

Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 4 décembre 2006

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille
(spécialité Automatique et Informatique Industrielle)

par

Pierre-Emmanuel DUMONT

Composition du jury

<i>Président :</i>	Ahmed El Hajjaji	Professeur, Université de Picardie Jules Verne, Amiens
<i>Rapporteurs :</i>	Hassan Noura Didier Theilliol	Professeur, Université Aix-Marseille III Professeur, Université Henri Poincaré Nancy
<i>Examineurs :</i>	Francois Charpillet Rochdi Merzouki	Directeur de Recherche à l'INRIA, Nancy MdC, Université des Sciences et Technologies de Lille
<i>Co-directeurs :</i>	Mireille Bayart Abdelwahab Aïtouche	Professeur, Université des Sciences et Technologies de Lille Enseignant-chercheur, Hautes Etudes d'Ingénieur, Lille

*"the only life worth living is a life of effort. Live a life of effort.
Persevere within that life but make it one you want to live... Not somebody else's."
du Président Woodrow Wilson*

Remerciements

Ce mémoire est le résultat de travaux menés au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique & Signal (LAGIS UMR CNRS 8146) et sous la direction de Madame Mireille Bayart, Professeur à l'école Polytech'Lille et de Monsieur AbdelWahab Aïtouche, Enseignant chercheur à l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI). Je tiens à leur témoigner toute ma reconnaissance pour l'aide tant scientifique que morale qu'ils ont su m'apporter lors de l'encadrement efficace et chaleureux de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui me font l'honneur de participer à l'examen de ce travail :

Monsieur le Professeur Hassan Noura du Laboratoire des Sciences de l'Information des Systèmes et Monsieur le Professeur Didier Thelliol du Centre de Recherche en Automatique de Nancy qui ont accepté la lourde tâche de rapporteur,

Monsieur le Professeur Ahmed Hajjaji du Centre de Robotique, d'Electrotechnique et d'Automatique d'Amiens, Monsieur le Docteur François Charpillet, directeur de Recherche à l'INRIA et Monsieur le Docteur Rochdi Merzouki de l'Ecole Polytech'Lille pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer au jury. Je remercie particulièrement, Monsieur Rochdi Merzouki pour les longues heures qu'il m'a consacrées pour mieux appréhender la dynamique des véhicules.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à la direction de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur pour m'avoir accueilli dans leur établissement et ainsi avoir pu disposer d'un environnement matériel de qualité et pour leur confiance en m'accordant la responsabilité de dispenser de nombreux cours d'électronique et d'automatique.

Je remercie les nombreuses personnes avec qui j'ai partagé mon bureau, Wassila Hamadene, Nabila Bouzida, Samuel Boudet et Christophe Niesner, ainsi que François Gionco.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai côtoyées durant ces trois années et avec qui j'ai eu plaisir à échanger sur différents thèmes. Ces personnes se reconnaîtront.

S'il y a deux personnes à ne pas oublier et que je remercie profondément, ce sont bien mes parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études.

Enfin, je remercie Dorothée, mon épouse, pour la patience, le soutien et la compréhension qu'elle a témoigné tout au long de ce travail que je lui dédie.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation	7
1.1 Introduction	7
1.2 Commande tolérante passive aux fautes	8
1.2.1 Approches robustes	8
1.2.2 Approche par stabilisation simultanée	9
1.2.3 Approches adaptatives	10
1.3 Commande tolérante active aux fautes	11
1.3.1 Le contrôleur reconfigurable et ses besoins par rapport à la surveillance . .	13
1.3.2 Surveillance	18
1.3.3 Mécanisme de reconfiguration du contrôleur	34
1.4 Conclusion	36
Chapitre 2 Analyse d'un système non linéaire en vue de la mise en place d'un système tolérant aux fautes	37
2.1 Introduction	37
2.2 Détermination des propriétés d'observabilité et d'accessibilité d'un système non linéaire	38
2.2.1 Observabilité	38
2.2.2 Accessibilité d'un système	41
2.2.3 Conclusion	44
2.3 Propriété de redondance et de minimalité des ensembles d'actionneurs et de capteurs	44
2.3.1 Analyse de la tolérance aux fautes d'un système du point de vue des capteurs	45
2.3.2 Analyse de la tolérance aux fautes d'un système du point de vue des actionneurs	49
2.3.3 Représentation graphique des sous-ensembles de capteurs (d'actionneurs) redondants	53
2.3.4 Evaluation de la tolérance aux fautes	55

2.3.5	Exemple d'analyse de la tolérance aux fautes de capteurs sur un système non linéaire	56
2.3.6	Conclusion	60
2.4	RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability)	60
2.4.1	Introduction au RTBNE à travers un exemple	61
2.4.2	Méthode de détermination du RTBNE	63
2.4.3	Conclusion sur le RTBNE	67
2.5	Conclusion	68

Chapitre 3 Mise en place d'une commande tolérante aux fautes sur un véhicule électrique 69

3.1	Introduction	69
3.2	Modélisation de RobuCar	70
3.2.1	Description de RoBucar	70
3.2.2	Sur la modélisation dynamique de véhicule	72
3.2.3	Modélisation dynamique de RobuCar	77
3.3	Analyse des capacités de RobuCar à tolérer les fautes	84
3.3.1	Du point de vue des capteurs	85
3.3.2	Du point de vue des actionneurs	86
3.3.3	Conclusion sur l'analyse de la tolérance aux fautes	87
3.4	Calcul d'une commande pour le système en fonctionnement normal	87
3.4.1	Mise en place d'une commande par bouclage linéarisant	87
3.4.2	Suivi de trajectoire à une vitesse de référence	97
3.4.3	Conclusion sur la commande du système en fonctionnement normal	99
3.5	Mise en place d'une commande tolérante active aux fautes d'actionneurs	100
3.5.1	Module de surveillance	101
3.5.2	Calcul d'une banque de contrôleurs pour différents cas de défaillances et stratégie de reconfiguration	103
3.6	Conclusion	105

Chapitre 4 Simulation et résultats 107

4.1	Introduction	107
4.2	Fonctionnement du système sans défaut	109
4.3	Fonctionnement du système suite à des défaillances d'actionneurs	113
4.3.1	Défaillance sur le moteur de traction de la roue avant gauche	113
4.3.2	Défaillance sur le moteur de direction avant	117
4.4	Conclusion	127

Conclusion générale et Perspectives	129
Bibliographie	133
Annexe A Description de RoBucar	145
A.1 Description des Capteurs	148
A.2 Description des actionneurs	149
A.2.1 Module de direction	149
A.2.2 Module de traction	150
A.2.3 Module de freinage	151
A.2.4 Le joystick de commande	151
A.3 Les différents modes de fonctionnement de RobuCar	152
Annexes	145
Annexe B Linéarisation du modèle de RobuCar autour d'un point de fonctionnement	153

Introduction générale

Le développement de l'automatisation des systèmes industriels a pour objectif d'améliorer sans cesse leurs performances. Cette course à la performance conduit à la mise en place de systèmes de plus en plus complexes multipliant ainsi les risques de dysfonctionnements pouvant mettre en péril le système lui-même et son environnement.

Il est donc nécessaire d'implanter sur ces systèmes une commande capable de fonctionner malgré des défaillances d'actionneurs, de capteurs ou de processus.

Lorsque des défauts se produisent, un système de surveillance doit permettre de les détecter et de les localiser le plus rapidement possible et transmettre cette information à un module de reconfiguration.

Le module de reconfiguration peut ensuite modifier la loi de commande du processus afin de s'adapter au nouvel état du système (en défaut).

Le processus avec ses capteurs, actionneurs et contrôleurs, le module de surveillance et le module de reconfiguration forment un ensemble appelé système de commande tolérante active aux défauts (AFTCS : Active Fault Tolerant Control System).

L'AFTCS est donc utilisé pour préserver la capacité d'un système à accomplir les objectifs souhaités, ou le cas échéant, à atteindre de nouveaux objectifs (réalisables) pour éviter tant que possible des comportements catastrophiques au niveau matériel mais surtout humain.

Ainsi, le travail de recherche réalisé durant ces trois années de thèse a eu pour but de mettre en place un système de commande tolérante aux fautes majeures sur un système non linéaire affine en la commande. Ce travail s'est déroulé en plusieurs étapes que nous allons décrire maintenant.

Lorsqu'un système est modélisé, il est nécessaire de l'analyser afin de connaître ses capacités à tolérer les défauts. Peu de papiers font référence à l'analyse des redondances de systèmes non linéaires. J'ai donc travaillé sur ce domaine et d'abord du point de vue des capteurs. Les notions existantes en linéaire et décrites dans [Hoblos, 2001] ont été étendues au cas des systèmes non linéaires [Dumont *et al.*, 2004a]. Une étude similaire a également été réalisée du point de vue des actionneurs [Dumont *et al.*, 2004b]. Afin d'aller plus loin dans l'analyse des systèmes en vue de la mise en place d'une commande tolérante aux fautes, j'ai introduit un nouvel indice appelé RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability). Cet indice indique le temps dont nous disposons suite à la perte d'un élément d'un ensemble de capteurs initial pour détecter et localiser

le composant défaillant et pour reconfigurer le système tout en gardant l'état ou une partie de l'état estimable [Dumont *et al.*, 2005b].

Si le système est capable de tolérer les fautes, nous pouvons alors envisager la mise en place d'une commande tolérante aux fautes. Différentes techniques de commandes tolérantes aux fautes existent. Parmi celles-ci, la mise en place d'un AFTCS au niveau des actionneurs reçoit encore trop peu d'attention. Ainsi, pour la conférence IFAC SafeProcess entre 2000 et 2006 (qui est une référence dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et du diagnostic), comme le montre le tableau 1, le nombre de contributions selon chaque type de panne est très faible. De même, le nombre de contributions (cf tableau 2) d'AFTCS utilisant la reconfiguration est faible. Cependant, ce nombre augmentant fortement depuis 2000, nous pouvons croire en l'avenir de ce type de commande tolérante active que nous avons choisi d'étudier dans ce mémoire.

	SafeProcess'00	SafeProcess'03	SafeProcess'06
Actionneur	3	6	5
Capteur	5	5	3
Procédé	1	2	3
Régulateur	0	1	2

TAB. 1 – Nombre de contributions à SafeProcess en AFTCS selon la nature des pannes considérées

	SafeProcess'00	SafeProcess'03	SafeProcess'06
Accomodation	5	9	2
Reconfiguration	4	6	10

TAB. 2 – Nombre de contributions à SafeProcess en AFTCS utilisant l'accomodation et la reconfiguration

Le mécanisme de reconfiguration [Dumont *et al.*, 2006a] que nous avons choisi de mettre en place sur un système non linéaire affine en la commande consiste d'abord à surveiller le système en utilisant la théorie de l'élimination à partir des relations de redondance analytique puis à le reconfigurer en commutant la loi de commande du mode nominal au mode correspondant au(x) défaut(s) détecté(s) et localisé(s). Dans ce système tolérant aux fautes, les différentes lois de commande pour les différents cas de défaillance(s) sont déterminés hors ligne.

Tout ce qui a été développé de manière théorique a ensuite été appliqué à un véhicule électrique expérimental, appelé RobuCar en considérant uniquement des défauts majeurs d'actionneurs. Pour cette application, la dynamique de RobuCar a, pour la première fois, été modélisée en considérant le véhicule dans sa globalité et en tenant compte de trois degrés de liberté : les

dynamiques longitudinale et transversale du véhicule ainsi que le lacet . Cette modélisation [Dumont *et al.*, 2006b] nous conduit à un système non linéaire affine en la commande. L'AFTCS à implanter ensuite sur le véhicule doit lui permettre de suivre une trajectoire de consigne à une vitesse donnée en état normal de fonctionnement mais aussi en cas de défaillance sur un ou plusieurs moteurs.

Les quatre chapitres de ce mémoire reprennent donc les points précédents dans l'ordre suivant :

- Tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation
- Analyse d'un système non linéaire en vue de la mise en place d'un système tolérant aux fautes
- Mise en place d'une commande tolérante aux fautes sur un véhicule électrique
- Simulation de la commande tolérante aux fautes mise en place sur le véhicule et analyse des résultats.

Dans le premier chapitre, différentes techniques de commande tolérante aux fautes sont présentées et classées selon deux catégories (passive et active). Nous insistons plus sur la méthode active qui est utilisée dans le mémoire. L'AFTCS est donc présenté en commençant par le principe de cette technique de tolérance aux fautes puis par la description du module de surveillance et notamment la surveillance de système non linéaire et enfin par la description du mécanisme de reconfiguration.

Dans le second chapitre consacré à l'analyse de systèmes non linéaires en vue de la mise en place d'une commande tolérante aux fautes, l'accent sera d'abord mis sur la détermination des propriétés d'observabilité et d'accessibilité (et de commandabilité) non linéaires. Ensuite, l'étude se poursuivra par la recherche des redondances d'information présentes sur un système non linéaire pour connaître les capteurs (actionneurs) qui peuvent être perdus en gardant l'état ou une partie de l'état observable (accessible). L'analyse se termine par l'introduction du RTBNE déjà mentionné précédemment.

Le troisième chapitre est consacré à la mise en place d'un AFTCS sur le véhicule autonome expérimental (RobuCar) dont dispose le LAGIS. Une brève description de RobuCar suivie d'une présentation sur la dynamique des véhicules nous permet de modéliser la dynamique du véhicule par un système non linéaire affine en la commande. Disposant de ce modèle non linéaire pour RobuCar et suite à l'analyse des capacités du système à tolérer des défaillances, nous mettons en place un système de commande tolérante active aux défaillances d'actionneurs.

Au cours du dernier chapitre, le véhicule muni d'une commande tolérante aux fautes sera d'abord testé en fonctionnement normal puis sa réaction suite à différentes défaillances d'actionneur(s) sera analysée. Ainsi, des défaillances sur des moteurs de traction et des moteurs de direction

seront simulées.

Enfin, une conclusion synthétisera les résultats obtenus et montrera l'apport de ce travail de recherche avant de donner quelques perspectives pour la mise en place d'un système de commande tolérante active sur RobuCar, travail qui ne fait que commencer et demande encore beaucoup d'investigation.

Chapitre 1

Tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation

1.1 Introduction

Pour améliorer la fiabilité et la sécurité d'un système, la commande tolérante aux fautes devient extrêmement importante. Les systèmes de commande tolérante aux fautes sont des systèmes de commande capable de s'accommoder d'un défaut de composant et de maintenir la stabilité du système ainsi que des performances acceptables suite à l'occurrence de telles défaillances.

De façon générale, les systèmes de commande tolérante aux fautes peuvent être divisés en deux classes [Patton, 1997] : les systèmes de commande tolérante active (AFTCS : Active Fault Tolerant Control System) et passive (PFTCS : Passive Fault Tolerant Control System) aux défauts.

Les PFTCS sont conçus en considérant un ensemble de défaillances probables. Ils sont donc limités par la possibilité de ne s'occuper que des défaillances anticipées.

A l'opposé, les AFTCS réagissent en ligne à l'occurrence de défauts en tentant de maintenir le système stable et performant. Les deux principaux avantages des AFTCS sont :

- La capacité à faire face à des défauts inconnus grâce à un module de détection et de localisation des fautes et à une commande de la reconfiguration.
- La possibilité d'atteindre des performances optimales.

Pour ces deux raisons et même si elle est généralement plus complexe à mettre en oeuvre, nous choisissons de nous orienter vers la commande tolérante active.

Dans ce chapitre, nous présenterons rapidement la commande tolérante passive avant de nous étendre sur la commande tolérante active aux fautes. Cette dernière nécessite d'avoir en amont

de la commande un système de surveillance capable de détecter et de localiser les défauts. Dans certains cas, il est même nécessaire de déterminer la nature du défaut. En aval du module de surveillance, l'AFTCS comprend un module de reconfiguration dont le mécanisme est expliqué à la fin de ce chapitre.

1.2 Commande tolérante passive aux fautes

Parmi les PFTCS, nous présenterons succinctement trois approches :

- la commande robuste
- la stabilisation simultanée des systèmes
- la commande adaptative également considérée parfois comme une commande tolérante active.

1.2.1 Approches robustes

La commande robuste est bien adaptée à la commande de systèmes contenant des incertitudes paramétriques. Elle vise à minimiser un critère de dispersion des résultats pour toutes les valeurs possibles des paramètres incertains. L'objectif est de garantir la stabilité et un niveau de performance acceptable pour les systèmes commandés malgré des incertitudes sur les paramètres et/ou des dynamiques négligées dans le modèle du processus.

L'insensibilité et la robustesse d'un système vis à vis des perturbations et des erreurs de modélisation est un problème souvent difficile à résoudre. Il n'est pas possible d'obtenir une parfaite égalité entre le modèle mathématique et le processus réel avec une description précise des perturbations introduites par l'environnement (entrées non modélisées, ...); ce qui limite l'efficacité de ce type d'approches en présence d'un défaut.

Les approches robustes ont fait l'objet de nombreux travaux. Selon le type d'incertitudes paramétriques considéré, nous pouvons citer une brève classification de quelques méthodes. En effet, dans le cas où les incertitudes paramétriques sont structurées, les approches utilisées généralement sont la méthode QFT (Quantitative Feedback Theory) [Horowitz *et al.*, 1985] et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) [Oustaloup, 1993]. Lorsque ces incertitudes sont non structurées (majoration d'une norme), on peut citer des méthodes telles que l'optimisation à sensibilité mixte [Kwakernaak, 1993] et la synthèse H_∞ [Murad *et al.*, 1996]. Les incertitudes portant sur les matrices de la représentation d'état du système sont notamment utilisées par les approches quadratiques [Wu, 1998].

Des approches multimodèles peuvent aussi être utilisées afin de considérer tous les états paramétriques possibles sans qu'un pessimisme ne soit introduit. C'est le cas du placement de valeurs et vecteurs propres [Magni et Manouan, 1994], ou encore du placement de pôles avec calibrage des fonctions de sensibilités [Landau *et al.*, 1993]. L'évolution des paramètres du procédé quand elle peut être mesurée permet aussi d'élaborer des commandes robustes linéaires à

paramètres variants. Néanmoins, sans que les incertitudes soient explicitement prises en compte, il est souvent possible de synthétiser une commande robuste en utilisant le placement de pôles [M'Saad et Chebassier, 1996].

Au niveau de la tolérance aux fautes de ces méthodes, elle est assez limitée. En effet, en boucle fermée, la loi de commande ne peut être tolérante qu'à certains types de défauts et surtout aux incertitudes paramétriques du système.

1.2.2 Approche par stabilisation simultanée

Le principe de l'approche par stabilisation simultanée de systèmes est le suivant :

Soient les systèmes décrits par les fonctions de transfert $T_0(s)$, $T_1(s)$, ..., $T_n(s)$. $T_0(s)$ représente le fonctionnement nominal du système et $T_1(s)$, ..., $T_n(s)$ son fonctionnement en présence de n défaillances différentes. La question se pose de la manière suivante : existe-t-il un régulateur K , tel que le système $T_i(s)[I + K(s)T_i(s)]^{-1}$ (où $i = 1, \dots, n$) soit stable ? Donc, le problème revient à déterminer un seul régulateur capable de garder le système stable après l'apparition d'un défaut.

La figure 1.1 montre le schéma de régulation des n systèmes.

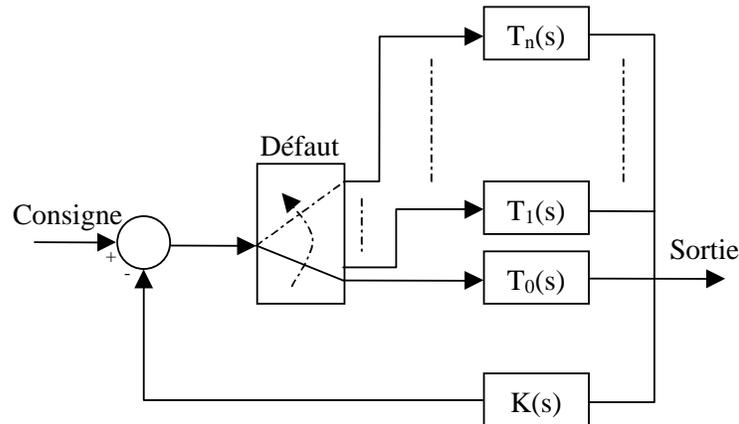


FIG. 1.1 – Approche par stabilisation simultanée

A la suite des travaux de Youla et al. [Youla *et al.*, 1974], donnant la condition nécessaire et suffisante pour qu'un système puisse être stabilisé par un régulateur asymptotiquement stable, plusieurs auteurs ont traité le problème de la stabilisation simultanée des systèmes. Un critère géométrique a été proposé par Saeks et Murray [Saeks et Murray, 1982] pour résoudre ce problème. Cependant, leur solution est difficile à mettre en oeuvre dans le cas où $n > 2$. Vidyasagar et Viswanadham [Vidyasagar et Viswanadham, 1982] ont démontré que le fait de stabiliser simultanément $n + 1$ systèmes est équivalent à stabiliser simultanément n systèmes en utilisant

un régulateur stable. Plus tard, Ghosh et Byrnes [Ghosh et Byrnes, 1983], puis Howitt et Luus [Howitt et Luus, 1991] ont cherché à stabiliser simultanément une famille de systèmes linéaires décrits sous forme de fonctions de transfert à l'aide d'un régulateur linéaire. L'utilisation d'un régulateur non linéaire pour stabiliser simultanément une famille de systèmes linéaires sous forme d'état, a été traitée par Petersen [Petersen, 1987]. Noura et al. [Noura *et al.*, 1993] ont étudié le problème de la stabilisation simultanée dans le cas où $n = 2$, tout en gardant les performances proches des performances nominales.

1.2.3 Approches adaptatives

Enfin la dernière approche citée dans les PFTCS est la commande adaptative [Landau *et al.*, 1997] qui comprend l'ensemble des techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs, afin de maintenir un certain niveau de performances quand des paramètres θ du procédé à commander sont inconnus et/ou variant dans le temps. Elle utilise des méthodes d'identification en ligne pour estimer régulièrement la valeur des paramètres θ et résoudre le problème de commande pour les variations de θ .

Le principe d'un système de commande adaptative peut être illustré par la figure 1.2 :

On distingue deux approches principales pour la commande adaptative :

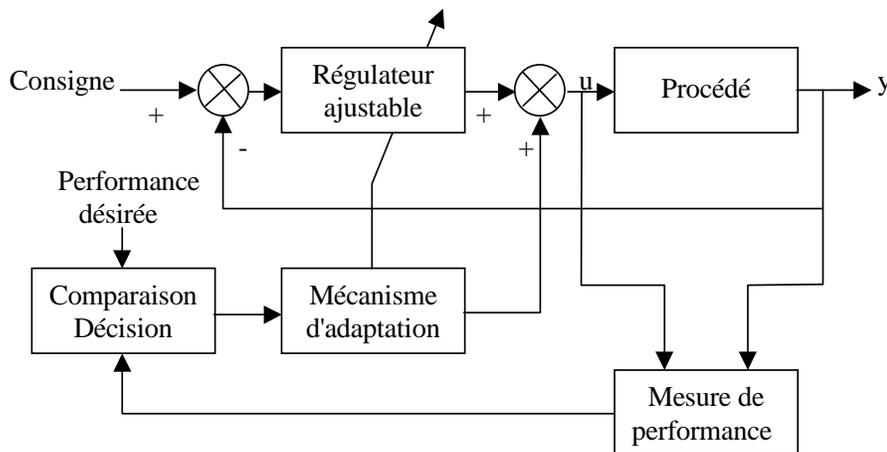


FIG. 1.2 – Principe général d'un système de commande adaptative

- Commande adaptative directe : les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de comparaisons entre performances réelles et performances désirées. Comme exemple, on cite la méthode de commande adaptative à modèle de référence implicite [Huang et Stengel, 1990], et explicite [Morse et Ossman, 1990].
- Commande adaptative indirecte : les paramètres du processus sont estimés par une procédure

d'identification, c'est le cas des régulateurs auto-ajustables (commande par placement de pôles adaptatifs). Ce type de commande adaptative est plus utilisé que le premier du fait qu'il tient compte des caractéristiques d'évolution du processus. Comme exemple, nous pouvons citer une méthode appliquée au domaine de l'aéronautique, l'approche de la linéarisation de la rétroaction [Ochi et Kanai, 1991] [Ochi, 1993].

