuzzy motion controller for a car-like vehicle. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1171–1178.
- [Gauthier et Bornard, 1981] GAUTHIER, J. P. et BORNARD, G. (1981). Observability for any $u(t)$ of a class of nonlinear systems. *IEEE Transaction on Automatic control*, 26(4):922–926.
- [Gillespie, 1992] GILLESPIE, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers.
- [Godbole et Lygeros, 1994] GODBOLE, D. et LYGEROS, J. (1994). Longitudinal control of the lead car of a platoon. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(4):1125–1135.
- [Halder et Sarkar, 2005] HALDER, B. et SARKAR, N. (2005). Robust fault detection based on nonlinear analytic redundancy techniques with application to robotics. *In International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 1–8, Orlando, Florida USA.
- [Heredia et al., 2008] HEREDIA, G., OLLERO, A., BEJAR, M. et MAHTANI, R. (2008). Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters. *Mechatronics*, 18(2):90 – 99.
- [Hermann et Kerner, 1977] HERMANN, R. et KERNER, A. J. (1977). Nonlinear controllability and observability. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22:728–740.

-
- [Isermann, 1984] ISERMANN, R. (1984). Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. *Automatica*, 20(4):387–404.
- [Jiang et Chowdhury, 2005] JIANG, B. et CHOWDHURY, F. N. (2005). Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers. *Journal of the Franklin Institute*, 342(7):725 – 736.
- [Jiang et al., 2004a] JIANG, B., STAROSWIECKI, M. et COCQUEMPOT, V. (2004a). Fault diagnosis based on adaptive observer for a class of non-linear systems with unknown parameters. *International Journal of Control*, 77(4):415–426.
- [Jiang et al., 2004b] JIANG, B., STAROSWIECKI, M. et COCQUEMPOT, V. (2004b). Fault estimation in nonlinear uncertain systems using robust/sliding-mode observers. *Control Theory and Applications*, 151(1):29–37.
- [Jones, 1973] JONES, H. (1973). *Failure detection in linear systems*. Thèse de doctorat, Dept. of Aeronautics and Astronautics, M.I.T., Cambridge, Mass.
- [Lee et al., 1999] LEE, G., KIM, S., YIM, Y., JUNG, J., OH, S. et KIM, B. (1999). Longitudinal and lateral control system development for a platoon of vehicles. In *IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 605–610.
- [Lee et Kim, 2002] LEE, G. D. et KIM, S. W. (2002). A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm. *Mechatronics*, 12(1):97 – 118.
- [Leuschen et al., 2002] LEUSCHEN, M., CAVALLARO, J. et WALKER, I. (2002). Robotic fault detection using nonlinear analytical redundancy. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 456–463 vol.1.
- [Leuschen et al., 2005] LEUSCHEN, M., WALKER, I. et CAVALLARO, J. (2005). Fault residual generation via nonlinear analytical redundancy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(3):452–458.
- [Levant, 1993] LEVANT, A. (1993). Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International Journal of Control ISSN 0020-7179*, 58(6):1247–1263.
- [Levant, 1998] LEVANT, A. (1998). Robust exact differentiation via sliding mode technique. *Automatica*, 34(3):379–384.