La tolérance aux fautes de ces méthodes reste encore limitée mais comparée à la commande robuste ou par stabilité simultanée, les techniques de la commande adaptative sont plus tolérantes parce que le calcul de la loi de commande dépend de l'état actuel des paramètres du procédé.

1.3 Commande tolérante active aux fautes

Comme présenté sur la figure 1.3, les AFTCS sont normalement constitués de quatre sous-systèmes [Zhang et Jiang, 2006] :

- Un contrôleur reconfigurable (CR)
- Un module de détection et de localisation des défaillances (FDI)
- Un mécanisme de reconfiguration du contrôleur
- Un générateur de consigne

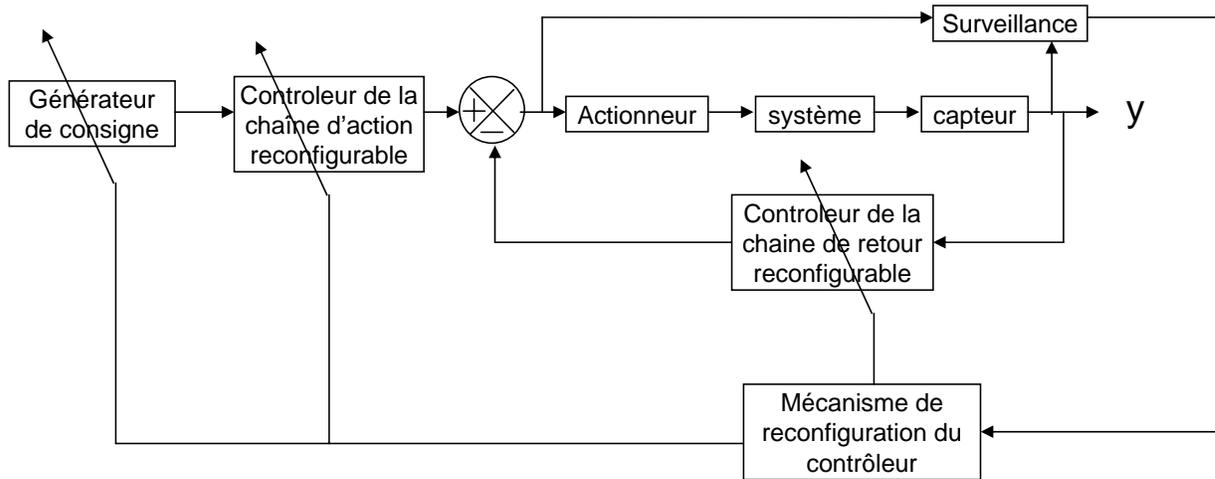


FIG. 1.3 – Structure générale d'un AFTCS

L'inclusion du module de surveillance et du contrôleur reconfigurable dans la structure globale du système est la principale caractéristique qui distingue les AFTCS des PFTCS. Dans les AFTCS, le problème consiste à concevoir :

- Une commande reconfigurable
- Une module de FDI avec une bonne sensibilité aux défaillances et une bonne robustesse par rapport aux incertitudes du modèle, aux variations des conditions d'utilisation et aux pertur-

bations extérieures

- Un mécanisme de reconfiguration qui permette de recouvrir les performances du système avant le défaut le mieux possible en présence d'incertitude et de retard dans l'information donnée par le module FDI et avec les contraintes de la commande, du système et des limites de la sortie

Le problème des AFTCS est la limite du temps disponible pour la surveillance et la reconfiguration des contrôleurs. De plus, en cas de défaillance, la stabilité, les performances du régime transitoire et permanent, la robustesse aux bruits, incertitudes et perturbations sont des problèmes à considérer pour les AFTCS.

Le comportement du système global dépend non seulement de la qualité de l'ensemble des composants mais aussi de leur interaction en temps réel.

Les quatre sous-systèmes fonctionnent de manière séquentielle, c'est-à-dire que lorsqu'une défaillance apparaît sur le système, le module de surveillance ne va pas seulement signaler le défaut mais il est supposé donner suffisamment d'informations à propos du défaut au module de reconfiguration de la commande. Par la suite, la stratégie de reconfiguration de la commande avec le probable réajustement de la consigne d'entrée est envoyée au contrôleur pour son exécution. Les contrôleurs peuvent être implémentés au niveau matériel ou logiciel. Grâce au progrès technologique de l'informatique et à l'utilisation de la redondance analytique en tolérance active, l'implémentation de contrôleur de manière logicielle est de plus en plus prépondérante.

Bien que le développement des AFTCS soit relativement récent, de nombreuses techniques de surveillance ont déjà été mises en oeuvre et nous les synthétiserons dans le paragraphe 1.3.2.

Différentes méthodes de reconfiguration de la commande basées sur la connaissance du modèle ont été développées. Il est à noter que la plupart de ces méthodes supposent que le module de détection fonctionne et que le modèle de défaillance du système est connu. Lors de la mise en place du module d'AFTCS, il est essentiel d'examiner quels types d'information provenant de la FDI sont nécessaires à une stratégie de reconfiguration raisonnable et du point de vue de la FDI, il faut déterminer quels types d'information peuvent être délivrés. L'apport et la demande entre ces deux sous-systèmes doit correspondre, sinon, le système global ne fonctionnera pas correctement. Un résultat incorrect ou trop en retard de la FDI ne risque pas seulement de donner une perte de performance mais risque également de conduire à une instabilité du système. Un mécanisme de reconfiguration de la commande inapproprié basé sur une information incorrecte de la surveillance va aussi conduire à de faibles performances et même à la perte de stabilité du système. Il est également très important d'insister sur le fait que cette action est réalisée dans un intervalle de temps limité. La durée de cette intervalle dépend de l'application, des conditions de fonctionnement du système à l'apparition du défaut et de la sévérité de la faute. Comme exemple, pour la plupart des applications en aérospatiale, cet intervalle peut être inférieur à quelques secondes. Ainsi, un avion volant à 1000m d'altitude dispose, en cas de défaillance, d'un temps très

court pour reconfigurer la commande. A l'inverse, un système chimique est relativement lent et le temps disponible pour la FDI et la CR est généralement beaucoup plus long.

1.3.1 Le contrôleur reconfigurable et ses besoins par rapport à la surveillance

Objectif de la reconfiguration de la commande

Pour démontrer les objectifs de la reconfiguration de la commande, considérons un système dynamique linéaire avec des défauts de composants inconnus décrits par le modèle suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & t < t_f \\ y = Cx & \\ \dot{x} = A_f x + B_f u & t \geq t_f \\ y = C_f x & \end{cases} \quad (1.1)$$

(Lorsque $t < t_f$, le système est en fonctionnement normal et lorsque $t \geq t_f$, le système est en défaut).

Pendant le fonctionnement normal du système, les matrices du système sont représentées par $\{A, B, C\}$. Une fois l'apparition du défaut à un instant inconnu avec des changements non connus dans le système, les matrices du système deviennent $\{A_f, B_f, C_f\}$. Les changements dans chaque matrice induits par la faute, dépendent du type de faute (défaut d'actionneur, de capteur, du process ou du régulateur) et de la sévérité de la faute. D'autres formes de modélisation de la faute qui peuvent être formulées comme des termes de perturbations qui s'additionnent sont aussi largement utilisés [Chen et Patton, 1999] [Simani *et al.*, 2003].

Pour la structure de commande tolérante aux fautes de la figure 1.3, supposons qu'il existe un contrôleur conçu pour le système en fonctionnement nominal avec une structure en commande par retour d'état comme suit :

$$u = Kx + Hr \quad (1.2)$$

L'objectif dans la conception du module de reconfiguration de la commande est alors de calculer un nouveau contrôleur (contrôleur reconfigurable), en réponse au changement induit par la défaillance dans le système, tel que la stabilité et les performances du système en boucle fermée (régime transitoire et permanent) puissent être maintenues.

Le signal de commande modifié est maintenant déterminé par le contrôleur reconfiguré K_f comme indiqué dans l'équation 1.3 et qui est basé sur le modèle du système en défaut $\{A_f, B_f, C_f\}$ de l'équation 1.1 en utilisant des méthodes de conception de commande comme par exemple le placement de pôle combiné avec un générateur de commande de poursuite développé dans [Zhang et Jiang, 2002].

$$u = K_f x_k + H_f r_k \quad (1.3)$$

La principale tâche des différentes stratégies de module de reconfiguration de la commande est de trouver un contrôleur. Différentes méthodes atteignant cet objectif peuvent recouvrir les performances initiales à différents niveaux. Cependant, pour rendre possible le calcul d'un contrôleur reconfigurable, le modèle du système après le défaut doit être connu, c'est-à-dire que la valeur des matrices $\{A_f, B_f, C_f\}$ doit être disponible pour calculer K_f après que le défaut ait été détecté, localisé et identifié. De ceci émane le besoin que la FDI puisse fournir aussi rapidement et précisément que possible les valeurs de $\{A_f, B_f, C_f\}$ c'est-à-dire le modèle du système en défaut et aussi l'instant où le défaut est apparu.

Dans le cas de structure de commande plus complexe, tel que le modèle de contrôle de référence décrit dans [Bodson et Groszkiewicz, 1997] [Zhang et Jiang, 2003b], un gain de contrôleur reconfigurable supplémentaire associé au modèle de référence est nécessaire. La structure de commande, très connue, à base de contrôleur proportionnel-intégral peut aussi être utilisée [Musgrave *et al.*, 1997] [Noura *et al.*, 2000] [Zhang et Jiang, 2001].

Les stratégies existantes de reconfiguration de la commande

Dans la littérature, les méthodes de reconfiguration de la commande tournent autour des approches suivantes : régulateur à commande optimale, contrôleur utilisant la méthode de la pseudo-inverse, contrôleur à variation du gain ou variation des paramètres linéaires, commande adaptative, commande par placement de pôle, modèle multiple, retour linéarisant ou inversion dynamique, H_∞ , commande prédictive, commande à mode glissant ou à structure variable, commande intelligente utilisant des systèmes experts, des réseaux de neurones, la logique floue et des méthodologies d'apprentissage, etc...

Une classification détaillée peut être faite selon des critères comme :

- Les outils de conception mathématique
- Les approches de conception
- Les mécanismes de reconfiguration
- Les types de systèmes à gérer

Cette classification non exhaustive, détaillée dans [Zhang et Jiang, 2003a] est présentée sur la figure 1.4. Bien que différentes méthodes utilisent différentes stratégies de conception, le but de la conception d'un module de reconfiguration de la commande est en fait le même. L'objectif est de trouver un nouveau contrôleur tel que le système en défaut ait, dans un certain sens [par exemple aussi prêt que possible en terme de pôle (placement de pôle), norme de Frobenius minimale entre les deux systèmes de matrices (méthode de la pseudo inverse), indice minimum pour la performance de la commande optimale] les mêmes ou des performances similaires en boucle fermée au système sans défaut. Selon l'application et l'importance du défaut, dans certain cas, des performances dégradées doivent être acceptées [Blanke *et al.*, 2003] [Zhang et Jiang, 2003b].

Outils de conception mathématiques	Régulateur à commande optimale (LQR)	
	Méthode de la pseudo-inverse (PIM)	
	Contrôleur intelligent (IC)	
	Contrôleur à gain variable (GS)	
	Contrôleur à paramètres linéaires variable (LPV)	
	Suivi de modèle (MF)	
	Contrôle adaptatif (AC)	
	Modèles multiples (MM)	
	Contrôle et diagnostic intégré	
	Commande par placement de pôles (EA)	
	Linéarisation par retour d'état (FL)	
	Inversion dynamique (DI)	
	H_∞ et les autres techniques de commande robuste	
	Commande par modèle prédictif (MPC)	
	Quantitative Feedback Theory (QFT)	
	Matrice à contraintes inégalités (LMI)	
	Commande à structure variable (VSC)	
Commande à mode glissant (SMC)		
Commande à modèle interne généralisé (GIMC)		
Approches de conception	Lois de commande calculées hors-ligne	MM
		GS/LPV
		QFT
		LMI
		GIMC
	Lois de commande calculées en-ligne	LQR
		PIM
		MF/AC
		EA
		FL/DI
		VSC/SMC
		MPC
	Mécanisme de reconfiguration	Optimisation
H_∞ et μ synthesis		
LMI		
MPC		
Commutation		MM
		GS/LPV
		VSC/SMC
Correspondance avec fonctionnement nominal		PIM – System matrix
		EA - Eigenstructure
Suivi		MF – State/Output
		MPC – Set-point/Output
Compensation		Compensation additive
		Compensation adaptative
Type de systèmes à commander	Système linéaire	LQR, PIM, MF, EA, MM
		MPC, QFT, GIMC
	Système non linéaire	GS/LPV, MM, FL/DI
		LMI, VSC/SMC, IC

FIG. 1.4 – Classification des méthodes de conception des commandes reconfigurables utilisées dans les AFTCS

Un besoin commun pour l'utilisation de ces méthodes est d'avoir une connaissance précise du modèle mathématique qui décrit la dynamique du système après le défaut. A cause des différentes natures possibles du défaut, ces modèles ne peuvent être connus à priori. Ils doivent donc être obtenus en ligne. Ceci implique d'avoir un module de détection et de diagnostic fonctionnant en temps réel afin de fournir les informations sur le défaut et sur la description du modèle suite au défaut. Si les modes de défaut du système peuvent être bien décrits par un ensemble fini de modèle en défaut prédéterminé ou qu'un ensemble fini de mode de défaut est considéré pour la reconfiguration, alors une approche basée sur des modèles multiples et des commandes à gain variable peut être utilisée [Boskovic et Mehra, 2002] [Thelliol *et al.*, 2003] [Yen et Ho, 2003].

Il est à noter que plusieurs approches utilisant la commande robuste comme le H-infini, la QFT et la méthode de la matrice à contrainte inégalité (LMI) sont incluses dans la liste ci-dessus. Certains lecteurs peuvent le contester en disant que ces méthodes devraient plutôt se trouver dans la catégorie de la PFTCS puisqu'un seul contrôleur fixe est utilisé dans ces méthodes pour gérer différents scénarii de défaillances grâce à une conception hors-ligne. C'est pour cette raison qu'elles ont été incluses dans les PFTCS. Cependant, elles sont incluses également ici puisque ces techniques peuvent être utilisées comme des contrôleurs robustes d'une reconfiguration de la commande dans le cadre de l'AFTCS comme montré par exemple dans [Shin *et al.*, 2004] en utilisant le contrôleur LPV basé sur la matrice à contraintes inégalités pour la reconfiguration de la commande.

Un critère important pour juger si une méthode de commande est adaptée à l'AFTCS est de savoir si elle peut être implémentée de manière à maintenir des performances acceptables (en mode nominal et dégradé). De ce point de vue, les points suivants doivent être satisfaits :

- La reconfiguration de la commande doit être faite en fonction des contraintes de temps réel.
- Les contrôleurs correspondants aux défauts doivent être calculés automatiquement sans délai important et sans interaction humaine.
- Les méthodes utilisées doivent fournir une solution même si cette solution n'est pas optimale.

Les suppositions communes à tous les systèmes de commande tolérante active

La plupart des travaux de recherche dans le domaine de la commande tolérante aux fautes a été développée en supposant qu'un module de FDI fonctionnant parfaitement était disponible et que le modèle du système après le défaut était connu parfaitement. Ainsi, les objectifs du module de reconfiguration de la commande consistaient uniquement à déterminer un contrôleur stabilisant basé sur la connaissance du modèle du système en défaut et sur le temps de détection et de localisation du défaut pour recouvrir les performances nominales.

En d'autres termes, les lois de commande du système en défaut sont calculées sans aucune interaction avec le module de FDI. C'est très rarement le cas en pratique. Ainsi, il n'y a pas

de garantie que le module de reconfiguration et le module de surveillance calculés séparément fonctionnent en harmonie dans un environnement temps réel. De plus, l'effet des défaillances des composants du système se traduit souvent par une diminution de la marge de stabilité du système ou même à la perte de stabilité si aucune action corrective n'est utilisée. Pour maintenir l'intégrité du système complet, il est souhaitable que le défaut sur le système soit détecté et identifié rapidement et que l'action corrective d'un contrôleur soit mise en route immédiatement. D'un autre côté, la clé du problème de l'AFTCS est la reconfiguration en ligne des contrôleurs. Pour que ce soit possible, des informations rapides et correctes sur l'apparition du défaut sont nécessaires pour activer le mécanisme de reconfiguration. De plus, il est indispensable de savoir quelle partie du système est en défaut. Enfin, des informations détaillées sur l'amplitude du défaut ou sur les changements des paramètres du système sont nécessaires. Ces exigences correspondent naturellement aux trois tâches que doit accomplir le module de FDI :

- La détection du défaut
- La localisation du défaut
- L'identification du défaut

Pour surmonter les difficultés mentionnées précédemment et pour concevoir un AFTCS pratique, il est fortement souhaitable de développer de nouvelles techniques qui puisse intégrer la conception de la FDI et du module de reconfiguration d'une manière cohérente sans aucune présupposition sur la connaissance du modèle du système en défaut. Dans la partie de conception, la nature stochastique du système, les incertitudes, les imprécisions et les délais nécessaires à la détection et à la localisation de défaut par la FDI doivent être prises en compte. Idéalement, à chaque étape de la reconfiguration du contrôleur, le module FDI doit fournir une information aussi détaillée que possible du système en défaut et d'un autre côté le contrôleur doit être capable de travailler avec un modèle imprécis du système défaillant. Ce n'est que très récemment que nous pouvons trouver des articles traitant de la conception d'AFTCS en considérant conjointement la FDI et le module de reconfiguration, par exemple [Chen et Jiang, 2005] [Jiang et Chowdhury, 2005] [Omerdic et Roberts, 2003] [Richards, 2005] [Yen et Ho, 2003] [Zhang et Jiang, 2001] pour en citer que quelques uns. Le lecteur pourra également se référer aux papiers [Blanke *et al.*, 2001] [Noura *et al.*, 2000] [Staroswiecki et Gehin, 2001] [Zhang et Jiang, 2003a] et aux livres [Blanke *et al.*, 2003] [Mahmoud *et al.*, 2003] [Caccavale et Villani, 2003] qui se focalisent plus sur le diagnostic et la commande tolérante aux fautes. Cependant, une notice expliquant comment concevoir de façon systématique un module de FDI et détaillant quels sont les besoins sur la FDI pour concevoir un bon AFTCS a besoin d'être mieux étudiée.

1.3.2 Surveillance

Lors du fonctionnement d'un système, il faut gérer le procédé face à divers problèmes de fonctionnement, qu'il s'agisse de dysfonctionnements ou de pannes de capteurs, d'actionneurs (vannes, pompes, agitateurs ...). Cette problématique fait appel à toutes les informations sur le procédé (qu'il s'agisse de celles qui proviennent de la modélisation, des capteurs physiques ou de la commande). Ainsi, l'objectif du diagnostic est de constater l'apparition d'un défaut, d'en trouver la cause puis d'en déduire la marche à suivre afin d'assurer la sûreté de fonctionnement du procédé. Dans la suite, une revue non exhaustive de plusieurs méthodes de diagnostic à partir de différentes perspectives sera présentée.

Détection de défauts et diagnostic

Lorsqu'il est appliqué à des systèmes industriels, une des difficultés du diagnostic réside dans la grande variété de défauts possibles, tant du point de vue de leur source que de leur amplitude et de leur fréquence.

Pour mieux étayer nos propos, nous introduisons quelques définitions existantes dans le domaine du diagnostic :

- Fonctionnement normal d'un système. Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire.
- Défaut. C'est une déviation en dehors d'un intervalle acceptable, d'une variable observée ou d'un paramètre associé au procédé [Himmelblau, 1978]. C'est-à-dire, un défaut est un processus anormal ou symptôme, tel que la hausse de température dans un réacteur ou la baisse de qualité du produit.
- Défaillance. C'est la cause d'une anomalie, telle une panne d'une pompe de refroidissement ou d'un régulateur.
- Détection de défauts. La détection d'un défaut consiste à décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal.
- Localisation d'un défaut. A l'issue de la détection d'un défaut, il s'agit de déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

Une classification des défauts à partir de leurs évolutions temporelles les définit comme :

- abrupts : la caractéristique principale de ce type de défauts est la discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Cette évolution, si elle ne correspond pas aux évolutions dynamiques normales attendues pour la variable (changement de consigne), est caractéristique d'une panne brutale de l'élément en question : arrêt total ou partiel,
- intermittents : il s'agit d'un type de défauts caractéristiques de faux contacts ou de pannes

intermittentes de capteurs. C'est un cas particulier de défaut brutal sur un capteur avec perte aléatoire de signal,

- graduels : ce type de défauts est caractéristique d'une dérive dans les paramètres caractéristiques du procédé. Il s'agit de défauts très difficiles à détecter, car leurs évolutions temporelles sont les mêmes que celles d'une modification paramétrique lente représentant une non-stationnarité du procédé.

La figure 1.5 résume cette classification des défauts à partir de leurs évolutions temporelles.

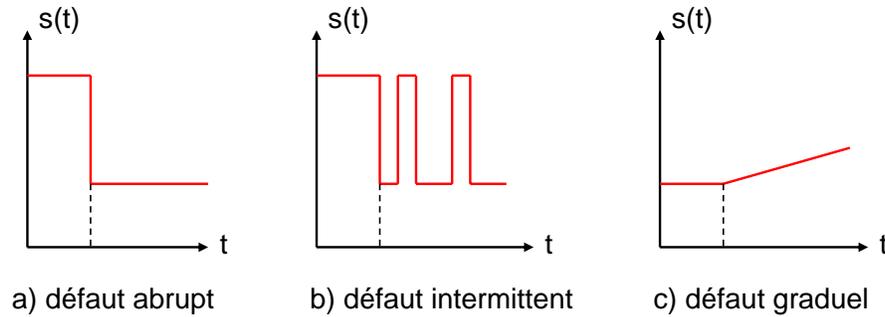


FIG. 1.5 – Différents types de défauts

La présence de défauts multiples constitue une situation fréquente dans la pratique. Cette situation a lieu lorsqu'une ou plusieurs variables (ou paramètres) sortent de leurs évolutions normales à cause d'un dysfonctionnement en chaîne d'éléments d'une installation. En effet, la propagation d'une panne dans un procédé produit généralement des événements en cascade qui peuvent avoir ce type de conséquences.

Avec le développement de l'automatisation, les progrès techniques ont permis le développement de procédés de plus en plus complexes. Face à une défaillance, l'opérateur est par ailleurs soumis à une cascade d'informations qui met à rude épreuve ses capacités intellectuelles, sa réactivité et sa gestion du stress. Le diagnostic et la prise de décision deviennent des tâches qui ne sont pas aisées à réaliser car la détection de défauts doit être accomplie dans ces conditions réelles de fonctionnement des installations (donc en ligne) :

- Les caractéristiques temporelles des défauts sont inconnues.
- Le modèle nominal du système est incertain.
- Des bruits d'état et de mesure sont présents.
- Le signal de détection doit être obtenu dans un temps fini et est fonction des contraintes opératoires du procédé.

Pour remédier aux états de défaillance et trouver des solutions adaptées à chaque procédé, la détection précoce de défauts, le diagnostic automatisé et l'assistance aux opérateurs sont donc des domaines où la recherche scientifique est très active.

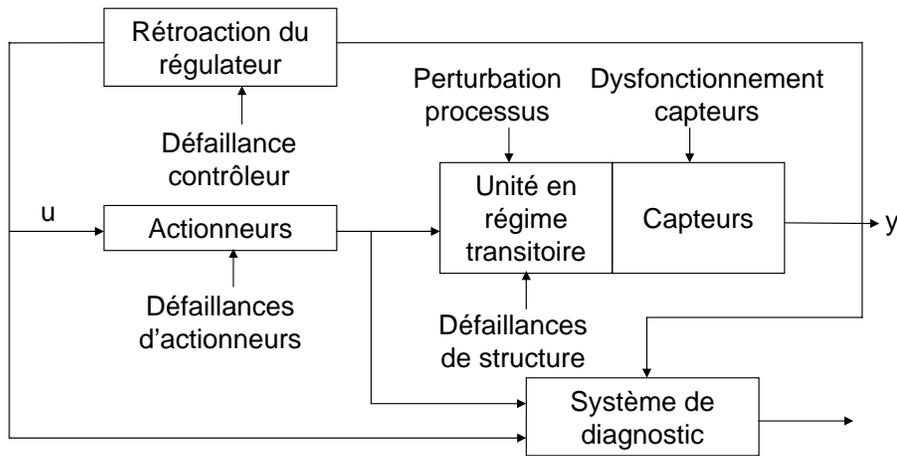


FIG. 1.6 – Schéma général d'un système de diagnostic

À cause de la difficulté d'effectuer en temps réel la détection de défauts et le diagnostic de procédés, plusieurs approches ont été développées. Citons comme techniques les plus récentes : les approches analytiques, les systèmes à base de connaissance et les réseaux de neurones.

Dans le cas où une modélisation du procédé est disponible ou est envisageable, il est possible d'utiliser des méthodes de diagnostic qui requièrent soit des modèles précis du procédé, soit des modèles semi-quantitatifs, voire même des modèles qualitatifs.

En revanche, il existe des méthodes qui ne nécessitent aucune modélisation proprement dite, mais qui se basent sur des informations/données historiques représentatives du fonctionnement du procédé lors de différents scénarii. La figure 1.6 résume le contexte général du diagnostic de défauts. Elle présente un système de processus contrôlé et indique les différentes origines de ses défaillances. En général, il existe trois classes de défaillance ou de dysfonctionnement décrites comme suit [Venkatasubramanian *et al.*, 2003] :

- Changement paramétrique dans un modèle.
- Changement structurel. On se réfère aux changements dans le processus même. Quelques exemples sont la défaillance d'un régulateur, la saturation d'une vanne, une fuite dans une canalisation.
- Défaillances des capteurs et des actionneurs. Ce peut être une déviation constante (positive ou négative) ou une défaillance de sortie de plage admissible.

Les autres défauts sont : les incertitudes de structure (défauts a priori non modélisés), bruits de processus (différence entre le processus actuel et les prédictions par le modèle) et le bruit de mesure (correspond généralement à l'addition d'un terme de haute fréquence à la sortie des capteurs).

L'ensemble des caractéristiques souhaitées qu'un système de diagnostic devrait posséder [Venka-

tasubramanian et al., 2003] est :

- Détection rapide et diagnostic.
- Isolation (c'est la capacité à différencier les défauts).
- Robustesse vis-à-vis de certains bruits et incertitudes.
- Identification de nouveautés, on se réfère à la capacité de décider si le processus est en état normal ou anormal. Dans le cas d'anomalie, il faut identifier s'il s'agit d'un défaut connu ou d'un nouveau défaut.
- Estimation de l'erreur de classification du défaut (diagnostic) en vue de sa fiabilité.
- Adaptabilité : le système de diagnostic devrait être adaptable aux changements de conditions du processus (perturbations, changements d'environnement).
- Facilité d'explication de l'origine des défauts et de la propagation de celui-ci. Ceci est important pour la prise de décision en ligne.
- Conditions de modélisation : pour le déploiement rapide et facile des classificateurs de diagnostic en temps réel, l'effort de modélisation devrait être aussi minimal que possible.
- Facilité de mise en oeuvre informatique (faible complexité dans les algorithmes et leur implémentation) et capacité de stockage.
- Identification de multiples défauts : pour de grands processus, l'énumération combinatoire de multiples défauts est trop importante et ils ne peuvent être explorés de manière exhaustive.

Classification des méthodes de diagnostic

Les premières méthodes de diagnostic furent basées sur la redondance de matériels jugés critiques pour le fonctionnement du système. La redondance matérielle est très répandue dans les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale pour la sécurité des personnes et de l'environnement, comme dans l'aéronautique ou le nucléaire. Les principaux inconvénients de la redondance matérielle sont liés aux coûts dus à la multiplication des éléments ainsi que l'encombrement et aux poids supplémentaires qu'elle génère.

Les spectaculaires progrès réalisés dans le domaine des calculateurs numériques combinés à une baisse des coûts permettent aujourd'hui la mise en oeuvre, dans le milieu industriel, des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Cette nouvelle approche permet d'éliminer en partie, voire même en totalité, la redondance matérielle pour le diagnostic des systèmes industriels. On peut globalement distinguer deux grandes familles dans les méthodes de diagnostic :

- Les méthodes basées sur une modélisation des systèmes ou des signaux, que nous dénommerons « diagnostic quantitatif ».
- Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle que nous appellerons « diagnostic qualitatif ».

Le fait de distinguer ce qui est de l'ordre du quantitatif et du qualitatif, ne doit pas laisser penser que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche coexistent souvent au sein d'un même système de diagnostic. L'utilisation conjointe de méthodes quantitatives et qualitatives permet l'exploitation de l'ensemble des connaissances disponibles concernant le fonctionnement du système.

Nous présentons à la figure 1.7 une vue générale des différentes méthodes de diagnostic dans l'une ou l'autre des catégories précédemment présentées [Toscano, 2005]. En ce qui concerne le diagnostic quantitatif, on peut distinguer deux types d'approches suivant que l'on considère les mesures prises isolément les unes des autres ou qu'au contraire on présuppose des relations mathématiques les reliant. La première approche est connue sous le nom d'analyse mono signal, la deuxième est dénommée analyse multi-signaux ou redondance analytique.

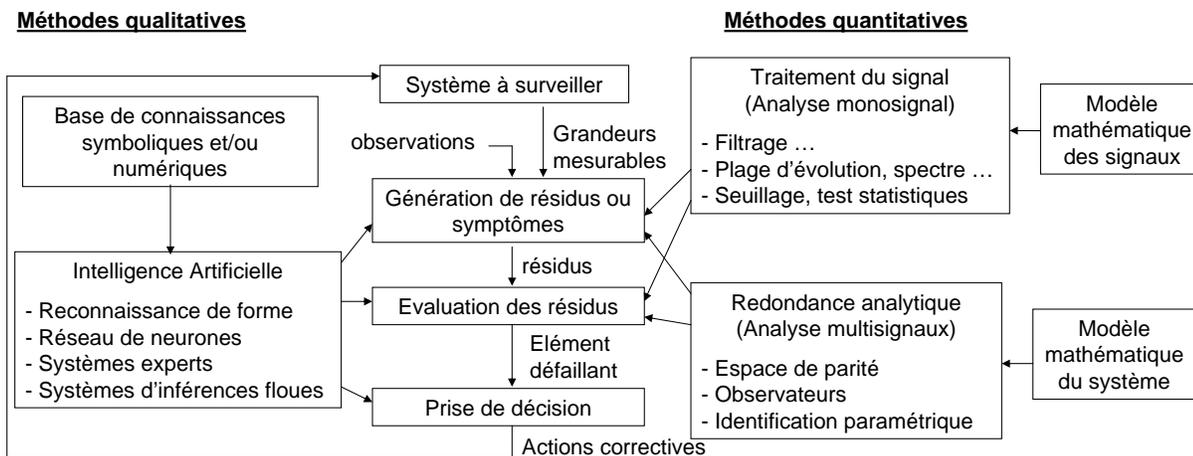


FIG. 1.7 – Classification des méthodes de diagnostic

L'analyse mono-signal consiste dans l'étude des signaux, pris isolément les uns des autres, à extraire des informations révélatrices de défauts. Cette approche repose sur les techniques de traitement du signal. La méthode la plus simple consiste à fixer un ou plusieurs seuils limitant la plage d'évolution du signal considéré. D'autres approches, plus élaborées, sont basées sur les propriétés statistiques des signaux (moyenne, écart type, etc.), ou sur l'analyse spectrale.

L'analyse multi-signaux met en jeu un ensemble de variables et les relations de causalité existant entre elles. Cette approche repose sur les techniques de l'automatique. En automatique, le concept clé est celui de modèle mathématique d'un processus physique. Ce modèle mathématique, censé représenter une réalité objective, est exploité afin d'élaborer des lois de commande permettant l'accroissement des performances dynamiques et statiques du système étudié. Cette connaissance analytique d'un système physique peut être mise à profit pour le diagnostic. En effet, le modèle étant censé décrire le comportement dynamique du système à surveiller, tout

écart entre le comportement prévu par le modèle et le comportement mesuré traduit l'apparition d'un défaut. Dans la suite, nous entendrons essentiellement par diagnostic quantitatif, l'ensemble des méthodes fondées sur l'utilisation d'une représentation mathématique du système à surveiller.

Diagnostic Qualitatif

Dans le cas du diagnostic qualitatif, les connaissances utilisables reposent sur le savoir et l'expérience d'opérateurs humains ayant une parfaite maîtrise de l'installation à surveiller (base de connaissance symbolique) et/ou sur l'existence d'une base de connaissances numériques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation. Suivant cette approche, on trouve toutes les méthodes liées à l'intelligence artificielle [Gentil, 1996]. Elle inclut les systèmes experts, les systèmes d'inférence floue [Mamdani, 1977] [Takagi et Sugeno, 1985], la reconnaissance de forme [Dubuisson, 1990] [Denoeux, 1997] [Boudaoud et Masson, 2000], les réseaux de neurones. Ces différentes approches sont alors utilisées pour construire un modèle de diagnostic qualitatif permettant de remonter des symptômes observés aux causes.

La conception d'un système de diagnostic sans modèle se déroule en trois phases :

- Une phase d'analyse : Cette phase consiste à rassembler toutes les informations existantes sur le processus : les données des différents capteurs, les modèles des dispositifs, l'historique, l'expérience accumulée. A partir de cette phase doit sortir une définition précise des paramètres à observer ou qui représentent les modes de fonctionnement. Une suite d'observations du même mode ne se trouve pas en un seul point, mais occupe une zone de l'espace des observations. Ceci est dû au bruit inhérent au niveau des différentes mesures. Il s'agit donc d'associer à chaque forme observée un mode ou une classe. Après avoir représenté les modes par des paramètres significatifs, on essaye d'avoir le maximum de données sur chacun des modes observables ; c'est la phase d'apprentissage.
- Une phase de choix d'un système de détection : Les frontières entre les classes sont définies dans cette phase. Un système de décision capable de décider de l'appartenance ou non d'une nouvelle observation à une des classes existantes est créé. De nombreuses solutions servant à définir le système de décision peuvent être retenues [Dubuisson, 1990]. On cite d'une manière non exhaustive les méthodes de discrimination paramétrique avec rejet (cela suppose la connaissance totale des lois de probabilité régissant les observations et appliquées sous l'hypothèse gaussienne avec estimation des paramètres), les méthodes de discrimination non paramétrique (les lois de probabilité dans chaque classe sont inconnues mais peuvent être estimées par la méthode de Parzen ou celle des plus proches voisins), les méthodes se reposant sur le concept de distance (paramétrique ou non) et les méthodes recherchant les équations de frontières (délicate et largement heuristique).
- Une phase d'exploitation : C'est la phase d'implémentation du système de diagnostic afin de

proposer une décision pour toute nouvelle observation effectuée. Le système doit adapter sa règle de décision en fonction des nouvelles classes détectées.

Diagnostic Quantitatif

Les méthodes basées sur l'approche mono-signal :

- Redondance matérielle : c'est une méthode employée dans des installations critiques (l'aérospatiale, le nucléaire). L'utilisation de plusieurs capteurs en vue d'obtenir la même information sur une variable permet de détecter les déviations par rapport à un état normal et de localiser un défaut de capteur. L'avantage de cette méthode est la simplicité, la fiabilité et la rapidité de la détection et de la localisation de défaut. Les inconvénients sont l'accroissement du coût de l'installation et l'augmentation de la probabilité de pannes de capteurs et donc d'un besoin de maintenance supplémentaire.
- Analyse spectrale : Les signaux sont analysés en état normal de fonctionnement ; les hautes fréquences sont reliées au bruit et les basses fréquences aux évolutions propres de l'état du procédé. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de défaillance. Cette approche se révèle très utile pour analyser des signaux qui montrent des oscillations avec des périodes longues (les courants électriques, les débits, les pressions ...). L'inconvénient est la sensibilité aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt et la nécessité d'un échantillonnage fréquent pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence. Les méthodes d'auto-corrélation, la densité spectrale des signaux, la transformée de Fourier, les ondelettes sont bien appropriées dans le cas où les fréquences représentatives de défauts sont connues. Dans le cas contraire, il est préférable d'utiliser des modèles paramétriques des signaux qui permettent d'estimer en ligne les fréquences et les valeurs moyennes des paramètres.
- Approches statistiques : Ces approches se basent sur l'hypothèse de changements rapides (et non sur l'amplitude) des caractéristiques des signaux ou des paramètres des modèles par rapport à des dynamiques considérées comme étant lentes (procédés quasi stationnaires). Elles sont utilisées pour la détection de changements graduels avec des seuils de détection faibles. Les informations fournies par le nombre croissant de capteurs installés sur les procédés rendent très difficile l'analyse des résultats. L'analyse en composantes principales (ACP) et les moindres carrés partiels (MCP) permettent de réduire le nombre de variables à traiter par la détermination de relations linéaires entre elles (variables latentes), permettant ainsi d'expliquer la variance dans des séries de données.

L'approche à base de modèle de système :

L'approche à base de modèle mathématique du système aussi appelée analyse multiségnal, uti-

lise plus d'informations que celles apportées par les seuls capteurs physiques. Ces informations peuvent provenir de la connaissance du comportement entrée/sortie d'un procédé ou des processus internes qui en gouvernent l'évolution.

Selon la méthode, différents types de modèles sont utilisés. Par exemple, pour les approches utilisant l'observation de l'état ou l'identification paramétrique, on utilisera des modèles analytiques alors que pour l'approche systèmes experts, on recourra à des modèles de type base de connaissance. Le modèle servant directement de référence pour la détection de défauts, la qualité du résultat dépend directement de la qualité des modèles. La mise en oeuvre de ces méthodes nécessite donc une modélisation précise.

La détection de défaut basée sur l'utilisation de modèles peut être divisée 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 sont utilisés pour générer un résidu - c'est-à-dire un signal mettant en évidence la présence d'un défaut. En général, en régime de fonctionnement normal, ce signal est statistiquement nul et s'écarte notablement de zéro en présence de défaut. La génération de résidus est propre à la méthode utilisée. Durant la seconde étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a ou non présence de défaut, sur quelle composante du système il est intervenu (localisation) et pour déterminer la nature du défaut et sa cause (identification). La décision peut s'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil sur les valeurs instantanées ou les moyennes de résidus, en utilisant des fonctions floues, en faisant appel également à la reconnaissance de formes ou en utilisant des seuils adaptatifs qui évoluent en fonction du point de fonctionnement du processus surveillé.

La figure 1.8 représente le principe de la FDI en utilisant la redondance analytique selon ses trois principes de base que sont la génération de résidus, la détection et la localisation. Le lecteur pourra se référer à [Isermann et Ballé, 1996] pour des applications industrielles de ce type de FDI. Cette méthode de surveillance est plus détaillée que les autres puisque c'est celle que nous

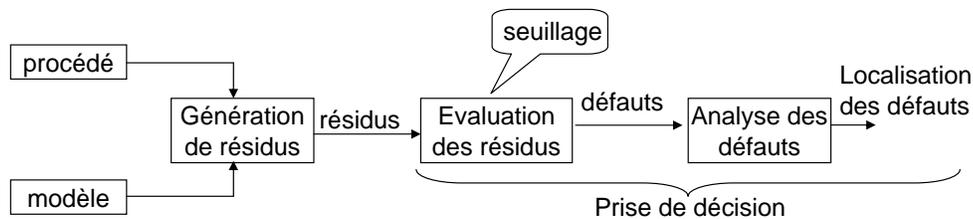


FIG. 1.8 – Les étapes de la surveillance par la redondance analytique

utiliserons par la suite.

a. Génération de résidus

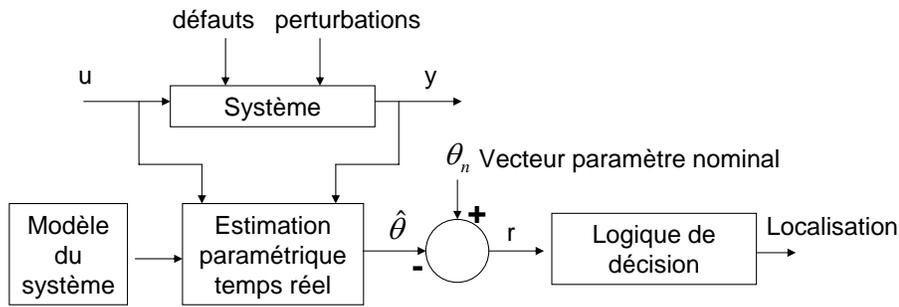


FIG. 1.9 – Principe de la génération de résidus par estimation paramétrique

La première étape d'un système de surveillance à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures des signaux du procédé, capteurs ou actionneurs, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. La génération de résidus est un problème crucial pour les systèmes de surveillance. En effet, de la structure du système de résidus engendré dépendra la robustesse de la localisation.

Frank la décompose en trois groupes [Frank, 1998] :

1. Identification paramétrique [Isermann, 1984] : L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement, comme c'est le cas des observateurs, sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose donc des problèmes d'ordre pratique dans le cas de procédés dangereux, coûteux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche de la surveillance basé sur les résidus. Le schéma proposé dans [Toscano, 2005] illustre la méthode d'identification paramétrique (figure 1.9).
2. Observateurs d'état : Les méthodes d'estimation d'état ont pour principe de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties. Ce sont des méthodes de génération de résidus indirectes en ce sens qu'elles calculent l'erreur d'estimation de la sortie. L'estimation de l'état peut être effectuée à l'aide d'observateurs [Luenberger, 1971] [Adjallah, 1993] dans le cas déterministe ou de filtres dans le cas stochastique (filtre de Kalman [Willsky, 1976] ou filtres détecteurs de défauts [Massoumnia, 1986]). Les deux méthodes présentent des analogies dans leur formulation et peuvent être synthétisées par la

figure 1.10, la différence provenant du mode de calcul des paramètres du reconstructeur en fonction du contexte choisi (cas continu ou discret, déterministe ou stochastique). La théorie des observateurs est utilisée pour des systèmes linéaires ou non linéaires [Garcia et Frank, 1997], d'ordre plein s'ils estiment l'intégralité du vecteur d'état (le système doit être complètement observable) ou d'ordre réduit dans le cas contraire, dans le domaine fréquentiel (observateurs généralisés) ou temporel (observateurs de Luenberger). Frank et Wünnenberg définissent une classe d'observateurs dit observateurs à entrées inconnues dont les sorties du système sont indépendantes des incertitudes structurées auxquelles il est soumis [Frank et Wünnenberg, 1989]. Certains travaux tels que ceux de Ding portent sur une approche unifiée des méthodes à base d'observateurs [Ding et Frank, 1994].

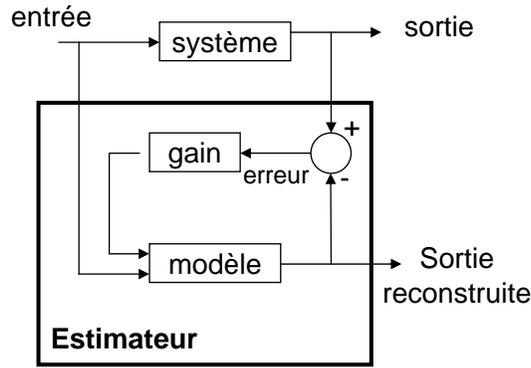


FIG. 1.10 – Principe général d'un estimateur de sortie

3. Espace de parité [Simani *et al.*, 2003] : Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondances ([Chow, 1980] [Chow et Willsky, 1984] [Patton et Chen, 1991b] [Lou *et al.*, 1986] [Potter et Suman, 1977] [Ragot et Maquin, 1996]). Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une fenêtre d'estimation. 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 (on parle de consistance des mesures, de leur parité). En s'inspirant de [Gertler, 1998], considérons un système linéaire de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

où $x \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathcal{R}^m$ est le vecteur des entrées de commandes, $y \in \mathcal{R}^p$ est le vecteur des mesures, $A \in \mathcal{R}^n * \mathcal{R}^n$, $B \in \mathcal{R}^n * \mathcal{R}^m$ et $C \in \mathcal{R}^p * \mathcal{R}^n$. En substituant la seconde ligne à la première ligne dans l'équation 1.4 et en retardant plusieurs fois, nous

obtenons l'égalité suivante :

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ CB & 0 & 0 & \dots \\ CAB & CB & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

que nous pouvons également noter sous la forme :

$$Y_f(t) = Tx(t) + QU_f \quad (1.6)$$

Afin d'éliminer tous les état $x(t)$ non mesurables, l'équation 1.5 est multipliée par une matrice W , appelée matrice de projection telle que :

$$WT = 0 \quad (1.7)$$

Ceci nous conduit naturellement aux résidus :

$$r(t) = WY_f - WQU_f t \quad (1.8)$$

La figure 1.11 illustre les calculs précédents sous forme de schéma bloc. Ainsi, les entrées et sorties filtrées U_f et Y_f sont obtenues en retardant les signaux correspondants. Le calcul de la matrice W donne une liberté dans la génération d'un ensemble structuré de résidus. Une possibilité consiste à sélectionner les éléments de W tel qu'une variable mesurée n'a pas d'impact sur un résidu spécifique. Ainsi, ce résidu reste faible dans le cas d'un défaut qui s'ajoute à cette variable alors que les autres résidus calculés augmentent fortement [Isermann et Fussel, 1999].

Remarque : Les méthodes de génération de résidus présentent des analogies de formulation. Les travaux de Frank et Wünnenberg ont permis de prouver que la génération de résidus par l'approche par espace de parité conduit à une certaine classe d'observateurs [Frank et Wünnenberg, 1989]. Par la suite, la correspondance de résidus par espace de parité et par observateur a largement été commentée [Ding *et al.*, 1999] [Cocquempot, 1993] [Gertler, 1991] [Patton et Chen, 1991a].