- [Lim et Hedrick, 1999] LIM, E. et HEDRICK, J. (1999). Lateral and longitudinal vehicle control coupling for automated vehicle operation. *In American Control Conference*, volume 5, pages 3676–3680.
- [Maquin et Ragot, 2000] MAQUIN, D. et RAGOT, J. (2000). *Diagnostic des systèmes linéaires*. Hermes.
- [Mattei *et al.*, 2005] MATTEI, M., PAVIGLIANITI, G. et SCORDAMAGLIA, V. (2005). Non-linear observers with $h[\infty]$ performance for sensor fault detection and isolation : a linear matrix inequality design procedure. *Control Engineering Practice*, 13(10):1271–1281.
- [Michelin, 2001] MICHELIN (2001). *Le pneu, l'adhérence*. Société de technologie Michelin.
- [M'sirdi *et al.*, 2006a] M'SIRDI, N., RABHI, A., FRIDMAN, L., DAVILA, J. et DELANNE, Y. (2006a). Second order sliding mode observer for estimation of velocities, wheel sleep, radius and stiffness. *In American Control Conference*, pages 3316–3321.
- [M'sirdi *et al.*, 2006b] M'SIRDI, N., RABHI, A., OULADSINE, M. et FRIDMAN, L. (2006b). First and high-order sliding mode observers to estimate the contact forces. *In International Workshop on Variable Structure Systems*, pages 274–279.
- [M'sirdi *et al.*, 2005] M'SIRDI, N., RABHI, A., ZBIRI, N. et DELANNE, Y. (2005). Vehicle-road interaction modelling for estimation of contact forces. *Vehicle System Dynamics*, 43:403–411.
- [M'Sirdi *et al.*, 2007] M'SIRDI, N. K., RABHI, A. et NAAMANE, A. (2007). Vehicle models and estimation of contact forces and tire road friction. *In ICINCO-RA (1)*, pages 351–358, Angers, France.
- [Ndoudi-Likoho, 1997] NDOUDI-LIKOHO, A. D. (1997). *Commande non-linéaire des véhicules multi-corps à roues*. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble.
- [Nicosia et Tornambe, 1998] NICOSIA, S. et TORNAMBE, A. (1998). High-gain observers in the state and the parameter estimation of robots having elastic joints. *System and Control letters*, 13:331–337.

-
- [Nouvelière, 2002] NOUVELIÈRE, L. (2002). *Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse*. Thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines.
- [Nowakowski *et al.*, 1993] NOWAKOWSKI, S., BOUTAYEB, M. et DAROUACH., M. (1993). A bias detection, estimation and correction method for systems with unknown parameters and states : an application to an inverted pendulum. *In International Conference on Fault Diagnosis*, pages 957–962, Toulouse, France.
- [Pacejka et Bakker, 1991] PACEJKA, H. et BAKKER, E. (1991). The magic formula tyre model. *In 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, Delft, The Netherlands.
- [Patton et Chen, 1992] PATTON, R. et CHEN, J. (1992). A review of parity space approaches to fault diagnosis. *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, 1:65.
- [Patton *et al.*, 1989] PATTON, R., FRANK, P. et CLARKE, R. (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems : theory and application*.
- [Patton et Chen, 1997] PATTON, R. J. et CHEN, J. (1997). Observer-based fault detection and isolation : Robustness and applications. *Control Engineering Practice*, 5(5):671 – 682.
- [Petrov et Parent, 2006] PETROV, P. et PARENT, M. (2006). Adaptive control for reversing a two-vehicle platoon. Rapport technique, INRIA.
- [Pham *et al.*, 1994] PHAM, H., HEDRICK, K. et TOMIZUKA, M. (1994). Combined lateral and longitudinal control of vehicles for ivhs. *In American Control Conference*, volume 2, pages 1205 – 1206.
- [Pue, 1977] PUE, A. (1977). A state constrained approach to vehicle follower control for short headway automated transit systems. *In Joint Automatic Control Conference, San Francisco, Calif*, pages 401–407.
- [Rabhi *et al.*, 2004] RABHI, A., IMINE, H., M'SIRDI, N. et DELANNE, Y. (2004). Observers with unknown inputs to estimate contact forces and road profile. *In International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety*, pages 28–31, Genova-Italy.