De même, il existe bien des dualités entre les résidus calculés par l'approche de l'espace de parité et l'estimation paramétrique. Dans [Staroswiecki *et al.*, 1993] [Delmaire *et al.*, 1994] [Delmaire *et al.*, 1995], il est démontré que, sous certaines hypothèses, les résidus obtenus par une approche d'estimation paramétrique peuvent être vus comme une transformation non linéaire des résidus dans l'espace de parité . Par la suite, [Gertler, 1995] a généralisé ces travaux . Le choix de la méthode de génération de résidus dépend du type de modèle et

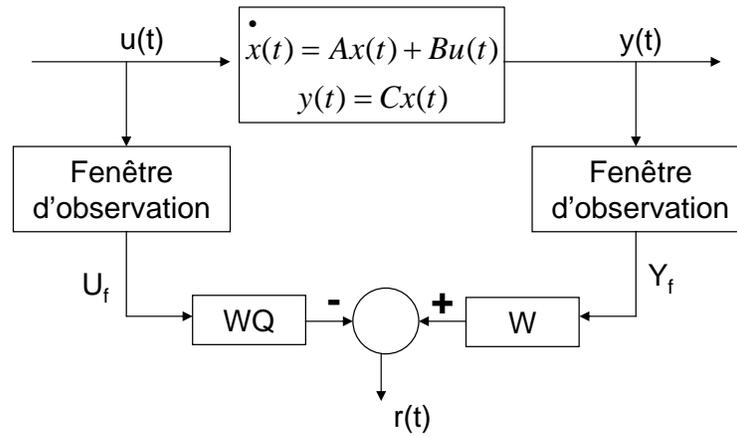


FIG. 1.11 – Détermination des résidus

de procédé dont on dispose, mais aussi du type de défauts que l'on veut détecter (défauts additifs ou multiplicatifs, défauts multiples ou non). Le lecteur pourra se référer à l'article de synthèse [Isermann, 1994] quant aux avantages et conditions d'application des méthodes précédemment énoncées.

Calcul des résidus dans le cas non linéaire par la théorie de l'élimination :

La théorie de l'élimination sera vue à travers un exemple : les résidus sont calculés en dérivant successivement les sorties jusqu'à ce que les variables inconnues puissent être éliminées des équations.

Considérons un moteur à courant continu à excitation séparée à flux inducteur variable. Ce type de moteur, très répandu dans les cycab, est modélisé sur la figure 1.12.

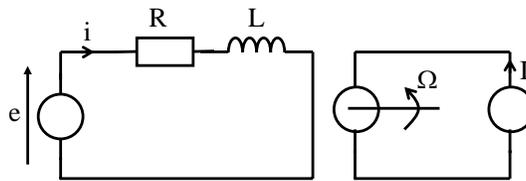


FIG. 1.12 – Modélisation du moteur à courant continu

Le système est régi par les équations suivantes :

$$\begin{cases} e = Ri + L \frac{di}{dt} \\ J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C = KiI \end{cases} \quad (1.9)$$

Les entrées du système sont $u_1 = e$ et $u_2 = I$

En posant $x_1 = i$ et $x_2 = \Omega$, nous avons :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R}{L}x_1 + \frac{1}{L}u_1 \\ \dot{x}_2 = -\frac{f}{J}x_2 + \frac{K}{J}x_1u_2 \end{cases} \quad (1.10)$$

Nous disposons d'un capteur qui mesure la vitesse de rotation du moteur $y = \Omega$. Ainsi le calcul des résidus par la méthode des éliminations peut s'effectuer de la manière suivante :

$$y = x_2 \quad (1.11)$$

$$\dot{y} = \dot{x}_2 = -\frac{f}{J}x_2 + \frac{K}{J}x_1u_2 \quad (1.12)$$

ainsi, nous pouvons isoler l'inconnu :

$$x_1 = \left(\dot{y} + \frac{f}{J}x_2\right) \frac{J}{Ku_2} = \left(\dot{y} + \frac{f}{J}y\right) \frac{J}{Ku_2} \quad (1.13)$$

En dérivant à nouveau l'équation 1.12, nous obtenons :

$$\ddot{y} = -\frac{f}{J}\dot{x}_2 + \frac{K}{J}\dot{x}_1u_2 + \frac{K}{J}x_1\dot{u}_2 \quad (1.14)$$

En utilisant l'équation 1.10, nous obtenons :

$$\ddot{y} = -\frac{f}{J}\left(-\frac{f}{J}x_2 + \frac{K}{J}x_1u_2\right) + \frac{K}{J}\left(-\frac{R}{L}x_1 + \frac{1}{L}u_1\right)u_2 + \frac{K}{J}x_1\dot{u}_2 \quad (1.15)$$

En remplaçant x_1 par la valeur obtenue dans l'équation 1.13 et en simplifiant, nous obtenons :

$$\ddot{y} = -\frac{f}{J}\dot{y} + \left(\dot{y} + \frac{f}{J}y\right)\left(\frac{\dot{u}_2}{u_2} - \frac{R}{L}\right) + \frac{Ku_1u_2}{JL} \quad (1.16)$$

De cette dernière équation, nous en déduisons le résidu :

$$r = \ddot{y} + \frac{f}{J}\dot{y} - \left(\dot{y} + \frac{f}{J}y\right)\left(\frac{\dot{u}_2}{u_2} - \frac{R}{L}\right) - \frac{Ku_1u_2}{JL} \quad (1.17)$$

Ce résidu dépend donc bien que des entrées et sorties connues ainsi que de leurs dérivés et il est censé être nul si le système est sans défaut. Ainsi par r , nous pourrions détecter un défaut s'il s'éloigne trop de zéro. Cependant, la localisation du défaut sera impossible puisque r dépend des deux entrées et de la sortie ainsi que de leurs dérivés.

Le calcul de résidus aurait également pu être effectué en utilisant un algorithme de génération de redondances analytiques [Leuschen, 2001] basé sur la méthode de l'espace de parité non linéaire. Ce dernier donnerait deux résidus dont le premier serait identique à celui que nous avons trouvé et dont le deuxième n'apporterait, ici, pas plus d'information que le premier résidu.

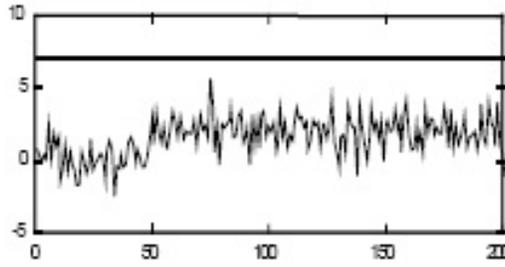
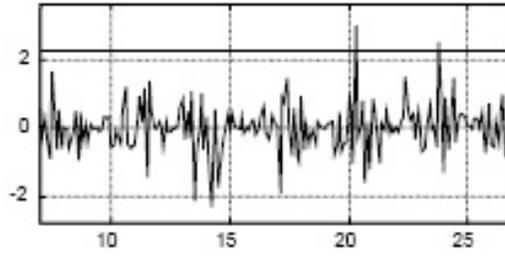
FIG. 1.13 – Système avec défaut à $t=75$: non détection

FIG. 1.14 – Système sans défaut : fausse alarme

b. La prise de décision

Deuxième étape du système de surveillance, la prise de décision consiste à analyser les résidus pour décider s'il y a ou non présence de défaut (Détection) et si oui sur quelle composante du système intervient-il (Localisation). Une dernière étape pourrait consister à déterminer la nature du défaut et sa cause (diagnostic), mais cette dernière ne sera pas détaillée ici puisque, à l'opposé de l'accomodation, dans le cas de la reconfiguration, l'information délivrée par le diagnostic n'est pas utilisé.

Autant les techniques de génération différent selon que le système est linéaire ou non, autant les méthodes de prise de décision présentées ici fonctionnent indifféremment dans les deux cas.

Les résidus ont une valeur théorique nulle pour un système idéal en l'absence de défaut (pas d'incertitude modèle ni de bruits de mesure), et non nul dans le cas contraire. La principale difficulté de la détection réside dans le calcul du seuil des résidus. Un seuil trop grand risque d'engendrer une non-détection (cf. figure 1.13). Au contraire, un seuil trop petit entraînerait des fausses alarmes (cf. figure 1.14). La problématique est donc de trouver un seuil optimal qui serait le compromis idéal entre le taux de fausse alarme et le taux de non-détection.

L'évaluation des résidus consiste donc à optimiser le problème de seuillage des résidus. Dans l'approche classique, les fonctions de décision sont établies selon la nature des résidus. Si l'on cherche à déterminer la présence de bruits, on choisira l'analyse par tests statistiques. Si l'on considère la sensibilité des résidus aux défauts, l'évaluation des résidus r deviendra un problème de seuillage, i.e. déterminer un seuil T tel que :

- $r(t) \geq T$ pour un système en défaut,
- $r(t) < T$ pour un système sans défaut.

Concernant les tests statistiques, on peut citer en exemples le test de maximum de vraisemblance ou test GLR (de l'anglais Generalized Likelihood Ratio) introduit par Willsky et Jones [Willsky et Jones, 1976], qui prend en compte les perturbations stochastiques (test de blancheur de bruit), le test de Page-Hinkley qui teste la valeur moyenne du résidu sur une fenêtre de détection par rapport à un seuil prédéfini, le filtre de décorrélation afin de supprimer l'influence des incertitudes de modèle sur le résidu [Borne *et al.*, 1990].

Concernant les problèmes de seuillage, les premiers travaux ont porté sur l'élaboration de seuils fixes, indépendants du temps et des entrées du système (cf. figure 1.13). Par exemple, Walker et Gai le définissent à l'aide de la théorie de Markov [Walker et Gai, 1979]. Il est évident que vis-à-vis de perturbations extérieures, la détection par rapport à un seuil d'une valeur constante peut s'avérer inadaptée. Une incertitude sur la mesure peut entraîner un résidu au-delà de la valeur limite fixée et donc déclencher une fausse alarme (cf. figure 1.14).

[Emani-Naeni, 1988] ont défini la notion de seuil adaptatif, robuste contre les incertitudes de modèle. De même, Clark propose d'adapter les seuils de décision en utilisant des fonctions déterministes : il définit un seuil de détection adaptatif en fonction des entrées du système [Patton *et al.*, 1989]. L'idée est de définir des bornes inférieures et supérieures du résidu en fonction des bornes des incertitudes de paramètres et des bruits de mesure. Les seuils sont ainsi fonction des modes opératoires. La figure 1.15 montre le même résidu que celui de la figure 1.14. Cette fois, les seuils adaptatifs ont permis d'éviter une fausse alarme. Il existe de nombreuses contributions à cet effet et nous pouvons citer en exemple [Ding et Frank, 1991] [Weiss, 1988] [Sauter *et al.*, 1996].

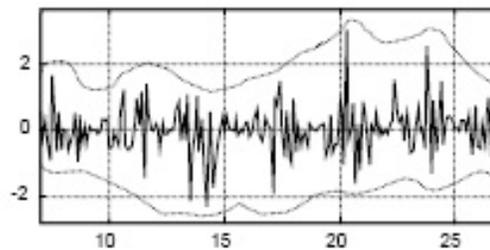


FIG. 1.15 – Seuils adaptatifs

Dans l'étape de prise de décision, après la détection, il est nécessaire de localiser le défaut. Pour ce faire, nous allons développer les notions de matrice d'incidence et de signatures de défauts [Simani *et al.*, 2003].

Une signature de panne est directement engendrée par la structure du système de résidus par

l'intermédiaire de la matrice d'incidence. Soit R un ensemble de relations de redondance et E l'ensemble des variables connues du procédé étudié, i.e. les variables directement mesurables sur le système. La matrice d'incidence M représente la relation suivante :

$$\begin{aligned} M &: R \times E \rightarrow \{0, 1\} \\ (r, e) &\rightarrow M(r, e) \end{aligned} \quad (1.18)$$

avec $M(r, e) = 1$ si et seulement si e apparaît dans la relation de redondance analytique r ,
 $M(r, e) = 0$ sinon.

La matrice d'incidence contient des 1 ou des 0. Comme chaque colonne de cette matrice correspond à une variable et que chaque ligne correspond à un résidu :

- un 1 pour une position donnée signifie que le résidu associé est directement influencé par la variable connue associée à ce 1,
- un 0 signifiera au contraire que la variable donnée n'entre pas dans le calcul du résidu.

Ainsi, sous des conditions idéales (pas de dispersion de paramètres ou de modification de structure du modèle...), chaque colonne de la matrice d'incidence correspondra à une signature d'une défaillance particulière. Afin de rendre chaque défaut détectable, il est évident que toutes les colonnes doivent contenir au moins un 1. Afin de rendre chaque défaut unique, les signatures associées doivent être uniques. La figure 1.16 montre un exemple de deux structures de matrice d'incidence pour un système de trois variables connues e_j ($j = 1..3$) et de trois résidus r_i ($i = 1..3$).

	e_1	e_2	e_3
r_1	1	0	0
r_2	0	1	0
r_3	0	0	1

(a)

	e_1	e_2	e_3
r_1	0	1	0
r_2	1	0	1
r_3	1	1	1

(b)

FIG. 1.16 – Exemples de matrice d'incidence

Dans le cas (a) de la figure 1.16, les trois colonnes sont bien distinctes. Nous pouvons donc localiser les défauts. Par contre, dans le cas (b), si la signature du défaut est $(0\ 1\ 1)^T$ alors nous ne pouvons pas dire si le défaut se situe au niveau de la variable e_1 ou de la variable e_3 .

Afin d'améliorer la localisation de défauts, on peut utiliser des sous-ensembles de résidus. Chaque sous-ensemble sera sensible à un défaut ou à un ensemble de défauts et insensible aux autres défauts. D'une manière générale, trois principaux schémas de détection sont proposés dans la litté-

rature [Clark, 1978] [Frank, 1987] : SOS (Simplified Observer Scheme), DOS (Dedicated Observer Scheme) et GOS (Generalized Observer Scheme). [Courtine, 1997] propose même d'augmenter ces schémas. Enfin, une comparaison de ces différentes structures a été établie par [Schrick, 1993] en indiquant leur condition d'utilisation.

Le principe de la FDI étant présenté, intéressons nous aux méthodes de reconfiguration.

1.3.3 Mécanisme de reconfiguration du contrôleur

Les méthodes de surveillance permettent de détecter des défauts de capteurs, d'actionneurs et du procédé. Les méthodes ont été développées pour ces différents types de défauts. Dans la suite, nous limiterons notre étude aux défauts majeurs d'actionneurs compte tenu des objectifs de notre travail.

Dans le cas où la nature et l'amplitude du défaut peuvent être diagnostiqués et si le défaut est mineur, l'accomodation, qui consiste à continuer à fonctionner en utilisant le(s) composant(s) défaillant(s) par une compensation du défaut, apporte de bons résultats. Si la nature du défaut n'est pas connu ou si le défaut est majeur, nous préférons plutôt la reconfiguration qui consiste à reconfigurer le système sans utiliser le(s) composant(s) défaillant(s). Notre étude portant sur les défauts majeurs d'actionneurs, nous utiliserons la méthode de la reconfiguration. La figure 1.17 présente un système muni d'une commande tolérante active aux défauts d'actionneurs que nous avons mis en oeuvre en utilisant la méthode de la reconfiguration.

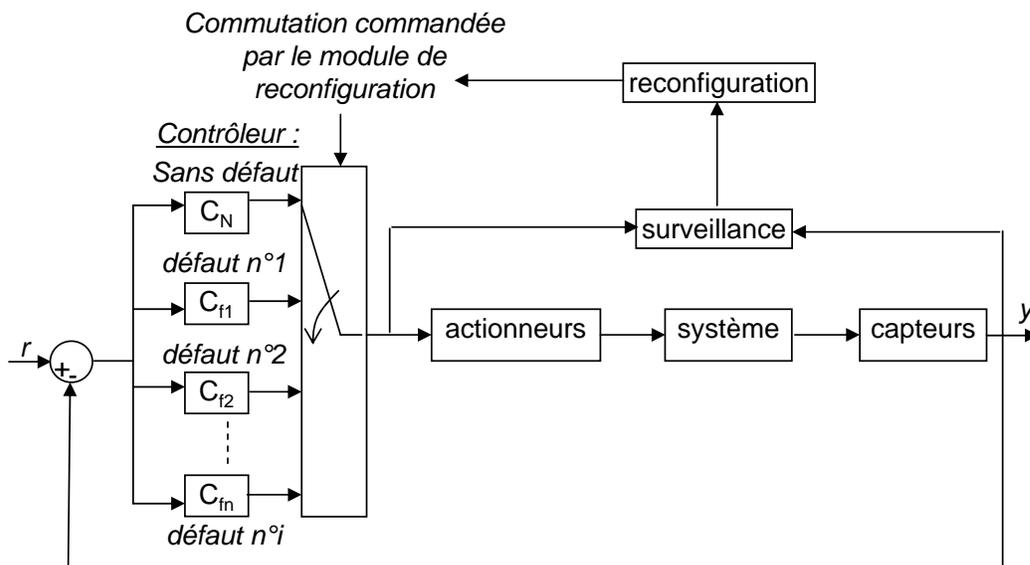


FIG. 1.17 – Système de commande tolérante active aux fautes d'actionneurs

Sur cette figure 1.17, le module de surveillance utilise les valeurs des entrées et sorties du système

ainsi que la connaissance qu'il a sur le modèle du système pour remplir sa mission de détection et de localisation d'éventuels défauts d'actionneurs. Le diagnostic de l'état de l'ensemble des actionneurs est ensuite envoyé vers le module de reconfiguration qui commande la commutation du contrôleur en cours d'utilisation vers le contrôleur correspondant au(x) défaut(s) détecté(s) et localisé(s). Le nombre de contrôleur "i" conçu est donc égal au nombre de défauts d'un ou plusieurs actionneurs considérés. Ne considérant que les défauts d'actionneurs, l'équation 1.1 devient :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & t < t_f \\ y = Cx & \\ \dot{x} = Ax + B_f u_f & t \geq t_f \\ y = Cx & \end{cases} \quad (1.19)$$

Dans le cas de la reconfiguration, en réarrangeant l'ordre des entrées, la matrice B_f peut s'écrire :

$$B_f = \begin{pmatrix} B_s & B_F \end{pmatrix}$$

où B_s est une matrice $n \times (m - k)$ correspondant aux entrées encore saines et B_F est une matrice $n \times (k)$ correspondant aux k actionneurs en défaut.

En cas d'accomodation, $B_F \neq 0$ et les défauts d'actionneurs sont compensés, alors que pour la reconfiguration les actionneurs en défaut ne sont plus utilisés et $B_F = 0$.

Suite à la permutation de l'ordre des composantes du vecteur u , nous obtenons le vecteur u_f . Hors ligne, pour chaque cas de défaut détectable et localisable d'actionneurs et lorsque cela est possible, une loi de commande est prévue en utilisant la nouvelle équation d'état du système en défaut. Ainsi, en ligne, comme indiqué sur la figure 1.17, lorsqu'un défaut survient, le module de surveillance a en charge, et si c'est possible, de détecter et de localiser les actionneurs en défaut. Cependant pour détecter et localiser ces défauts, le module de surveillance engendre un retard à la détection. Ainsi, trois phases peuvent être considérées dans la description du comportement du système :

- $t \in [0; t_f[$: le système est en fonctionnement normal et la loi de commande nominale est appliquée.
- $t \in [t_f; t_d[$: le système est en défaut mais le module de surveillance n'a pas encore détecté et localisé le défaut : La loi de commande n'a donc pas encore été reconfigurée (c'est donc toujours la loi de commande nominale)
- $t \in [t_d; \infty[$: le système est en défaut et le module de surveillance a détecté et localisé le défaut et le mécanisme de reconfiguration fait basculer la loi de commande du contrôleur nominal au contrôleur correspondant au défaut

1.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les deux méthodes existantes de commande tolérante aux défauts ont été rappelées :

- La commande tolérante passive aux fautes (PFTCS)
- La commande tolérante active aux fautes (AFTCS)

Nous nous sommes surtout étendus sur la méthode qui sera appliquée sur le véhicule : l'AFTCS. Au sein de l'AFTCS, un module de surveillance doit être mis en place. Après avoir présenté succinctement le diagnostic qualitatif, c'est sur le diagnostic quantitatif (ou à base de modèle) que nous avons mis l'accent. Sur un système pour lequel nous disposons d'un modèle non linéaire, nous pourrions utiliser cette dernière méthode et plus précisément la théorie de l'élimination, utilisant les relations de redondances analytiques, pour les systèmes non linéaires.

En aval du module de surveillance se trouve le module de reconfiguration (qui a été préféré à l'accommodation puisque nous considérons des défauts majeurs d'actionneurs). Ainsi, une loi de commande devra être élaborée dans le cas nominal et pour différents cas de défauts d'actionneurs considérés. Le mécanisme de reconfiguration consistera alors à basculer d'une loi de commande à une autre suite à la détection et localisation de défaut(s) d'actionneur(s).

Chapitre 2

Analyse d'un système non linéaire en vue de la mise en place d'un système tolérant aux fautes

2.1 Introduction

Avant la conception puis l'implémentation d'un module de commande tolérante aux fautes sur un système non linéaire, il nous faut analyser le système du point de vue des capteurs et des actionneurs afin de connaître ses propriétés d'observabilité et de commandabilité. Le premier paragraphe de ce chapitre sera consacré à cette étude pour un système non linéaire.

En vue de la mise en place d'un système tolérant aux fautes, il est également intéressant de savoir quels capteurs et quels actionneurs peuvent être perdus sans risque de perdre respectivement les propriétés d'observabilité et de commandabilité (ou d'accessibilité). Toutes ces informations peuvent être synthétisées schématiquement par ce que l'on nomme un graphe de redondance. C'est dans le deuxième paragraphe que les notions de redondance de capteurs et d'actionneurs seront présentées.

Afin d'aller un peu plus loin dans la phase d'analyse, nous avons développé un nouveau concept appelé "Remaining Time Before Non Estimability" (RTBNE). Ce concept, présenté dans le troisième paragraphe, s'intéresse aux temps restant suite à la perte d'un ou de plusieurs capteurs, pour détecter et localiser ce(s) capteur(s) défaillant(s) et pour reconfigurer le système avant de perdre la possibilité d'estimer l'état ou une partie de l'état du système.

2.2 Détermination des propriétés d'observabilité et d'accessibilité d'un système non linéaire

Bon nombre de commandes de processus physiques se font dans l'espace d'état. La synthèse de ces lois de commande requiert souvent la connaissance d'une partie ou de toutes les variables d'état qui caractérisent la dynamique du système à chaque instant. D'autre part, dans le domaine du diagnostic des pannes qui nous intéresse ici, on peut avoir besoin de faire un suivi de paramètres internes afin de détecter une rupture anormale du comportement dynamique du système. On peut également vouloir diminuer le nombre de capteurs pour des raisons économiques (coût des capteurs).

Ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'un observateur. Il s'agit d'un système dynamique prenant pour entrées les signaux connus du système sur lequel il est implanté et dont les sorties convergent vers une estimation des variables d'état (ou d'une partie des variables d'état). La notion usuelle d'observabilité est alors nécessaire. En effet, une condition nécessaire pour la synthèse d'un observateur est l'observabilité du système ou d'une partie du système. Ainsi, la suite de ce paragraphe est d'abord consacrée à la définition de l'observabilité et aux méthodes pour connaître les propriétés d'observabilité d'un système non linéaire. Le lecteur pourra retrouver des détails des notions brièvement exposées plus loin dans [Kailath, 1980] et [Souleiman *et al.*, 2000]. La synthèse de lois de commande mentionnées précédemment requiert également la propriété de commandabilité d'une partie ou de toutes les variables d'état. De la même manière que pour l'observabilité, ce paragraphe se terminera par la définition des notions de commandabilité et d'accessibilité pour les systèmes non linéaires.

2.2.1 Observabilité

Pour les systèmes linéaires

Considérons un système linéaire stationnaire de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

où $x \in \mathcal{N}$, \mathcal{N} étant un ouvert dense de \mathcal{R}^n , $u(t) \in \mathcal{R}^m$ et $y(t) \in \mathcal{R}^p$.

Voici deux définitions liées à l'observabilité :

Définition 1 *Le système 2.1 est observable si, étant donné l'instant t_0 , il existe un instant t_1 fini tel que la connaissance du signal de sortie y sur l'intervalle $[t_0; t_1]$ permette de déterminer de manière unique l'état $x(t_0) = x_0$ et ceci quelque soit l'entrée du système.*

Pour connaître l'observabilité d'un système, différents critères existent. On peut, par exemple, appliquer le test du rang de la matrice d'observabilité, définie par :

$$\Theta = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

La condition du rang s'énonce comme suit :

Définition 2 *Le système 2.1 est observable si et seulement si le rang de la matrice Θ est égal à n . On dit alors que la paire (C, A) est observable.*

Pour les systèmes non linéaires

Le concept d'observabilité est une notion délicate pour les systèmes non linéaires dans sa définition et son utilisation. En effet, l'observabilité d'un système non linéaire dépend de son entrée et nous pouvons l'illustrer à partir de l'exemple suivant :

Exemple 1 *Soit le système non linéaire suivant :*

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 2ux_2 + 3x_1 \\ \dot{x}_2 &= u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ici, la variable x_1 est égale à la sortie et la variable x_2 s'exprime en fonction de la sortie, de la dérivée de la sortie et de l'entrée : $x_2 = (\dot{y} - 3y)/2u$ si $u \neq 0$. Ainsi, toutes les variables sont connues à partir de la sortie, de l'entrée et de leurs dérivées quand l'entrée u est différente de zéro. L'observabilité du système 2.3 dépend donc de l'entrée.

La notion d'observabilité est liée à celle de l'indistingabilité. La définition de l'indistingabilité est la même pour les systèmes linéaires et non linéaires sauf que pour le cas non linéaire, on rajoute le caractère admissible de la commande. Ces commandes sont celles non singulières du système. Pour plus de détails sur les commandes admissibles, on peut se référer à l'ouvrage [Nijmeijer et der Schaft, 1990].

L'avantage de l'observabilité locale faible et de l'observabilité générique.

Conditions de rang d'observabilité et observabilité générique : Les deux définitions qui suivent sont extraites de [Hermann et Krener, 1977].

Définition 3 *Considérons le système :*

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.4)$$

où $x(t) \in \mathcal{R}^n$, $u(t) \in \mathcal{R}^m$ et $y(t) \in \mathcal{R}^p$. L'espace d'observabilité, noté H , est le plus petit sous-espace vectoriel de fonction de \mathcal{N} à valeur dans \mathcal{R} , contenant h_1, h_2, \dots, h_p et fermé sous l'opération de dérivation de Lie par rapport au champ de vecteur $f(x, u)$, u étant fixé.

On note dH l'espace des différentielles des éléments de H . Cet espace est, bien entendu, défini pour une entrée donnée.

Définition 4 L'espace $dH(x_0)$ (c'est à dire évalué en x_0) caractérise l'observabilité faible locale en x_0 du système 2.4. Le système 2.4 satisfait la condition de rang d'observabilité en x_0 si :

$$\dim(dH(x_0)) = n \quad (2.5)$$

Le système 2.4 satisfait la condition de rang d'observabilité si, pour tout $x \in \mathcal{N}$:

$$\dim(dH(x)) = n \quad (2.6)$$

Théorème 1 Si le système 2.4 satisfait la condition de rang d'observabilité en x_0 , alors le système 2.4 est localement faiblement observable en x_0 .

Si le système 2.4 satisfait la condition de rang d'observabilité, alors le système 2.4 est localement faiblement observable.

Un théorème présenté dans [Marquez, 2003], nous permet de déterminer les propriétés d'observabilité d'un système non linéaire :

Théorème 2 Soit :

$$Obs = \begin{pmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h}{h} \partial x \\ \vdots \\ \frac{\partial L_f^{n-1} h}{h} \partial x \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

la matrice d'observabilité du système 2.4.

Le système non linéaire donné par 2.4 est génériquement observable sauf pour certaines valeurs particulières de x et de u si et seulement si :

$$\text{rang}(Obs) = n \quad (2.8)$$

où $L_f h$ est la dérivée de Lie (définition de la dérivé de Lie donnée ci-dessous) de h le long du champ de vecteur f . C'est une matrice de dimension $p * n$.

La dérivée de Lie d'une fonction λ dans la direction du champ de vecteurs f de dimension n , noté $L_f\lambda(x)$ est défini par :

$$L_f\lambda(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} f_i(x) \quad (2.9)$$

Dans la suite, les conventions d'écriture suivantes seront utilisées :

$$\begin{cases} L_f^0 h_i(x) = h_i(x) \\ L_f(L_f h_i(x)) = L_f^2 h_i(x) \end{cases} \quad (2.10)$$

Une autre formulation du théorème 2 est donnée par :

Le système non linéaire donné par 2.4 est génériquement observable sauf pour certaines valeurs particulières de x et de u si et seulement si l'espace d'état (\mathcal{R}^n) est inclus dans l'image de la matrice d'observabilité ($Im(Obs)$).

Observabilité partielle de l'état

Dans certains cas, en vue de l'observation d'un procédé, il suffit qu'une partie de l'état simplement soit observable. On introduit alors un sous-espace de l'espace d'état que nous nommerons sous-espace d'état à observer et nous utiliserons la lettre E par souci de simplification.

Dans ce cas, nous introduisons donc l'observabilité générique d'un sous-espace de l'état :

Théorème 3 *Le sous-espace de l'état à observer E est génériquement observable sauf pour certaines valeurs particulières de x et de u si et seulement si E est inclus dans l'image de la matrice d'observabilité ($Im(obs)$).*

Ce concept d'observabilité d'une partie de l'état seulement, sera très utilisé dans le prochain chapitre concernant les redondances d'ensemble de capteurs.

Ayant défini l'observabilité pour des systèmes non linéaires et les méthodes pour déterminer les propriétés d'observabilité d'un système, nous pouvons maintenant nous intéresser aux propriétés de commandabilité ou d'accessibilité d'un système.

2.2.2 Accessibilité d'un système

Avant d'introduire la notion d'accessibilité, mettons l'accent sur les différences entre la commandabilité et l'accessibilité [Graebe et Salgado, 2001].

Différence entre accessibilité et commandabilité

Le but de la commandabilité est de se demander si un état initial x_0 peut être ramené à l'origine en un temps fini en utilisant la commande $u(t)$. Formellement, la définition de la commandabilité est donnée par :

Définition 5 Un état x_0 est dit commandable s'il existe un intervalle de temps fini $[0, T]$ et une entrée $u(t), t \in [0, T]$ tel que $x(T) = 0$. Si tous les états sont commandables, alors le système est dit complètement commandable.

Un concept souvent relié à la commandabilité est l'accessibilité. Il est formellement défini comme suit :

Définition 6 Un état x_0 est dit accessible (depuis l'origine) si, étant donné $x(0) = 0$, il existe un intervalle de temps fini $[0, T]$ et une entrée $u(t), t \in [0, T]$ telle que $x(T) = x_0$. Si tous les états sont accessibles, alors le système est dit complètement accessible.

Ainsi, pour les systèmes linéaires continus et stationnaires, il n'y a pas de distinction entre la commandabilité complète et l'accessibilité complète. Par contre, l'exemple qui suit illustre le fait que ces deux concepts sont bien différents si l'on travaille avec des systèmes discrets.

Considérons le système suivant :

$$x(k+1) = 0 \tag{2.11}$$

Ce système est bien évidemment complètement commandable : l'état va directement à l'origine. Par contre, aucun état différent de zéro est accessible.

Les méthodes de test de la commandabilité étant bien connu, nous passerons directement à l'analyse des systèmes non linéaires. Si le lecteur souhaite d'autres informations sur la commandabilité et l'accessibilité en linéaire, il pourra se référer à [Graebe et Salgado, 2001].

Comme pour les systèmes à événements discrets, en non linéaire, les notions d'accessibilité et de commandabilité sont différentes. Nous nous intéresserons ici à l'accessibilité puisque notre objectif sera bien d'accéder à des états donnés en un temps fini.

Analyse de l'accessibilité d'un système non linéaire affine en la commande

Définition 7 Etant donné un système non linéaire affine en la commande :

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i \tag{2.12}$$

avec m entrée de commandes u_1, u_2, \dots, u_m . où f et g_i sont des vecteurs de fonction de dimension n . Si $g = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_m]$, l'ensemble accessible est la plus petite distribution invariante par f et g et contenant le champ de vecteur g .

Mathématiquement, l'analyse de l'accessibilité est générée en trois étapes [Szederkenyi *et al.*, 2002] :

Etape préliminaire La distribution initiale est :

$$\Delta_0 = \text{Span}\{g_1, g_2, \dots, g_m\} \tag{2.13}$$

Première étape Dans un premier temps, Δ_0 est étendu par le crochet de Lie de f et de g .

$$\Delta_1 = \Delta_0 + [f, \Delta_0] = \text{span}\{g_1, \dots, g_m, [f, g_1], \dots, [f, g_m]\} \quad (2.14)$$

avec $[f, g_i](x) = \frac{\partial g_i}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial x} g_i(x)$

Deuxième étape Ensuite, nous calculons Δ_2 donné par :

$$\Delta_2 = \Delta_1 + [f, \Delta_1] + \sum_{i=1}^m [g_i, \Delta_1] \quad (2.15)$$

Dans cette deuxième étape, récursivement, $\Delta_3, \dots, \Delta_{N+1}$ peuvent être calculées :

$$\Delta_{N+1} = \Delta_N + [f, \Delta_N] + \sum_{i=1}^m [g_i, \Delta_N] \quad (2.16)$$

La séquence se termine à $k = k'$ si $\Delta_{k'+1} = \Delta_{k'}$ (au plus, $k' = N - 1$ où N est la dimension de l'état).

Troisième étape La dernière étape consiste à conclure sur les propriétés d'accessibilité du système. Pour ce faire, il suffit de déterminer la dimension de $\Delta_{k'}$ qui correspond à la dimension de l'espace accessible. Le système est dit génériquement accessible sauf pour certaines valeurs particulières de x et de u si et seulement si $\dim(\Delta_{k'}) = n$. Cette définition vient du fait qu'il est nécessaire que l'espace d'état (\mathcal{R}^N) soit inclus dans l'espace accessible ($\Delta_{k'}$).

Accessibilité d'un système non affine en la commande

Certains systèmes non affines en la commande (donc de la forme très générale $\dot{x} = f(x, u)$) peuvent être mis sous forme affine en la commande par rapport à une nouvelle entrée grâce à un changement de variable. Pour plus d'informations à ce sujet, le lecteur pourra consulter [Dumont *et al.*, 2004b].

Accessibilité d'une partie de l'état

Dans certains cas, en vue de la commande d'un procédé, il est utile qu'une partie seulement de l'état soit accessible. On introduit alors un sous-espace de l'espace d'état à accéder que nous appelons E .

Dans ce cas, nous introduisons l'accessibilité générique d'un sous-espace de l'état :

Théorème 4 *Le sous-espace de l'état à accéder E est génériquement accessible sauf pour certaines valeurs particulières de x et de u si et seulement si E est inclus dans l'espace des états accessibles ($\Delta_{k'}$) calculé dans la sous-section 2.2.2.*

2.2.3 Conclusion

L'analyse de la tolérance aux fautes d'un système nécessite de connaître ses propriétés d'observabilité et d'accessibilité (ou de commandabilité dans le cas linéaire) dont les définitions viennent d'être présentées.

Intéresserons-nous maintenant à l'évolution de ces propriétés suite à des pannes de capteurs et/ou d'actionneurs.

2.3 Propriété de redondance et de minimalité des ensembles d'actionneurs et de capteurs

Le problème qui consiste à déterminer le nombre optimal de capteurs pour des systèmes chimiques, pétrochimiques, électriques ... en vue de les surveiller par un module de détection et de localisation des défauts reçoit une attention grandissante depuis quelques années. Si des défaillances de capteurs apparaissent, le diagnostic du système peut être mené si les variables mesurées par ces capteurs défaillants peuvent être estimées en utilisant d'autres moyens tels que la redondances de capteurs. Considérant cette remarque, le choix de l'instrumentation (nombre et position des capteurs) est un paramètre essentiel dans l'efficacité du système de tolérance aux fautes. Lorsque la détection et la localisation de défaut(s) est impossible (ou risque de devenir impossible suite à des défaillances sur le système) avec les capteurs et actionneurs présents sur le système, se pose alors la question d'ajouter de nouveau(x) composant(s). Des méthodes basées sur l'analyse structurelle [Commault *et al.*, 2006] [Sauter *et al.*, 2006] peuvent donner des solutions pour fournir les conditions de détection et de localisation des défauts et pour rendre ainsi possible la mise en place d'une commande tolérante aux fautes. Dans notre cas, la nature et le nombre de capteurs sont supposés déterminés; cependant, il est intéressant de connaître l'évolution des propriétés d'observabilité du système suite à la perte de capteurs. Cette démarche est appelée "analyse de la tolérance aux défaillances de capteurs d'un système".

Dans la littérature, l'analyse de la tolérance aux défaillances de capteurs des systèmes linéaires statiques a été étudiée très tôt par Vaclavek [Vaclavek, 1969], puis reprise et développée dans [Mah *et al.*, 1976] [Crowe *et al.*, 1983]. Plus récemment, les Gramiens d'observabilité et de commandabilité ont été utilisés pour évaluer le recouvrement de l'espace d'état des systèmes linéaires dynamiques [Frei *et al.*, 1999]. Des approches graphiques et symboliques sont introduites par [Staroswiecki *et al.*, 1999].

Ainsi dans ce paragraphe, nous étendons au cas de systèmes non linéaires des notions connues telles que les indices d'observabilité, de pseudo-observabilité et d'observabilité individuelle par rapport à une fonctionnelle des variables d'état. Ces derniers ont été définis dans le cas de l'ob-

servabilité (commandabilité) complète par Bingulac [Bingulac et Kitolica, 1987]. Staroswiecki *et al.* les ont utilisés dans le cas d'une fonctionnelle linéaire [Staroswiecki *et al.*, 1999].

Certains théorèmes existant en linéaire ont été généralisés au cas non linéaire. D'autres notions [Hoblos, 2001] telles que les Ensembles de capteurs (actionneurs) Minimaux (EM) et Redondants (ER) fondées sur les indices d'observabilité individuelle ainsi que leur représentations sous forme graphique seront rappelées. De nombreux exemples illustreront l'exposé.

L'analyse de la tolérance aux fautes du point de vue des capteurs est importante pour connaître les capacités d'estimation d'un système. Cependant, l'analyse de la tolérance aux défaillances d'actionneurs d'un système représente également une étape capitale pour connaître les capacités de la loi de commande d'un processus suite à l'apparition de défauts d'actionneurs. Ce problème a été étudié en combinaison avec le placement de capteurs ou indépendamment. De nombreuses approches ont été utilisées pour résoudre ce problème, parmi lesquelles nous pouvons citer l'approche statistique utilisée par Burdisso et Haftka ([Burdisso et Haftka, 1989] [Burdisso et Haftka, 1990]) et les algorithmes génétiques par Rao et Venkayya ([Rao *et al.*, 1991]). [Viswanathan *et al.*, 1984] ont défini les notions de degré de commandabilité et les ont appliquées pour optimiser le positionnement d'actionneurs. Afin de connaître la tolérance aux fautes d'actionneurs, plusieurs critères ont pu être utilisés tels que la fiabilité et les degrés de redondance ([Staroswiecki *et al.*, 2004]). Tout comme pour les capteurs, ce paragraphe sera l'occasion d'étendre au cas non-linéaire des notions connues en linéaire telles que indices d'accessibilité, de pseudo-accessibilité et d'accessibilité individuelle par rapport à une fonctionnelle linéaire des variables d'état ainsi que les Ensembles d'actionneurs Minimaux (EM) et Redondants (ER) et leur représentation sous forme graphique.

2.3.1 Analyse de la tolérance aux fautes d'un système du point de vue des capteurs

Définitions et propriétés des indices d'observabilité

Nous considérons le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y(t) = h(x(t)) \\ z(t) = e(x(t)) \end{cases} \quad (2.17)$$

où $x(t) \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y(t) \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie et $z(t) \in \mathcal{R}^q$ est un vecteur à estimer (avec $q \leq n$).

Indices d'observabilité individuels [Bingulac et Kitolica, 1987] ont introduit le terme d'indice d'observabilité individuel pour les systèmes linéaires. Cet indice évalue la capacité de recou-

virement de chaque capteur par rapport à l'espace d'état. Voici, une extension de la définition de Bingulac aux systèmes non linéaires.

Définition 8 *Le vecteur d'observabilité générique individuel, noté v , est défini par :*

$$v = (v_1, \dots, v_p), 1 \leq v_i \leq n \quad (2.18)$$

où $v_i \in v$ est le rang d'observabilité générique du système :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y = h_i(x) \end{cases} \quad (2.19)$$

avec h_i le i ème élément du vecteur d'observation h . Ainsi

$$v_i = \text{rang} \begin{pmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_i}{\partial x} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_f^{n-1} h_i}{\partial x} \end{pmatrix} = n \quad (2.20)$$

Vecteur d'indices de pseudo-observabilité du système Soit I_c l'ensemble des capteurs du processus.

Par définition, un sous-espace E de l'espace d'état est observable s'il est couvert par le système d'instrumentation disponible. Chaque capteur participe individuellement à la couverture d'un certain sous espace de l'espace d'état.

La définition qui suit est une extension au cas non linéaire de la définition donnée dans [Staroswiecki *et al.*, 1999]

Définition 9 *Un vecteur μ tel que $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_p)$ où $0 \leq \mu_i \leq n$ et $\sum_{i=1}^p \mu_i = n$ est un vecteur d'indice de pseudo-observabilité du système.*

De la définition précédente, il est clair que les indices d'observabilité associés au système 2.17 ne sont pas uniques.

Théorème 5 *Un vecteur d'indices de pseudo-observabilité μ associé à un ensemble de p capteurs I_c est admissible par rapport à un espace E si et seulement si :*

$$OBS(I_c, \mu) = \left(OBS(1, \mu_1) \quad OBS(2, \mu_2) \quad \dots \quad OBS(p, \mu_p) \right)^T \quad (2.21)$$

satisfait la condition :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(I_c, \mu) \end{bmatrix} = \text{rang}(OBS(I_c, \mu)) \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned}
 \text{où } OBS(i, \alpha) &= [] \text{ si } \alpha = 0 \\
 OBS(i, \alpha) &= \left[\frac{\partial h_i}{\partial x} \right] \text{ si } \alpha = 1 \\
 OBS(i, \alpha) &= \left(\begin{array}{c} \frac{\partial h_i}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_i}{\partial x} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_f^{\alpha-1} h_i}{\partial x} \end{array} \right) \text{ si } \alpha > 1
 \end{aligned}$$

Pour prendre en considération un vecteur d'indices de pseudo-observabilité, il est nécessaire que ce dernier soit admissible. En effet, avec des vecteurs d'indices de pseudo-observabilité non admissibles, z n'est pas observable.

L'ensemble des vecteurs d'indices de pseudo-observabilité admissible constitue les différentes possibilités d'estimation d'une fonctionnelle de l'état.

Recouvrement d'espace, redondance et minimalité

Recouvrement de l'espace

Définition 10 Soit i un capteur quelconque ($i \in I_c$). Ce capteur couvre un sous-espace Γ_i de dimension v_i , où v_i est l'indice d'observabilité individuel de i , donné par la définition 8.

Le sous-espace Γ_i est donné par :

$$\Gamma_i = Im \left(\begin{array}{c} \frac{\partial h_i}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_i}{\partial x} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_f^{v_i-1} h_i}{\partial x} \end{array} \right) \quad (2.23)$$

Cette définition nous permet d'énoncer les théorèmes suivants :

Théorème 6 Observabilité par un capteur : la fonctionnelle $e(x)$ est observable par le capteur i si et seulement si :

$$Im(E) \subseteq \Gamma_i$$

ou

$$rang \left[\begin{array}{c} E \\ OBS(i, v_i) \end{array} \right] = rang(OBS(i, v_i)) \quad (2.24)$$

où $OBS(i, v_i)$ est défini dans la définition 5

Si $v_i = n$ alors le système est complètement observable par le capteur i .

L'espace Γ_{I_c} couvert par l'ensemble des capteurs de I_c est donné par :

$$\Gamma_{I_c} = \Gamma_1 \oplus \Gamma_2 \oplus \dots \oplus \Gamma_p \quad (2.25)$$

où \oplus représente la somme directe des sous-espaces.

Théorème 7 *Observabilité par un ensemble de capteurs : la fonctionnelle $e(x)$ est observable par l'ensemble de capteurs I_c si et seulement si :*

$$Im(E) \subseteq \Gamma_{I_c}$$

ou

$$rang \begin{bmatrix} E \\ OBS(I_c, v) \end{bmatrix} = rang(OBS(I_c, v)) \quad (2.26)$$

où $OBS(I_c, v)$ est défini dans la définition 5.

Théorème 8 *Observabilité complète : La condition nécessaire et suffisante pour que le système 2.17 soit observable est donnée par :*

$$dim(\Gamma_{I_c}) = n \quad (2.27)$$

Redondance et minimalité Soit J un sous-espace quelconque de I_c et $I_c \setminus J$ son complémentaire dans I_c . Dans la suite, nous allons introduire les notions de redondance et de minimalité, selon les possibilités de recouvrement d'un système d'instrumentation.

Définition 11 *Ensemble de capteurs E-minimal (EM) : Un ensemble de capteurs I_c est dit E-minimal, si et seulement si :*

$$\forall J \subset I_c, \begin{cases} Im(E) \subseteq \Gamma_{I_c} \\ \text{et} \\ Im(E) \not\subseteq \Gamma_{I_c \setminus J} \end{cases} \quad (2.28)$$

En d'autres termes, un ensemble de capteurs I_c est dit E-minimal si et seulement si le sous-espace E est observable avec I_c mais non observable par tout ensemble de capteurs strictement inclus dans I_c .

Définition 12 *Ensemble de capteurs E-Redondant (ER) : Un ensemble de capteurs I_c est dit E-redondant, si et seulement si :*

$$\exists J \subset I_c, \text{ tel que } Im(E) \subseteq \Gamma_{I_c \setminus J} \quad (2.29)$$

Une autre formulation de la définition précédente serait : un ensemble de capteurs I_c est dit E-redondant si et seulement si le sous-espace E est observable avec I_c et qu'il existe au-moins un ensemble de capteurs strictement inclus dans I_c qui recouvre également l'espace E .

Définition 13 *Ensemble de capteurs E-insuffisant (EI) : Un ensemble de capteurs I_c est dit E-insuffisant, si et seulement si il est ni E-minimal ni E-redondant. Un ensemble E-insuffisant ne couvre pas l'ensemble de l'espace E . La fonctionnelle $e(x)$ n'est donc pas observable par cet ensemble de capteurs.*

Remarque :

La perte d'un capteur :

- d'un ensemble minimal conduit à un ensemble insuffisant et rend donc la fonctionnelle $e(x)$ non observable.
- d'un ensemble redondant conduit soit à un ensemble redondant, soit à un ensemble minimal soit encore à un ensemble insuffisant.

Supposons maintenant qu'un capteur j défaillant soit détecté et localisé. La possibilité de reconfigurer le système en gardant l'ensemble de la fonctionnelle $e(x)$ estimable suppose que $e(x)$ reste observable avec l'ensemble de capteurs $I_c \setminus \{j\}$.

Ceci ne peut être obtenu que, si et seulement si, la condition suivante est vérifiée :

$$Im(E) \subseteq \Gamma_1 \oplus \dots \oplus \Gamma_{j-1} \oplus \Gamma_{j+1} \oplus \dots \oplus \Gamma_p \quad (2.30)$$

2.3.2 Analyse de la tolérance aux fautes d'un système du point de vue des actionneurs

Définitions et propriétés sur les indices d'accessibilité

Nous considérons le système non linéaire affine en la commande suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \\ z(t) = e(x(t)) \end{cases} \quad (2.31)$$

où $x(t) \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y(t) \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie et $z(t) \in \mathcal{R}^q$ est un vecteur à estimer (avec $q \leq n$).

Les fonctions f , g_i , h et e sont de dimensions appropriées. En particulier, les fonctions g_i sont rassemblées en un vecteur de fonction g , de cette manière : $g = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_m]$

Indices d'accessibilité individuels

L'indice d'accessibilité individuel évalue la capacité de recouvrement de chaque actionneur par rapport à l'espace d'état. Voici, une extension au système non linéaire de la définition existante pour les systèmes linéaires.