- [Rabhi *et al.*, 2006] RABHI, A., M'SIRDI, N., FRIDMAN, L. et DELANNE, Y. (2006). Second order sliding mode observer for estimation of road profile. *In International Workshop on Variable Structure Systems*, pages 161–165.
- [Raharijaona *et al.*, 2004] RAHARIJAONA, T., DUC, G. et MAMMAR, S. (2004). H-inf controller synthesis and analysis with application to lateral driving assistance. *In IFAC Symposium on Advance in Automotive Control, Salerno, Italy*.
- [Rajamani *et al.*, 2000] RAJAMANI, R., et BOON KAIT LAW, H.-S. T. et ZHANG, W.-B. (2000). Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(4):695–708.
- [Rodrigues *et al.*, 2008] RODRIGUES, M., THEILLIOL, D., ADAM-MEDINA, M. et SAUTER, D. (2008). A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models. *Control Engineering Practice*, 16(2):225 – 239. Special Issue on Advanced Control Methodologies for Mining.
- [Sauter *et al.*, 1995] SAUTER, D., HAMELIN, F., GHETIE, M. et FONTE, C. (1995). Adaptive residual evaluation for fault detection regarding of model uncertainties : Some methods and results. *Engineering Simulation C/C of Electronnoe Modelirovanie*, 13:773–788.
- [Sheikholeslam, 1990] SHEIKHOESLAM, Shahab, D. C. A. (1990). Longitudinal control of a platoon of vehicles. *In American Control Conference*, volume 1, pages 291 –296.
- [Shen et Hsu, 1998] SHEN, L.-C. et HSU, P.-L. (1998). Robust design of fault isolation observers. *Automatica*, 34(11):1421 – 1429.
- [Shladover, 1978] SHLADOVER, S. (1978). Longitudinal control of automated guideway transit vehicles within platoons. *In American Society of Mechanical Engineers, Winter Annual Meeting, San Francisco, Calif*.
- [Shladover, 1979] SHLADOVER, S. (1979). Operation of automated guideway transit vehicles in dynamically reconfigured trains and platoons (vol ii). Rapport technique, Springfield, VA 22161.

-
- [Sorine et Szymanski, 2000] SORINE, M. et SZYMANSKI, J. (2000). A new dynamic multi d.o.f. tire model. *In Transportation Systems*, Braunschweig, Germany.
- [Stankovic et al., 2000] STANKOVIC, S., STANOJEVIC, M. et SILJAK, D. (2000). Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(5):816–832.
- [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001a] STAROSWIECKI, M. et COMTET-VARGA, G. (2001a). Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37(5):687 – 699.
- [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001b] STAROSWIECKI, M. et COMTET-VARGA, G. (2001b). Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37(5):687 – 699.
- [Suonan et Qi, 2005] SUONAN, J. et QI, J. (2005). An accurate fault location algorithm for transmission line based on r-l model parameter identification. *Electric Power Systems Research*, 76(1-3):17 – 24.
- [Swaroop et al., 2001] SWAROOP, D., HEDRICK, J. et CHOI, S. (2001). Direct adaptive longitudinal control of vehicle platoons. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(1):150–161.
- [Swaroop et Rajagopal, 2001] SWAROOP, D. et RAJAGOPAL, K. (2001). A review of constant time headway policy for automatic vehicle following. *In IEEE Intelligent Transportation Systems*, pages 65 –69.
- [Szymansky, 1999] SZYMANSKY, J. (1999). Modèles réduits du contact pneu-sol et applications à l’automobile. Rapport technique, Renault, Techno-centre Renault, Guyancourt, France.
- [Thau, 1973] THAU, F. E. (1973). Observing the state of non-linear dynamic systems. *International Journal of Control*, 17(1):471–479.
- [Toulotte et al., 2006] TOULOTTE, P., DELPRAT, S. et GUERRA, T. (2006). Longitudinal and lateral control for automatic vehicle following. *In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1 –6.