Définition 14 Le vecteur d'accessibilité générique individuel, noté v , est défini par :

$$v = (v_1, \dots, v_p), 1 \leq v_i \leq n \quad (2.32)$$

où $v_i \in v$ est le rang d'accessibilité générique du système :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g_i(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (2.33)$$

Le rang d'accessibilité dont nous parlons est égal au rang de la matrice $\Delta_{k'}$ obtenu de la même manière qu'au paragraphe 2.2.2 mais en ne considérant cette fois-ci que la fonction $g_i(x)$. Nous calculons donc $\Delta_{k'}$ ainsi :

Soit la distribution initiale donnée par :

$$\Delta_0 = \text{Span}\{g_i\} \quad (2.34)$$

Dans un premier temps, Δ_0 est étendu par le crochet de Lie de f et de g_i .

$$\Delta_1 = \Delta_0 + [f, \Delta_0] \quad (2.35)$$

avec $[f, g_i](x) = \frac{\partial g_i}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial x} g_i(x)$ Ensuite, nous calculons Δ_2 donné par :

$$\Delta_2 = \Delta_1 + [f, \Delta_1] + [g_i, \Delta_1] \quad (2.36)$$

Récursivement, $\Delta_3, \dots, \Delta_{N+1}$ sont calculés de la manière suivante :

$$\Delta_{N+1} = \Delta_N + [f, \Delta_N] + [g_i, \Delta_N] \quad (2.37)$$

La séquence se termine à $k = k'$ si $\Delta_{k'+1} = \Delta_{k'}$ (au plus, $k' = N - 1$ où N est la dimension de l'état).

Vecteur d'indices de pseudo-accessibilité du système

Définition 15 Un vecteur μ tel que $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_m)$ où $0 \leq \mu_i \leq n$ et $\sum_{i=1}^p \mu_i = n$ est un vecteur d'indice de pseudo-accessibilité du système.

De la définition précédente, il est clair que les indices d'accessibilité associés au système 2.31 ne sont pas uniques.

Définition 16 Un vecteur d'indice de pseudo-accessibilité μ associé à un ensemble d'actionneurs I_a est admissible si et seulement si :

$$\text{ACC}(I_a, \mu) = \left(\text{ACC}(1, \mu_1) \quad \text{ACC}(2, \mu_2) \quad \dots \quad \text{ACC}(m, \mu_m) \right)^T \quad (2.38)$$

satisfait la condition :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ \text{ACC}(I_a, \mu) \end{bmatrix} = \text{rang}(\text{ACC}(I_a, \mu)) \quad (2.39)$$

où $\text{ACC}(i, \alpha) = []$ si $\alpha = 0$

$\text{ACC}(i, \alpha) = \Delta_{\alpha-1}$ avec $\Delta_{\alpha-1}$ calculé pour l'actionneur i par la méthode du paragraphe 2.3.2 si $\alpha \geq 1$

Pour prendre en considération un vecteur d'indices de pseudo-accessibilité, il est nécessaire que ce dernier soit admissible. En effet, avec des vecteurs d'indices de pseudo-accessibilité non admissibles, z n'est pas accessible.

L'ensemble des vecteurs d'indices de pseudo-accessibilité admissible constitue les différentes possibilités de commande d'une fonctionnelle de l'état.

Recouvrement d'espace, redondance et minimalité au niveau des actionneurs

Soit I_a l'ensemble des actionneurs du processus.

Par définition, un sous-espace E de l'espace d'état est accessible s'il est couvert par le système de commande disponible. Chaque actionneur participe individuellement à la couverture d'un certain sous-espace de l'espace d'état.

Recouvrement de l'espace

Définition 17 Soit i un actionneur quelconque ($i \in I_a$). Cet actionneur couvre un sous-espace Γ_i de dimension v_i , où v_i est l'indice d'accessibilité individuel de i , donné par la définition 14. Le sous-espace Γ_i est donné par $\Delta_{k'}$ calculé au paragraphe 2.3.2 :

Cette définition nous permet d'énoncer les théorèmes suivants :

Théorème 9 *Accessibilité par un actionneur : la fonctionnelle $e(x)$ est accessible par l'actionneur i si et seulement si :*

$$Im(E) \subseteq \Gamma_i$$

Si $v_i = n$ alors le système est complètement accessible par l'actionneur i .

L'espace Γ_{I_a} couvert par l'ensemble des actionneurs de I_a est donné par :

$$\Gamma_{I_a} = \Gamma_1 \oplus \Gamma_2 \oplus \dots \oplus \Gamma_m \quad (2.40)$$

où \oplus représente la somme directe des sous-espaces.

Théorème 10 *Accessibilité par un ensemble d'actionneurs : la fonctionnelle $e(x)$ est accessible par l'ensemble d'actionneurs I_a si et seulement si :*

$$Im(E) \subseteq \Gamma_{I_a}$$

Théorème 11 *Accessibilité complète : La condition nécessaire et suffisante pour que le système 2.31 soit accessible est donnée par :*

$$dim(\Gamma_{I_a}) = n \quad (2.41)$$

Redondance et minimalité Soit J un sous-espace quelconque de I_a et $I_a \setminus J$ son complémentaire dans I_a . Dans la suite, nous allons introduire les notions de redondance et de minimalité au niveau des actionneurs, selon les possibilités de recouvrement d'un système d'instrumentation.

Définition 18 *Ensemble d'actionneurs E-minimal (EM) : Un ensemble d'actionneurs I_a est dit E-minimal, si et seulement si :*

$$\forall J \subset I_a, \begin{cases} Im(E) \subseteq \Gamma_{I_a} \\ \text{et} \\ Im(E) \not\subseteq \Gamma_{I_a \setminus J} \end{cases} \quad (2.42)$$

En d'autres termes, un ensemble d'actionneurs I_a est dit E-minimal si et seulement si le sous-espace E est accessible avec I_a mais non accessible par tout ensemble d'actionneurs strictement inclus dans I_a .

Définition 19 *Ensemble d'actionneurs E-Redondant (ER) : Un ensemble d'actionneurs I_a est dit E-redondant, si et seulement si :*

$$\exists J \subset I_a, \text{ tel que } Im(E) \subseteq \Gamma_{I_a \setminus J} \quad (2.43)$$

Une autre formulation de la définition précédente serait : un ensemble d'actionneurs I_a est dit E-redondant si et seulement si le sous-espace E est accessible avec I_a et qu'il existe au-moins un ensemble d'actionneurs strictement inclus dans I_a qui recouvre également l'espace E .

Définition 20 *Ensemble d'actionneurs E-insuffisant (ES) : Un ensemble d'actionneurs I_c est dit E-insuffisant, si et seulement si il n'est ni E-minimal ni E-redondant. Un ensemble E-insuffisant ne couvre pas l'ensemble de l'espace E . La fonctionnelle $e(x)$ n'est donc pas accessible.*

Remarque :

La perte d'un actionneur :

- d'un ensemble minimal conduit à un ensemble insuffisant et rend donc la fonctionnelle $e(x)$ non accessible.
- d'un ensemble redondant conduit soit à un ensemble redondant, soit à un ensemble minimal soit encore à un ensemble insuffisant.

Supposons maintenant qu'un actionneur j défaillant soit détecté et localisé. La possibilité de reconfigurer le système en gardant l'ensemble de la fonctionnelle $e(x)$ accessible suppose que $e(x)$ reste accessible avec l'ensemble d'actionneurs $I_a \setminus \{j\}$.

Ceci ne peut être obtenu que, si et seulement si, la condition suivante est vérifiée :

$$Im(E) \subseteq \Gamma_1 \oplus \dots \oplus \Gamma_{j-1} \oplus \Gamma_{j+1} \oplus \dots \oplus \Gamma_m \quad (2.44)$$

2.3.3 Représentation graphique des sous-ensembles de capteurs (d'actionneurs) redondants

Dans ce paragraphe ainsi que dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une représentation graphique des sous-ensembles de capteurs redondants; cependant, il est à noter que cette représentation peut-être appliquée pour l'étude de la redondance des sous-ensembles d'actionneurs.

Soit I l'ensemble de capteurs du système d'instrumentation et J un sous-ensemble inclus dans I .

L'ensemble des sous-ensembles de I peut être représenté par un automate dans lequel :

- l'ensemble complet des capteurs représente l'état initial,
- un noeud représente une situation de perte de capteurs,
- un niveau contient toutes les situations de pertes, dont les sous-ensembles correspondant ont le même cardinal,
- une transition t_{ij} est une fonction booléenne ou probabiliste entre un noeud du niveau k et un noeud du niveau $k + 1$, qui définit la condition de passage entre deux situations de pertes.

Nous pouvons remarquer que, si le cardinal de I est égal à p , le nombre des sous-ensemble inclus dans I est égal à 2^p . Chacun (sauf I) correspond à une configuration du système résultant de la perte d'un ou de plusieurs capteurs.

Exemple 2 Soit $I = \{a,b,c\}$, l'ensemble de capteurs disponibles. L'ensemble des situations possibles est donné par :

$S = \{s(a),s(b),s(c)\}$, t.q. $s(k) = 0$ si le capteur correspondant est défaillant, 1 si le capteur correspondant est sain $\forall k \in \{a,b,c\}$ Dans cet exemple, les situations possibles $\{1, 1, 1\}$, $\{1, 1, 0\}$, $\{1, 0, 1\}$, $\{0, 1, 1\}$, $\{1, 0, 0\}$, $\{0, 1, 0\}$, $\{0, 0, 1\}$, $\{0, 0, 0\}$ sont respectivement représentées par les noeuds 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8. La figure 2.1 illustre un tel automate.

t_{ij} représente la transition entre le noeud i et le noeud j suite à la perte d'un capteur.

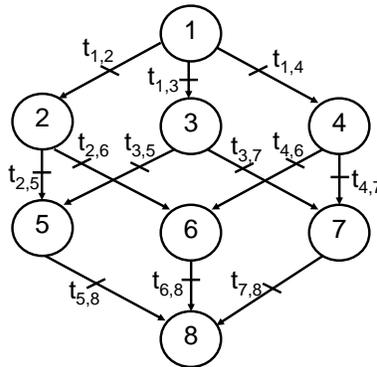


FIG. 2.1 – Automate générant toutes les situations de perte de capteurs

Les règles suivantes peuvent être définies :

- Une fonctionnelle linéaire $e(x)$ est observable par un sous-ensemble de capteurs J , si et seulement si l'espace couvert Γ_J par la matrice d'observabilité correspondante contient $Im(E)$: $Im(E) \subseteq \Gamma_J$
- Une fonctionnelle linéaire $e(x)$ observable par un sous-ensemble de capteurs J , est observable par n'importe quel sous-ensemble de capteurs contenant J .

Pour distinguer les sous-ensembles de I pour lesquels la fonctionnelle $e(x)$ est observable, i.e. les ER et EM, nous les représentons par des noeuds gris. Si $e(x)$ est observable avec les noeuds 1, 2, 3, 4, 5 alors l'automate de la figure 2.1 devient :

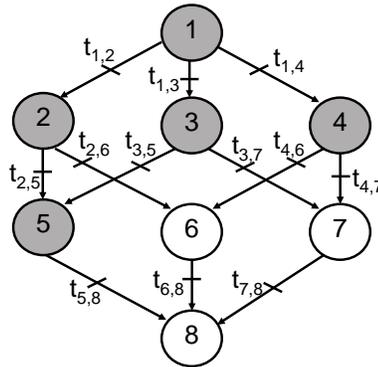


FIG. 2.2 – Automate générant tous les EM et ER par rapport à E

Les noeuds 4 et 5 dont tous les successeurs sont en blanc sont des situations terminales correspondant à des sous-ensembles EM par rapport à E.

Implantation : Du point de vue pratique, un tel automate peut être placé en aval d'un bloc FDI pour déterminer si l'ensemble de capteurs restant est capable d'accomplir la tâche d'estimation ou non (cf figure 2.3). En effet, l'automate reçoit des informations binaires sur les situations actuelles des capteurs (0 = capteur défaillant, 1 = capteur sain), et donne en sortie une indication binaire indiquant si l'ensemble de capteurs restant est un ER, un EM ou un EI (0 = EI, 1 = ER ou EM). Si le noeud atteint est en gris, on peut continuer à estimer le vecteur e , sinon une procédure de réparation doit être suivie, pour éliminer le risque dans les meilleurs délais.

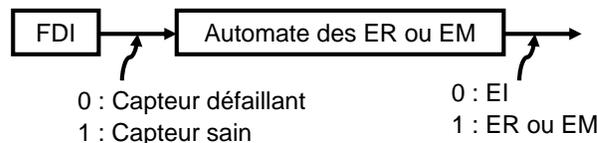


FIG. 2.3 – Implantation d'un automate des ER et EM

Cet automate constitue donc un modèle de base pour analyser la tolérance aux fautes d'un système d'instrumentation (d'action) en vue de l'estimation (de la commande) d'une fonctionnelle $e(x)$ que nous allons présenter.

2.3.4 Evaluation de la tolérance aux fautes

G. Hoblos a travaillé sur l'évaluation de la tolérance aux fautes et nous rappellerons dans cette section quelques définitions tirées de sa thèse [Hoblos, 2001].

Soit F le sous-graphe contenant les situations grises de l'automate des ER. Supposons que tous les capteurs soient en fonctionnement normal au départ : le système part du sommet initial I et transite vers un niveau inférieur à chaque perte de capteur, jusqu'à arriver en un noeud terminal en lequel la perte de tout capteur supplémentaire causera la perte de l'observabilité, c'est à dire l'impossibilité d'estimer la fonctionnelle e . La tolérance aux fautes de capteurs peut donc s'évaluer par la longueur de ces chemins, elle même fonction de la pondération de leurs arcs. Nous proposons alors d'utiliser deux types de pondérations :

- la pondération unitaire conduit à des mesures structurelles (degrés de redondance), qui évaluent le nombre de capteurs qu'il faut perdre pour que le système devienne inobservable,
- la pondération probabiliste conduit à une mesure de fiabilité qui évalue le temps moyen avant la perte de la propriété d'observabilité.

L'analyse de la capacité d'un système à tolérer les fautes revient donc à une évaluation structurelle ou probabiliste.

Evaluation structurelle

Dans cette partie, nous généralisons les définitions de degrés de redondance en les associant à un couple (J, e) , où J est le sous-ensemble de capteurs utilisé pour estimer e , dans le cas des systèmes dynamiques. En considérant l'automate présenté dans le paragraphe précédent, ces degrés possèdent des interprétations graphiques comme on le verra par la suite.

Définitions

Définition 21 Degré de redondance faible : Le degré de redondance faible $d_f(J, e)$ associé au couple (J, e) est le nombre maximal de capteurs de J qu'on peut perdre tout en continuant à estimer la fonctionnelle linéaire e . Ce degré est donné par : $d_f(J, e) = |J| - \min_i |EM_i|$, où EM_i représente un sous-ensemble de capteurs minimal quelconque inclus dans J .

Le degré de redondance faible est une mesure "optimiste" de la tolérance aux fautes, comme le montre l'exemple suivant :

$$I = \{a, b, c\}, EM_1 = \{a\}, EM_2 = \{b, c\}$$

Le degré de redondance faible est 2. En effet, on peut perdre b et c tout en continuant à estimer e grâce à a , mais on voit qu'il suffit de perdre le capteur a pour aboutir à $\{b, c\}$ qui est un EM c'est à dire qu'il ne tolère plus aucune perte. Une mesure plus réaliste (en ce sens qu'elle est pessimiste, donc qu'elle fournit une tolérance garantie) est donnée par le degré de redondance fort.

Définition 22 Degré de redondance fort : Le degré de redondance fort $d_F(J, e)$ associé au couple (J, e) est le nombre maximal de capteurs de J qu'on peut perdre tout en continuant à estimer la fonctionnelle linéaire e , quelques soient ces capteurs perdus. Analytiquement, ce degré est donné par : $d_F(J, e) = |J| - \max_i |EI_i| - 1$

Interprétation graphique En considérant le graphe F , nous pouvons dire que :

- Le degré de redondance faible associé au couple (J, e) peut être interprété comme la longueur du chemin le plus long entre la situation j et n'importe quelle situation terminale successeur de j .
- Le degré de redondance fort associé au couple (J, e) est la longueur du chemin le plus court entre j et n'importe quel successeur correspondant à un sous-ensemble de capteurs EI moins 1.

Evaluation fiabiliste

L'évaluation fiabiliste ne sera pas utilisée dans ce mémoire et ne sera donc pas détaillée. Nous pouvons simplement noter que l'évaluation fiabiliste consiste à calculer le temps moyen avant la perte de l'observabilité (MTBNO : Mean Time Before Non Observability) pour chaque ensemble de capteurs redondant ou minimal. Pour plus de détails sur l'évaluation fiabiliste, le lecteur pourra se référer à [Aitouche et Hoblos, 2002]

2.3.5 Exemple d'analyse de la tolérance aux fautes de capteurs sur un système non linéaire

Afin d'illustrer le chapitre précédent et celui en cours, nous allons prendre un exemple de système non linéaire :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = f(x, u) = \begin{pmatrix} x_2 x_1 + u_1 \\ 2x_3 \\ x_3 + u_2 \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = h(x) = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ x_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Les capteurs mesurants y_1 et y_2 sont appelés respectivement c_1 et c_2 et la réunion des deux capteurs forme l'ensemble de capteurs I_c .

Le sous-espace de l'état à estimer est $z = e(x) = E.x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \end{pmatrix}$. Ainsi $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ et il est à noter que l'exemple n'a aucune signification physique ; il est uniquement utilisé pour illustrer les théorèmes et définitions présentés précédemment. Nous n'étudierons, sur ce système, que la redondance de capteurs. Le lecteur pourra également s'inspirer de cet exemple pour étudier la redondance d'actionneurs puisque le principe de l'analyse de la tolérance aux fautes est assez proche pour les actionneurs et les capteurs.

Etude de l'observabilité du système

Afin d'étudier l'observabilité du système, nous calculons d'abord la matrice d'observabilité comme indiqué dans le théorème 2 :

$$Obs = \begin{pmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f}{h} \partial x \\ \frac{\partial L_f^2}{h} \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_2 & x_1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ x_2^2 + 2x_3 & 2x_2x_1 + u_1 & 2x_1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

Le calcul du rang de la matrice d'observabilité est égale à 3 qui est la dimension de l'espace d'état. Nous pouvons en conclure par ce même théorème 2, que le système est génériquement observable quelques soient les valeurs de x et de u .

Comme l'espace d'état est génériquement observable par l'ensemble des capteurs disponibles, il va de soi que la partie z de l'état à estimer est également génériquement observable quelques soient les valeurs de x et de u .

Indice d'observabilité individuel

Par la définition 8, nous pouvons calculer les indices d'observabilité individuels :

$$v_1 = \text{rang} \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_1}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f^2 h_1}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & 0 \\ x_2^2 + 2x_3 & 2x_2x_1 + u_1 & 2x_1 \end{pmatrix} = 3 \quad (2.47)$$

sauf pour $x_1 = 0$ où le rang vaut 2 si $u_1 \neq 0$ et 1 sinon.

et

$$v_2 = \text{rang} \begin{pmatrix} \frac{\partial h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f^2 h_2}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = 2 \quad (2.48)$$

Ainsi, le vecteur d'indices de pseudo-observabilité individuel du système 2.45 est égale à $v = \begin{pmatrix} 3 & 2 \end{pmatrix}$ sauf pour $x_1 = 0$.

Le système est donc génériquement observable, sauf pour $x_1 = 0$, par le capteur 1 uniquement mais il n'est pas génériquement observable par le capteur 2 (puisque $v_2 = 2 < 3$)

Vecteurs d'indice de pseudo-observabilité et admissibilité

D'après la définition 9 et d'après le théorème 5, nous pouvons regrouper dans le tableau 2.1, l'ensemble des vecteurs d'indices de pseudo-observabilité en indiquant pour chacun d'eux s'il est admissible (A) ou non-admissible (NA) par rapport E.

vecteurs d'indices de pseudo-observabilité	Admissibilité
(3, 0)	A
(2, 1)	NA
(1, 2)	A
(0, 3)	NA

TAB. 2.1 – Admissibilité des vecteurs de pseudo-observabilité

Dans ce tableau, afin de comprendre comment les propriétés d'admissibilité ont été calculées, prenons l'exemple du vecteur de pseudo-observabilité $\mu = (1, 2)$. Nous calculons :

$$OBS(I_c, \mu) = \left(OBS(1, 1) \quad OBS(2, 2) \right)^T \quad (2.49)$$

avec $OBS(1, 1) = \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} \right]$ $OBS(2, 2) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_2}{\partial x} \end{pmatrix}$

Ainsi

$$OBS(I_c, \mu) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

et nous constatons aisément qu'il satisfait la condition :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(I_c, \mu) \end{bmatrix} = \text{rang}(OBS(I_c, \mu)) \quad (2.51)$$

Les deux vecteurs de pseudo-observabilité admissibles par rapport à E constituent les deux possibilités pour l'estimation de z .

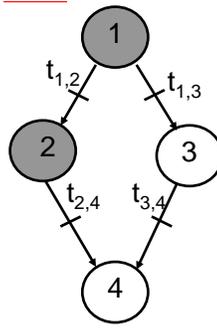


FIG. 2.4 – Automate générant toutes les situations de pertes de capteurs
 $noeud1 = I_c$, $noeud2 = \{c_1\}$, $noeud3 = \{c_2\}$, $noeud4 = \{\}$

Redondance et Minimalité

Il existe quatre ensembles de capteurs : $I_c = \{c_1; c_2\}$, $\{c_1\}$, $\{c_2\}$ et $\{\}$

L'ensemble $\{c_2\}$ ne recouvre pas le sous-espace d'état E . En effet,

$$rang \begin{pmatrix} E \\ \frac{\partial h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f^2 h_2}{\partial x} \end{pmatrix} = rang \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = 3 > rang \begin{pmatrix} \frac{\partial h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f h_2}{\partial x} \\ \frac{\partial L_f^2 h_2}{\partial x} \end{pmatrix} = rang \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = 2 \quad (2.52)$$

Par le même calcul, nous constatons que $\{c_1\}$ et I_c recouvrent l'un et l'autre le sous-espace de l'état à estimer E .

Ainsi, l'ensemble $\{c_2\}$ est E -insuffisant, l'ensemble $\{c_1\}$ est E -minimal (puisque'il n'existe pas de sous-ensemble de capteurs strictement inclus dans $\{c_1\}$ qui recouvre également l'espace E) et l'ensemble I_c est E -redondant (puisque'il existe au-moins un sous-ensemble de capteurs strictement inclus dans I_c , l'ensemble $\{c_1\}$ en l'occurrence, qui recouvre l'espace E).

Bien évidemment, l'ensemble de capteurs vide $\{\}$ est E -insuffisant.

Représentation graphique de la redondance de capteurs

L'automate regroupant l'ensemble de capteurs I_c et tous ses sous-ensembles de capteurs est donné par la figure 2.4.

Evaluation structurelle

D'après les définitions 22 et 21, nous pouvons dire que le degré de redondance faible de I_c est égal à 1 et que son degré de redondance fort est nul. Ainsi, l'estimation du sous-espace E deviendrait

impossible en cas de perte d'un seul capteur si ce dernier est $\{c_1\}$.

2.3.6 Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons généralisé les notions sur les redondances et minimalités existantes en linéaire au cas non linéaire. Cette étude sur la redondance est indispensable avant de vouloir mettre en place un module de tolérance aux fautes. En effet, il est capital de connaître l'évolution des propriétés d'observabilité (d'accessibilité) suite à la perte d'un ou de plusieurs capteurs (actionneurs) afin de savoir s'il est possible de reconfigurer le système suite à ce défaut tout en gardant la fonctionnelle de l'état estimable (commandable). Ces notions sont également utiles pour calculer l'indice RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability) qui est introduit dans le paragraphe suivant.

2.4 RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability)

Nous avons de présenter des méthodes pour analyser la redondance de capteurs et d'actionneurs en vue de mettre en place un module de tolérance aux fautes. Pour aller un peu plus loin dans l'analyse de la capacité d'un système à tolérer les fautes, une nouvelle question peut-être posée : à l'apparition d'un défaut de capteur, de combien de temps disposons-nous avant de ne plus pouvoir estimer la fonctionnelle de l'état ? Ce temps, que nous appelons RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability), est donc le temps dont nous disposons pour reconfigurer le système à l'apparition d'une défaillance de capteurs en étant sûrs que la fonctionnelle reste estimable pendant la reconfiguration du système [Dumont *et al.*, 2005b]. Afin de présenter ce nouveau concept, nous prendrons l'exemple d'un système linéaire discret autonome :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(k+1) = -x_2(k) + x_6(k) \\ x_2(k+1) = x_1(k) \\ x_3(k+1) = x_2(k) \\ x_4(k+1) = x_5(k) \\ x_5(k+1) = 2x_1(k) \\ x_6(k+1) = x_2 \end{array} \right. \quad (2.53)$$

où la mesure est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(k) = x_2(k) \\ y_2(k) = x_3(k) \\ y_3(k) = x_4(k) \end{array} \right. \quad (2.54)$$

Sur ce système, la fonctionnelle à estimer correspond à tout l'espace d'état.

Dans un premier temps, nous introduirons le RTBNE de manière intuitive, à partir de l'exemple,

dans le but de bien comprendre son intérêt. Ensuite, le RTBNE sera étudié de manière plus théorique avec des définitions et des théorèmes pour le calculer. Enfin, l'exemple utilisé en premier lieu sera repris pour illustrer la théorie.

2.4.1 Introduction au RTBNE à travers un exemple

Fenêtre d'observation

Développons le vecteur mesure de la manière suivante :

$$\begin{cases} y_1(k) = x_2(k) = x_1(k-1) = -x_2(k-2) + x_6(k-2) \\ y_2(k) = x_3(k) = x_2(k-1) = x_1(k-2) \\ y_3(k) = x_4(k) = x_5(k-1) = 2x_1(k-2) \end{cases} \quad (2.55)$$

Nous constatons de cette manière que la donnée de $y(k)$ permet d'estimer $x_2(k)$, $x_3(k)$, $x_4(k)$, $x_1(k-1)$, $x_5(k-1)$ et $x_6(k-2)$.

Ainsi, l'état $x(k-2)$ ne peut être estimé qu'à partir de l'instant k (grâce à $y(k)$). L'intervalle de temps entre l'instant courant k et l'instant de l'état estimé $k-2$ est la taille minimale de la fenêtre d'observation.

Estimation après la défaillance d'un capteur

Le paragraphe précédent montre que l'état $x(k-2)$ peut être estimé à l'instant k grâce à $y(k)$. Supposons maintenant qu'un défaut apparaisse sur le troisième capteur (qui le rend inutilisable) entre l'instant k et l'instant $k+1$.

Une étude de l'observabilité du système montrerait aisément que sans la mesure y_3 , l'état est inobservable. Donc, suite à ce défaut, l'état va devenir également inestimable.

Cependant, il est possible que le système reste estimable pendant une courte durée. En effet, si l'état x_{k-1} peut être estimé à l'instant $k+1$, cela signifie qu'après le défaut de capteur 3, le système est encore estimable, à l'intérieur de la fenêtre d'observation, à l'instant $k+1$.

Comme il a été vu dans le paragraphe 2.4.1 et grâce à l'équation 2.55, nous pouvons rassembler les états estimables à l'instant k dans le tableau 2.2.

$x_2(k)$	$x_1(k-1)$	$x_6(k-2)$
$x_3(k)$	$x_5(k-1)$	
$x_4(k)$		

TAB. 2.2 – Etats estimables à l'instant k

A l'instant $k + 1$ nous disposons des mesures suivantes :

$$\begin{cases} y_1(k + 1) = x_2(k + 1) = x_1(k) = -x_2(k - 1) + x_6(k - 1) \\ y_2(k + 1) = x_3(k + 1) = x_2(k) = x_1(k - 1) \end{cases} \quad (2.56)$$

A l'instant $k + 1$, le tableau 2.2 est complété grâce aux deux mesures dont nous disposons, $y_1(k + 1)$ et $y_2(k + 1)$, et qui ont été développées dans l'équation 2.56. Nous obtenons ainsi le tableau 2.3.

$x_2(k + 1)$	$x_2(k)$	$x_1(k - 1)$	$x_6(k - 2)$
$x_3(k + 1)$	$x_3(k)$	$x_5(k - 1)$	
	$x_4(k)$	$x_6(k - 1)$	
	$x_1(k)$		

TAB. 2.3 – Etats estimables à l'instant $k + 1$

Le tableau 2.3 montre qu'à l'instant $k + 1$, $x_2(k + 1)$, $x_3(k + 1)$, $x_4(k)$, $x_1(k)$, $x_5(k - 1)$ et $x_6(k - 1)$ peuvent être estimés. Ainsi, l'état peut être estimé à l'intérieur de la fenêtre d'observation choisie.

Nous pouvons maintenant regarder ce qui se passe à l'instant $k + 2$. Le tableau 2.3 peut être complété (cf. tableau 2.4) en utilisant $y_1(k + 2)$ et $y_2(k + 2)$ pour donner les états estimables à l'instant $k + 2$.

$x_2(k + 2)$	$x_2(k + 1)$	$x_2(k)$	$x_1(k - 1)$	$x_6(k - 2)$
$x_3(k + 2)$	$x_3(k + 1)$	$x_3(k)$	$x_5(k - 1)$	
	$x_1(k + 1)$	$x_4(k)$	$x_6(k - 1)$	
		$x_1(k)$		
		$x_6(k)$		

TAB. 2.4 – Etats estimables à l'instant $k + 2$

Le tableau 2.4 montre qu'à l'instant $k + 2$, l'état x_5 ne peut pas être observé après l'instant $k - 1$. Donc $x(k - 2)$ n'est pas estimable à l'intérieur de la fenêtre d'observation choisie c'est-à-dire entre l'instant $k + 2$ et l'instant k .

Finalement, ceci montre qu'après une défaillance de capteurs, l'état est encore estimable pendant 1 période de mesure. Cette durée (1 ici) est appelée RTBNE.

Cette durée avant la non-estimabilité du système peut être utilisée pour détecter et localiser le capteur défaillant et pour reconfigurer le système en utilisant les capteurs sains restants. Dans notre exemple, elle sera certainement insuffisante puisque le RTBNE=1. Pour d'autres systèmes, cette durée peut être plus longue et donc plus facilement exploitable.

Donc, si la durée de la détection et de la localisation d'un défaut ainsi que de la reconfiguration est inférieure au RTBNE, aucun comportement inattendu, dû à la non-estimabilité de l'état du système suite au défaut, ne pourra se produire puisque la fonctionnelle est toujours estimable dans la fenêtre d'observation durant ce temps.

Remarque : Même après la reconfiguration, l'état ne pourra plus être totalement estimé : le système sera en mode dégradé.

2.4.2 Méthode de détermination du RTBNE

Après avoir introduit le RTBNE à l'aide d'un exemple, nous allons, dans cette section, exposer un moyen de calculer ce RTBNE à l'aide d'un algorithme. Ensuite, nous montrerons les relations qui lient le RTBNE à la redondance et à la minimalité.

Reprenons la forme de système que nous avons choisie à la section 2.3.1 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y(t) = h(x(t)) \\ z(t) = e(x(t)) \end{cases} \quad (2.57)$$

où $x(t) \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y(t) \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie et $z(t) \in \mathcal{R}^q$ est un vecteur à estimer (avec $q \leq n$).

Il est dit ici que la fonctionnelle de l'état est observable avec l'ensemble des capteurs I_c disponibles.

Détermination de la fenêtre d'observation

Afin de calculer le RTBNE de l'ensemble de capteurs I_c , la première étape consiste à déterminer l'ensemble des vecteurs de pseudo-observabilité admissibles comme expliqué au paragraphe 2.3.1. Pour chacun des vecteurs de pseudo-observabilité admissibles $\mu = \begin{pmatrix} \mu_1 & \dots & \mu_p \end{pmatrix}$, une norme est associée :

$$\|\mu\| = \max_{i \in I_c} \mu_i \quad (2.58)$$

Définition 23 Soit $M(I_c)$ l'ensemble des vecteurs de pseudo-observabilité admissibles associés à I_c .

Une mesure peut être associée à $M(I_c)$

$$\mu^*(I_c) = \min_{\mu \in M(I_c)} \|\mu\| \quad (2.59)$$

Cette mesure représente la longueur minimale de la fenêtre d'observation avec laquelle z est observable.

Définition à propos du RTBNE

Après l'apparition d'un défaut, la fonctionnelle peut devenir inobservable et donc inestimable. Cependant, dans ce cas, il peut exister une certaine durée Δ après n'importe quel défaut de capteur durant laquelle la fonctionnelle est toujours estimable. Pour interpréter ce genre d'estimabilité, les indices de pseudo-observabilité sont utilisés.

Définition 24 Soit s la longueur d'une fenêtre d'observation telle que $s \geq \mu^*(I_c)$ et μ^i un vecteur associé à chaque capteur i tel que $\mu^i = \{\mu_i, \mu \in M(I_c)\}$. Ainsi, $\|\mu^i\|$ est défini par :

$$\|\mu^i\| = \min_{\mu \in M(I_c)} (\mu_i) \quad (2.60)$$

Pour chaque capteur i , deux cas peuvent se produire :

- Si $\|\mu^i\| = 0$, alors $\Delta_i = \infty$, c'est-à-dire qu'en cas de perte du capteur i , le temps restant avant la non-estimabilité du système est infini. En d'autres termes, la fonctionnelle de l'état est toujours observable et donc estimable avec $I_c \setminus \text{capteur}_i$.
- Si $\|\mu^i\| \neq 0$, alors $\Delta_i = s - \|\mu^i\|$, c'est à dire qu'après la perte du capteur i , la fonctionnelle de l'état est toujours estimable pendant Δ_i période de mesure à l'intérieur de la fenêtre d'observation choisie s .

Pour un système contenant p capteurs, un intervalle de temps Δ est défini par :

$$\Delta = \min_{i \in I_c} (\Delta_i) \quad (2.61)$$

Cette intervalle de temps correspond à la durée (en période de mesure) minimale durant laquelle la fonctionnelle est encore estimable suite à la perte d'un capteur quelconque du système.

Ainsi, si $\Delta = \infty$, cela signifie qu'après une perte de capteur, quelqu'il soit, la partie de l'état à estimer, z , est toujours estimable pendant une durée infinie. En d'autres termes, cela signifie que z est toujours estimable.

Relation entre le RTBNE et les notions de redondance et de minimalité

Lemme 1 Si $\max_{i \in I_c} (\Delta_i) \neq \infty$, l'ensemble de capteurs I_c est minimal et les degrés de redondance forts et faibles de I_c sont nuls.

Lemme 2 Si $\max_{i \in I_c} (\Delta_i) = \infty$, l'ensemble de capteurs I_c est redondant et le degré de redondance faible de I_c par rapport à E $d_f(I_c, E) \geq 1$ est :

- Si $\Delta = \infty$, alors le degré de redondance fort $d_F(I_c, E) \geq 1$
- Si $\Delta < \infty$, alors $d_F(I_c, E) = 0$

Intérêt du RTBNE

En partant de l'ensemble de capteurs initial I_c , en cas de défaillance du capteur i , le RTBNE du capteur i , Δ_i , correspond à la durée maximale (en période de mesure) pour détecter et localiser ce capteur défaillant et pour reconfigurer le système en évitant un comportement inattendu du système dû à la perte d'estimabilité de l'ensemble de la fonctionnelle d'état. En effet, pendant ce temps, la fonctionnelle est toujours estimable à l'intérieur de la fenêtre d'observation.

Pour le cas d'une défaillance de capteurs quelconque, le RTBNE de l'ensemble du système, Δ , correspond à la durée (en période de mesure) minimale pour reconfigurer le système en évitant un comportement inattendu dû à la perte d'estimabilité de la fonctionnelle à l'intérieur de la fenêtre d'observation.

Illustration à travers l'exemple de l'introduction

L'exemple de l'introduction de ce paragraphe (page 60) peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ z(k) = Ex(k) \end{cases} \quad (2.62)$$

$$\text{où } A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } E \text{ est la matrice}$$

identité de dimension 6.

La dimension de la partie de l'état à estimer, z , est $q = n = 6$ et le nombre de capteurs du système est $p = 3$. L'ensemble des trois capteurs disponibles est appelé I_c .

Il est aisé de constater que la fonctionnelle de l'état est observable et donc estimable par I_c .

Vecteurs d'indices de pseudo-observabilité admissibles

Pour calculer le RTBNE du système, il nous faut d'abord énumérer les vecteurs d'indices de pseudo-observabilité admissibles (la méthode pour les trouver a été expliquée au chapitre précédent). Ils sont listés dans le tableau 2.5.

Ces 5 vecteurs d'indices de pseudo-observabilité constituent l'ensemble $M(I_c)$.

capteur 1	capteur 2	capteur 3
μ_1	μ_2	μ_3
0	1	5
0	2	4
0	4	2
1	1	4
3	1	2

TAB. 2.5 – Vecteurs d'indices de pseudo-observabilité admissibles

Fenêtre d'observation

Le tableau 2.6 montre les valeurs $\|\mu\|$ pour chacun des vecteurs de pseudo-observabilité admissibles.

μ_1	μ_2	μ_3	$\ \mu\ = \max_{i \in I_c} \mu_i$
0	1	5	5
0	2	4	4
0	4	2	4
1	1	4	4
3	1	2	3

TAB. 2.6 – Détermination de la fenêtre d'observation

nous voyons qu'en utilisant le vecteur d'indices de pseudo-observabilité $(0, 1, 5)$, la partie de l'état à estimer, z , peut être observée et estimée à l'intérieur d'une fenêtre d'observation d'une taille de 5 minimum. En utilisant le second vecteur d'indices de pseudo-observabilité $(0, 2, 4)$, la taille minimale de la fenêtre d'observation est de 4. Ainsi, en utilisant tous les vecteurs d'indices de pseudo-observabilité, nous remarquons que la taille minimale de la fenêtre d'observation est de :

$$\mu^*(I_c) = \min_{\mu \in M(I_c)} \|\mu\| = 3 \quad (2.63)$$

Choisissons donc cette taille minimale pour la fenêtre d'observation : $s = 3$. Ce résultat confirme la valeur trouvée dans le paragraphe 2.4.1.

Détermination du RTBNE

Pour chaque capteur i , un vecteur μ^i est associé tel que $\mu^i = \{\mu(i), \mu \in M(I_c)\}$. Ainsi :

$$\mu^1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \mu^2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ et } \mu^3 = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 2 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

et par l'équation 2.60, nous avons $\|\mu^1\| = 0$, $\|\mu^2\| = 1$ et $\|\mu^3\| = 2$. Finalement,

- pour le capteur 1, $\|\mu^1\| = 0$, donc $\Delta_1 = \infty$, c'est à dire qu'en cas de perte du capteur 1, le temps restant avant la non-estimabilité du système est infini ou tout simplement que la fonctionnelle de l'état avec l'ensemble de capteurs $I_c \setminus c_1$ est toujours estimable.
- pour les capteurs 2 et 3, $\|\mu^2\| = 1$ et $\|\mu^3\| = 2$, donc $\Delta_2 = s - \|\mu^2\| = 2$ et $\Delta_3 = s - \|\mu^3\| = 1$, c'est à dire qu'après la perte du capteur 2 ou 3, z est toujours estimable à l'intérieur de la fenêtre d'observation choisie respectivement pendant 2 et 1 période de mesure.

En conclusion, pour l'ensemble de capteurs I_c , $\Delta = \min_{i \in I_c}(\Delta_i) = 1$ correspond à la durée minimale pendant laquelle la fonctionnelle de l'état est toujours estimable suite à la perte d'un capteur, quelqu'il soit.

Relation entre le RTBNE et la redondance et minimalité de I_c

Ici $\max_{i \in I_c}(\Delta_i) = \infty$ et $\Delta = 1 < \infty$ donc nous pouvons en déduire, grâce au théorème 2, que l'ensemble de capteurs I_c est redondant mais que le degré de redondance fort de I_c par rapport à $E : d_F(I_c, E) = 0$. En effet, I_c est redondant parce que la partie de l'état à estimer est toujours observable sans le capteur 1, et $d_F(I_c, E) = 0$ puisque z n'est plus observable suite à la perte du capteur 2 ou du capteur 3.

Cette exemple montre l'utilité du RTBNE. Ici, $RTBNE = 1$, donc en cas de défaut d'un capteur, quelqu'il soit, si la reconfiguration prend moins d'1 période de mesure, il n'y aura pas de comportement inattendu sur le système dû à la perte de l'estimabilité de la fonctionnelle de l'état.

2.4.3 Conclusion sur le RTBNE

Dans ce paragraphe, des définitions, lemmes et propriétés sur une nouvelle notion, le RTBNE, ont été présentés.

Dans le cadre de la tolérance aux fautes de capteurs, le RTBNE permet de connaître, suite à une défaillance de capteur, le temps dont nous disposons pour détecter et localiser le capteur défaillant et pour reconfigurer le système avec les capteurs sains restants. Si le $RTBNE < \infty$, il faudra changer les objectifs d'estimation puisqu'après un certain temps, nous ne pourrons plus

estimer l'ensemble de la fonctionnelle d'état. Le système fonctionnera alors en mode dégradé. L'utilisation du RTBNE est surtout intéressante pour des systèmes contenant de nombreux états puisque dans ces systèmes, le RTBNE a plus de chance d'être élevé et donc suffisant pour couvrir la durée totale de la reconfiguration du système et ainsi pour éviter les comportements catastrophiques dus à la défaillance.

Dans des travaux futurs, il serait intéressant de lier le RTBNE au calcul des résidus et donc de savoir, après un défaut de capteur, pendant combien de temps nous pouvons encore calculer chacun des résidus. Pour le calcul des résidus, nous pourrions peut-être utiliser un observateur à mémoire finie basée sur les indices de pseudo-observabilité [Aitouche *et al.*, 2004].

Une notion semblable au RTBNE pourrait également être développée au niveau des actionneurs. Ainsi, juste après la défaillance d'un actionneur et malgré la perte des propriétés d'accessibilité, l'énergie fournie par l'actionneur avant sa défaillance pourrait être utilisée temporairement durant le temps de reconfiguration du système de commande.

Les notions d'accessibilité en non linéaire sont complexes et cet indice ne sera pas facile à déterminer.

2.5 Conclusion

Dans l'optique de mettre en place une commande tolérante aux fautes sur un système, il est utile d'analyser ce dernier. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, cette phase d'analyse consiste à connaître les propriétés d'observabilité et d'accessibilité du système en fonctionnement normal ainsi que l'évolution de celle-ci en cas de panne de composants. Dans les paragraphes 2.2 et 2.3, cette analyse a donc été exposée pour le cas de systèmes non linéaires.

Toujours dans le cas général des systèmes non linéaires, un nouveau concept, le RTBNE, a été introduit. Il indique le temps dont nous disposons suite à la perte d'un capteur, pour détecter et localiser le défaut et pour reconfigurer le système avec les capteurs sains restants en étant sûr que la fonctionnelle reste estimable. Des liens entre ces notions de redondance et de minimalité et le concept de RTBNE ont été mis en évidence permettant d'intégrer parfaitement cet indice à l'analyse des redondances du système.

Cette présentation sur l'analyse des systèmes sera appliquée au véhicule dans le troisième chapitre afin de connaître les capacités de celui-ci à tolérer les défauts. Elle permettra de savoir s'il existe suffisamment de redondances sur le système pour mettre en place un module de commande tolérante aux fautes et notamment aux fautes d'actionneurs.

Chapitre 3

Mise en place d'une commande tolérante aux fautes sur un véhicule électrique

3.1 Introduction

Le troisième chapitre est une application des méthodes d'analyse et de reconfiguration étudiées dans les précédents chapitres sur un véhicule électrique expérimental.

Ce véhicule tout électrique, conçu par Robosoft, une entité de l'INRIA, est une variante du véhicule Cycab [G.Baille *et al.*, 1999] vendu dans le monde entier.

Jusqu'à maintenant aucun module complet de commande tolérante aux fautes n'a été conçu pour ce véhicule. Ainsi, l'application proposée ici, est la première version complète de commande tolérante aux fautes d'actionneurs pour RobuCar.

Comparé à un véhicule traditionnel constitué d'un moteur de traction et d'un moteur de direction, RobuCar a la particularité de fonctionner de manière très décentralisée grâce à un grand nombre de moteurs (4 moteurs de traction, 4 moteurs de freinage et 2 moteurs de direction). La redondance des actionneurs permet d'envisager qu'en cas de défaillance de certains d'entre eux, il soit capable dans certains cas de continuer à fonctionner en utilisant les composants sains restants et de garantir ainsi la sécurité des passagers. Il est donc bien adapté à la mise en place d'une commande tolérante aux fautes.

Pour mener à bien cette mise en place d'une commande tolérante aux fautes, ce chapitre sera

décomposé de la manière suivante :

Tout d'abord, la dynamique de RobuCar sera modélisée par un système non linéaire affine en la commande. Ensuite, une analyse du modèle confirmera la capacité du système à tolérer les défauts des systèmes d'instrumentation. Puis, des commandes pour le système en fonctionnement normal et en défaut (d'actionneur(s)) sont calculés en gardant le système sous forme non linéaire. Enfin, la stratégie de reconfiguration choisie est présentée.

3.2 Modélisation de RobuCar

La mise en place d'un module de commande tolérante aux fautes est appliquée à un véhicule appelé RobuCar. Il convient donc de présenter ce véhicule et de le modéliser.

En premier lieu, nous présenterons donc succinctement le véhicule. Ensuite, la modélisation dynamique du véhicule sur trois degrés de liberté (dynamiques longitudinale et transversale et lacet) est présentée. Enfin, les équations du système sont mises sous une forme non linéaire affine en la commande.

3.2.1 Description de RoBucar

Une description plus complète est donnée dans l'annexe A. Nous nous contenterons ici de reprendre les points essentiels à la modélisation du comportement dynamique du véhicule.

Le Robucar est un prototype de véhicule électrique servant de plate-forme expérimentale pour des études d'automatique menées au laboratoire LAGIS de Lille et dans le cadre du pôle en Sciences et Technologies pour la Sécurité des Transports (ST2).

La représentation schématique de la Fig. 3.1 permet de décrire les différents éléments du véhicule.

Ce véhicule est équipé de huit batteries qui lui confèrent une autonomie de deux heures à vitesse maximale (20 km/h).

Le fonctionnement en mode autonome du RobuCar nécessite l'implantation d'un certain nombre de capteurs destinés à l'informer sur son environnement ou sur sa position et sa vitesse :

- Le télémètre à balayage laser donne la mesure de la distance et de la direction d'un éventuel obstacle.
- L'encodeur incrémental permet d'effectuer des mesures odométriques, c'est-à-dire les mesures de vitesse des roues [G.Baille *et al.*, 1999].