-
- [Utkin, 1977] UTKIN, V. (1977). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(2):212–222.
- [Walker et Gai, 1979] WALKER, B. et GAI, E. (1979). Fault detection threshold determination techniques using markov theory. *International Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2(4).
- [Wang et al., 2006] WANG, D., PHAM, M., LOW, C. B. et TAN, C. (2006). Development and implementation of a fault-tolerant vehicle-following controller for a four-wheel-steering vehicle. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 13–18.
- [Wang et Qi, 2001] WANG, D. et QI, F. (2001). Trajectory planning for a four-wheel-steering vehicle. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3320–3325.
- [Wang et al., 1997] WANG, G.-B., PENG, S.-S. et HUANG, H.-P. (1997). A sliding observer for nonlinear process control. *Chemical Engineering Science*, 52(5):787 – 805.
- [Wang et Chu, 2005] WANG, Y. et CHU, F. (2005). Real-time misfire detection via sliding mode observer. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4):900 – 912.
- [Weiss, 1988] WEISS, J. (1988). Threshold computations for detection of failures in siso systems with transfer function errors. In *American Control Conferencem*, volume 3, pages 2213–2218.
- [Willisky et Jones, 1976] WILLSKY, A. et JONES, H. (1976). A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 21:108–112.
- [Xia et Gao, 1988] XIA, X.-H. et GAO, W.-B. (1988). Nonlinear observer design by observer canonical forms. *International Journal of Control*, 47:1081–1100.
- [Yan et Edwards, 2007] YAN, X.-G. et EDWARDS, C. (2007). Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer. *Automatica*, 43(9):1605 – 1614.

- [Yang *et al.*, 2010] YANG, H., JIANG, B. et COCQUEMPOT, V. (2010). *Fault tolerant control design for hybrid systems*, volume 397 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Edition springer verlag édition.
- [Yi et Chong, 2005] YI, S.-Y. et CHONG, K.-T. (2005). Impedance control for a vehicle platoon system. *Mechatronics*, 15(5):627 – 638.
- [Zogg *et al.*, 2006] ZOGG, D., SHAFAI, E. et GEERING, H. (2006). Fault diagnosis for heat pumps with parameter identification and clustering. *Control Engineering Practice*, 14(12):1435 – 1444.
- [Zolghadri *et al.*, 1996] ZOLGHADRI, A., HENRY, D. et MONSION, M. (1996). Design of nonlinear observers for fault diagnosis : A case study. *Control Engineering Practice*, 4(11):1535 – 1544.

Résumé :

Ce travail de thèse concerne la conception d'un système de supervision appliqué aux véhicules tout électriques autonomes à quatre roues motrices. Deux méthodes de surveillance sont développées en utilisant le modèle non linéaire du véhicule électrique. La première est basée sur la technique de multi-observateurs pour détecter et isoler les défauts. La deuxième approche est la génération des relations de redondance analytique non linéaires (espace de parité non linéaire). En plus de la génération des résidus par la méthode de l'espace de parité, des observateurs différentiels à modes glissants sont intégrés pour l'estimation des dérivées successives des entrées et des sorties.

Pour réaliser un train de trois véhicules, une commande longitudinale (commande de l'inter-distance) basée sur la mesure de l'écart inter véhiculaire est développée. La commande latérale est basée sur un suivi de trajectoire de référence qu'on impose pour tous les véhicules. Une commande de braquage est alors calculée en fonction de la différence entre la trajectoire mesurée et celle désirée.

Enfin, quelques stratégies de reconfiguration sont développées pour le train de véhicules. Le principe de la reconfiguration est le choix d'une commande prédéfinie en fonction du type de défaut détecté.

Mots-clés : train de véhicules électriques, espace de parité non linéaire, observateur non linéaire à modes glissants, commande de l'inter-distance, suivi de trajectoire, reconfiguration.

Abstract:

This work concerns the design of a supervision system applied to autonomous electric vehicles. Two model based diagnosis methods are developed using the nonlinear model of electric vehicle : The first is based on multiple observers to detect and to isolate faults. The second approach is the generation of nonlinear analytical redundancy relations (nonlinear parity space). In addition to the generation of residuals by the method of parity space, differential sliding mode observers are integrated to estimate the successive derivatives of inputs and outputs.

To make a train of three vehicles, a longitudinal control (control of the safety space) based on the measured space between vehicles is developed. The lateral control is based on a reference path tracking imposed for all vehicles. A steering control is then calculated using the difference between the measured and the desired trajectory.

Finally, some strategies are developed for the reconfiguration of the train of vehicles. The principle of the reconfiguration is the choice of the control for each particular fault.

Keywords: electric vehicles, nonlinear parity space, nonlinear sliding mode observer, safety space control, path tracking, reconfiguration.