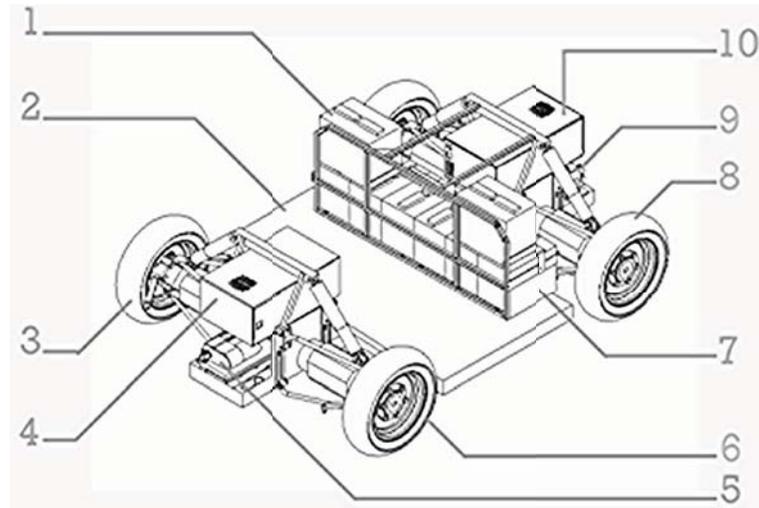


FIG. 3.1 – Vue éclatée de Robucar

(1 : Batteries de 12 volts 60Ah, 2 : La châssis, 3 : Roue avant droite, 4 : Panneau de contrôle avant, 5 : Vérin électrique de direction avant, 6 : Roue avant gauche, 7 : Batteries, 8 : Roue arrière gauche, 9 : Vérin électrique de direction arrière, 10 : panneau de contrôle arrière)

- L’encodeur absolu permet de contrôler le braquage des roues.
- le GPS donne la position absolue du véhicule en x et en y .
- la centrale inertielle est en cours d’achat par le LAGIS. Ce capteur délivre les valeurs de la vitesse et de l’accélération de lacet, de roulis et de tangage (ces termes sont définis au paragraphe 3.2.2).

Nous avons décrit les capteurs externes au véhicule. Il existe également d’autres capteurs en interne.

Le Robucar possède également dix moteurs, commandés et contrôlés par une architecture matérielle distribuée :

- 4 moteurs de traction (un par roue) contrôlables séparément.
- 4 moteurs de frein à commande unique (un par roue). Ce sont des freins à tambour mécanique commandables électroniquement.
- 2 vérins motorisés de direction (un par essieu).

A ces trois modules, nous pouvons ajouter le joystick de commande utilisé pour commander RobuCar manuellement.

Il sert à manoeuvrer le véhicule par le contrôle de deux potentiomètres dont la lecture analogique par le noeud de direction simule l’accélérateur et le volant d’un véhicule. Dans le travail présenté sur ce document, le joystick n’est pas utilisé.

Grâce aux possibilités de braquage sur l’essieu avant ou arrière, RobuCar peut fonctionner selon

trois modes présentés sur la figure 3.2 :

- Le mode single : Il correspond au fonctionnement d'une voiture ordinaire. Le braquage des roues se fait uniquement sur l'essieu avant et les roues tournent toutes selon le même sens de rotation.
- Le mode dual : C'est le mode single avec en plus la possibilité de braquer les roues arrières pour accentuer le rayon de courbure de la trajectoire du véhicule.
- Le mode park : Pour ce mode, le braquage sur l'essieu avant et arrière se fait dans le même sens. Ce mode est particulièrement utile pour garer une voiture par exemple.

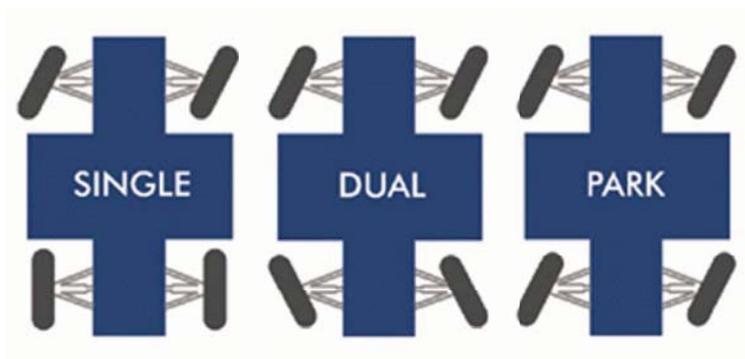


FIG. 3.2 – Les différents modes de fonctionnement de RobuCar

La modélisation présentée au paragraphe 3.2.3 est effectuée à partir du mode dual qui représente le cas le plus général.

La simulation au chapitre 4 est, quant à elle, effectuée par souci de simplification sur le modèle single (cas particulier du mode dual où la direction des roues arrières est bloquée à 0°).

Conclusion : Après cette description des capteurs et actionneurs qui équipent RobuCar ainsi que des différents modes de fonctionnement, nous allons définir quelques éléments intervenant dans la dynamique du véhicule avant de proposer une modélisation de celui-ci.

3.2.2 Sur la modélisation dynamique de véhicule

Dans cette partie, nous proposons une modélisation d'un véhicule à partir des équations physiques du système. En préambule de la modélisation, nous allons donner quelques définitions se rapportant à la dynamique du véhicule et décrire l'interaction roue-sol.

Définitions

Les différentes définitions présentées ci-après sont issues de [Deutsch, 1970] [Alloum, 1994] [Boucher, 1997].

Les six dynamiques d'un véhicule représentées sur la fig 3.3 peuvent être définies comme suit :

- Le lacet est le mouvement de rotation du véhicule autour de l'axe O,z .
- Le roulis est le mouvement de rotation du véhicule autour de l'axe O,x .
- Le tangage ou Galop est le mouvement de rotation du véhicule autour de l'axe O,y .
- L'avance est le mouvement de translation longitudinale de la masse suspendue (suivant O,x).
- Le ballant est le mouvement de translation transversale de la masse suspendue (suivant O,y).
- Le pompage ou rebondissement est le mouvement de translation verticale de la masse suspendue (suivant O,z).

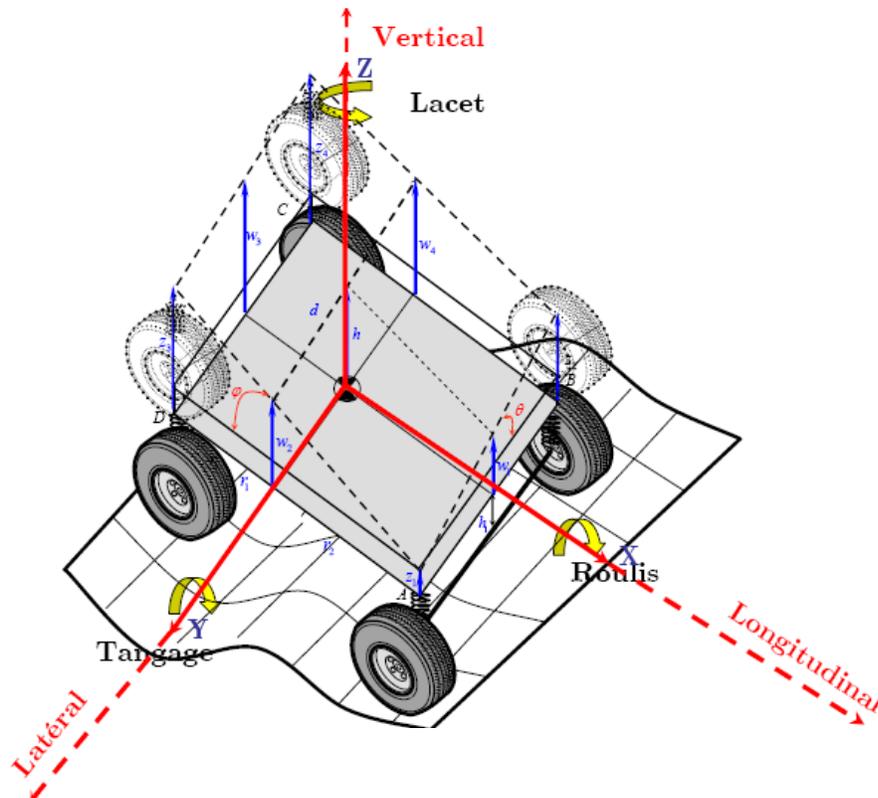


FIG. 3.3 – Les six dynamiques

Intéraction roue-sol

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

Les pneumatiques servent essentiellement à trois fonctions de base [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.

Dans ce paragraphe, en se référant à [Michelin, 2001], nous allons détailler les efforts latéraux et longitudinaux. Pour cela, nous allons tout d'abord définir les notions de glissement, d'angle de braquage et d'angle de dérive du véhicule. Ensuite, une présentation des différentes manières de modéliser les efforts précédemment cités sera faite. Enfin, nous développerons plus précisément le modèle choisi dans cette étude.

Le glissement Considérons un véhicule qui roule en ligne droite à une certaine vitesse. Pour freiner, le conducteur impose, par l'intermédiaire du circuit de freinage, un couple de freinage aux quatre roues du véhicule.

A ce moment-là, la vitesse angulaire des roues diminue et la vitesse de roulement du pneu devient inférieure à la vitesse de défilement du sol : pour compenser cette différence, les pneus commencent à glisser selon un taux de glissement noté G .

On définit ainsi le taux de glissement comme le rapport entre la vitesse de glissement pneu-sol et la vitesse du véhicule.

$$G = \frac{\omega \cdot R - V}{V}$$

où ω est la vitesse angulaire des roues, R est le rayon de roulement et V est la vitesse du véhicule.

Ce glissement peut aussi se produire en phase d'accélération. Il se matérialise alors par un patinage de la roue sur le sol.

G présente quelques valeurs particulières :

- $G < 0$: glissement freineur.
- $G > 0$: glissement moteur.
- $G = 0$: roue libre.
- $G = -1$: roue bloquée.
- $G = +\infty$: patinage sur place.

Les deux cas extrêmes "patinage sur place" et "roue bloquée", que nous pouvons rencontrer notamment sur des sols enneigés ou verglacés peuvent permettre de mieux comprendre cette notion de glissement :

- lorsque l'on essaye de démarrer son véhicule en côte sur sol verglacé ou enneigé, bien souvent, les roues patinent : elles tournent sur place, mais le véhicule n'avance pas. La vitesse de rotation des roues ω peut être grande, alors que la vitesse du véhicule (V) reste nulle : le glissement est infini.
- inversement, lorsque l'on freine trop brutalement sur un sol verglacé, les roues du véhicule se

bloquent (elles ne tournent plus), mais le véhicule continue d'avancer en dérapant. La vitesse de rotation des roues (ω) est nulle alors que le véhicule continue d'avancer sur sa lancée : le glissement représente 100 % de la distance parcourue et $G = -1$.

Par les mécanismes d'adhésion et d'indentation [Michelin, 2001], le glissement induit une force longitudinale moteur (si le glissement est positif) ou de frottement (si le glissement est négatif). Cette force longitudinale sera détaillée dans le paragraphe 3.2.2, mais avant cela, intéressons-nous à la dérive du véhicule.

Angle de braquage et dérive L'angle de braquage est l'angle entre l'axe de la roue et l'axe de direction longitudinale du véhicule.

La dérive est l'angle formé par le plan de la roue et la tangente à la trajectoire comme montré sur la fig. 3.4.

Pour négocier un virage, le conducteur d'un véhicule agit sur son volant. Mais c'est par l'aire de contact, ultime organe de transmission entre le volant et le sol, que passent tous les efforts.

Tout véhicule lancé dans un virage est soumis à une force centrifuge qui tend à le chasser hors de sa courbe. Pour maintenir le véhicule sur sa trajectoire, l'interface pneu/sol doit fournir une force centripète, de valeur égale à la force centrifuge.

En virage, le conducteur impose, par l'intermédiaire de la direction, un angle de braquage aux deux roues avant du véhicule. En fait, il dirige les roues non pas sur la trajectoire, mais vers l'intérieur du virage, introduisant un décalage entre le plan de rotation des roues et la trajectoire du centre de la roue. Ce décalage, appelé dérive, induit un frottement entre les pneumatiques et la chaussée, qui génère la force transversale centripète mentionnée précédemment.

A très faible vitesse, la force centrifuge est très faible ($\frac{MV^2}{R} = 0$) et le braquage suffit à imprimer la trajectoire. Plus la vitesse augmente, plus la force centrifuge augmente et plus il faut de dérive pour maintenir la trajectoire. Ordinairement, un conducteur mobilise des dérives ne dépassant pas 2° sur route et 5° en ville.

La force centripète générée grâce à la dérive est détaillée dans le paragraphe 3.2.2.

Les forces longitudinales et transversales Le glissement et la dérive, vus dans les paragraphes précédents, créent respectivement des forces longitudinales et transversales sur le véhicule au niveau des contacts pneu-chaussée.

Le grand nombre de forces et de moments développés par le pneumatique montre la complexité du système.

Dans une première approche, on peut citer les modèles qui font l'interpolation de relevés expérimentaux. Ce sont des méthodes simples mais qui ne sont pas souvent utilisées car toutes les

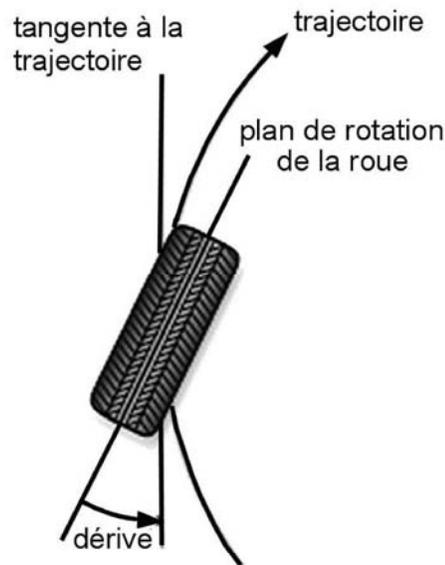


FIG. 3.4 – La dérive

grandeurs caractéristiques du pneumatique sont rarement mesurées.

Un modèle basé sur une représentation mathématique est souvent privilégié, les divers coefficients vont alors avoir une signification physique (modèle basé sur la connaissance). Ce modèle devra décrire le plus fidèlement possible le comportement du pneumatique.

On peut dire que la modélisation du pneumatique est un point important de la simulation du comportement d'un véhicule automobile.

De nombreux auteurs tels que [Dugoff *et al.*, 1970] [Pacejka et Sharp, 1991] [Canudas et Triotras, 1999] [Merzouki, 2002] ont entrepris de modéliser le comportement du pneumatique. Chacun d'eux considère une approche différente de la modélisation, mais la base repose toujours sur des mesures effectuées sur le pneumatique.

On observe une complexité des développements qui réside dans le caractère de couplage entre les différentes composantes du torseur de forces. Pour des raisons de simplicité, des modèles analytiques de moindre complexité ont été développés en découplant les dynamiques longitudinales et transversales. Les modèles combinés du comportement du pneumatique ont été élaborés en se basant sur une extension des modèles découplés. Les modèles analytiques présentés dans [Dugoff *et al.*, 1970], sont basés sur une description physique du phénomène de déformations élémentaires du pneumatique dans l'aire de contact. Par ailleurs, des travaux basés essentiellement

sur l'expérimentation ont donné lieu à des modèles empiriques [Pacejka, 1996]. Les modèles de forces présentés dans ces travaux sont statiques. En effet, la dynamique de déformation du pneumatique n'est pas prise en compte dans ces modèles. Toutefois, plusieurs études se sont intéressées au caractère dynamique et transitoire des forces pneumatiques : [Pacejka et Besselink, 1997] [Maurice et Pacejka, 1997] [Canudas et Triotras, 1999]. Dans la plupart des travaux (par exemple ceux de H.B. Pacejka et J.P. Maurice), le principe de la longueur de relaxation est utilisé pour décrire le transitoire de ces forces. Dans [Deur, 2001], les auteurs présentent un modèle dynamique de la force de traction utilisant le modèle de frottement proposé par [Canudas *et al.*, 1995].

Un autre modèle basé sur une représentation mathématique est utilisé dans [Michelin, 2001]. Cette modélisation a l'avantage d'être assez simple tout en considérant bien à la fois le mode d'adhérence et le mode de glissement du pneumatique. Nous utiliserons pour la modélisation de RobuCar cette technique de modélisation. Elle sera détaillée dans le paragraphe 3.2.3.

Conclusion

Les différentes définitions sur la dynamique du véhicule, ainsi qu'une méthode de détermination des forces longitudinales et transversales présentées ici, seront utilisées pour la modélisation de la dynamique de RobuCar.

3.2.3 Modélisation dynamique de RobuCar

Connaissant les équations qui régissent la dynamique du véhicule, la mise en place d'une commande tolérante aux fautes à base de modèles semble bien appropriée. Il nous faut, disposer d'un modèle en fonctionnement normal de RobuCar. Cette modélisation fait l'objet de ce paragraphe. Nous donnerons les hypothèses de modélisation, les notations utilisées avant de finir par la modélisation de la dynamique de RobuCar.

Hypothèses de modélisation

Pour la modélisation de RobuCar, nous faisons quelques hypothèses :

- L'environnement est supposé non perturbant (absence d'obstacles).
- La vitesse du véhicule est inférieure à 20 km/h (c'est une contrainte de RobuCar).
- Les angles de braquage des roues avant et arrière du véhicule sont faibles (l'approximation des faibles angles est possible).
- Le véhicule est étudié sur trois degrés de liberté : la dynamique longitudinale, transversale et le lacet. Le pompage, le roulis et le tangage (défini au §3.2.2) sont négligés ici puisqu'à des faibles vitesses et angles de braquage, leur influence est faible par rapport au trois dynamiques considérées.

Notations utilisées

Une schématisation du véhicule (figure 3.5) nous donne certaines des notations utilisées.

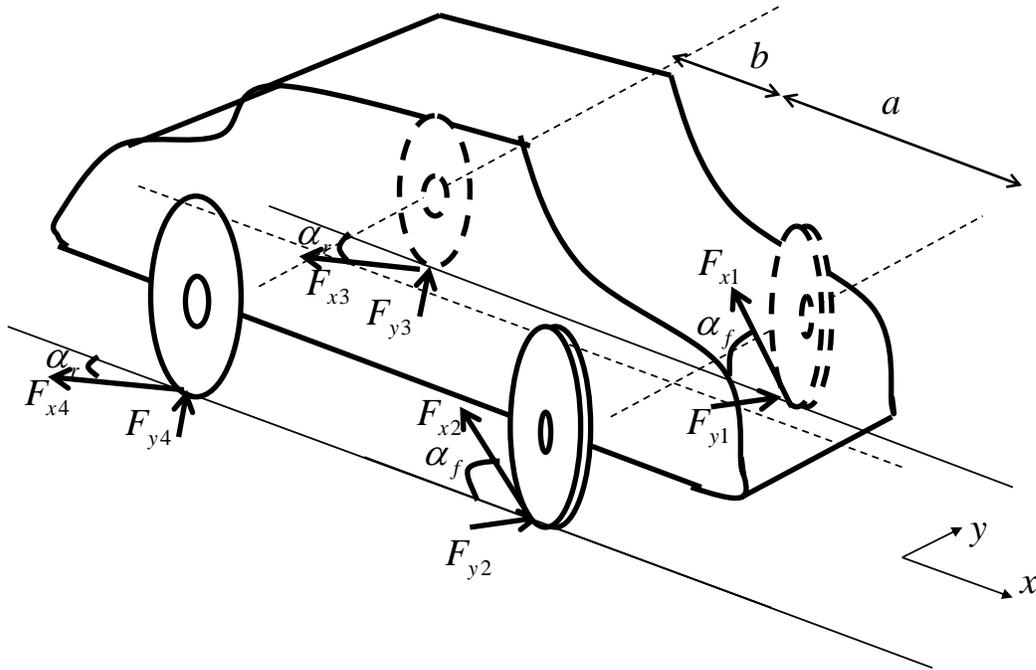


FIG. 3.5 – Décomposition des Forces longitudinales et transversales

J_i, f_i , sont respectivement les $i^{eme} \in [1, 2]$ moment d'inertie et coefficient de frottement visqueux du système électromécanique (roue i + actionneur i) qui sont identifiés expérimentalement.

$\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i$ sont respectivement les accélération et vitesse de rotation 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 transversaux 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 .

Dans la suite et par souci de simplification, nous considérerons que le moteur de traction et le moteur de freinage de la roue i ne forment qu'un moteur que nous appellerons moteur de traction de la roue i . Ce moteur pourra donc développer des couples moteurs comme des couples de freinage.

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

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

R est le rayon des 4 roues supposé constant dû à la rigidité de la roue.

D est la demie-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 distance séparant les deux roues avant (ou les deux roues 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.

Finalement, α_f et α_r sont les angles de braquage avant et arrière du véhicule. Ils sont mesurables.

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

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

Modélisation de RobuCar

Un certain nombre d'équations régissent le fonctionnement de RobuCar et nous permettent de le modéliser. Nous pouvons les regrouper sous cinq catégories : le système moteur de traction-roue-chaussée, le principe fondamental de la dynamique, le système moteur de direction-roue-chaussée, l'évolution de la vitesse de lacet et enfin l'expression des forces d'impact longitudinales et transversales issues des contacts roue/chaussée.

Les paragraphes qui suivent présentent ces équations.

Modélisation du système moteur de traction-roue-chaussée Considérons tout d'abord la roue 1. L'écriture du théorème du moment cinétique au centre de la roue 1 est donnée par $J_1 \ddot{\theta}_1 = \sum M(\vec{F}_{ext})$ où $\sum M(\vec{F}_{ext})$ correspond à la somme des moments exercés par toutes les forces extérieures au système :

- le moment de la force de frottement visqueux de rotation entre la roue 1 et le moteur de traction : $f_1 \dot{\theta}_1$
- les moments des forces d'impact longitudinale et transversale issues du contact roue 1 / chaussée projeté sur l'axe longitudinale de la roue 1 : $RF_{x_1} \cos(\alpha_f) + RF_{y_1} \sin(\alpha_f)$
- le couple moteur généré par le moteur de traction de la roue 1 : U_1

Ici le frottement sec de rotation entre la roue 1 et le moteur de traction est négligée. En résumé, nous avons pour la roue 1, l'équation suivante :

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + f_1 \dot{\theta}_1 = U_1 + RF_{x_1} \cos \alpha_f + RF_{y_1} \sin \alpha_f$$

. De la même manière, nous pouvons appliquer le théorème du moment cinétique sur les autres roues. Nous obtenons, ainsi, les 4 équations suivantes :

$$\begin{cases} J_1\ddot{\theta}_1 + f_1\dot{\theta}_1 = U_1 + RF_{x_1} \cos \alpha_f + RF_{y_1} \sin \alpha_f \\ J_2\ddot{\theta}_2 + f_2\dot{\theta}_2 = U_2 + RF_{x_2} \cos \alpha_f + RF_{y_2} \sin \alpha_f \\ J_3\ddot{\theta}_3 + f_3\dot{\theta}_3 = U_3 + RF_{x_3} \cos \alpha_r + RF_{y_3} \sin \alpha_r \\ J_4\ddot{\theta}_4 + f_4\dot{\theta}_4 = U_4 + RF_{x_4} \cos \alpha_r + RF_{y_4} \sin \alpha_r \end{cases} \quad (3.1)$$

Principe fondamental de la dynamique projeté sur l'axe longitudinal et transversal

L'application du principe fondamental de la dynamique sur le véhicule est donné par :

$$M\vec{a} = \sum F_{ext}^{\vec{}}$$

Ici, les forces extérieures appliquées sur le véhicule sont issues des contacts pneu-chaussée pour chacune des roues soit $\vec{F}_{x_1} + \vec{F}_{x_2} + \vec{F}_{x_3} + \vec{F}_{x_4}$ pour les forces de contact longitudinales et $\vec{F}_{y_1} + \vec{F}_{y_2} + \vec{F}_{y_3} + \vec{F}_{y_4}$ pour les forces de contact transversales.

La projection du principe fondamental de la dynamique sur

– l'axe longitudinal, nous donne :

$$Ma_x = -(F_{x_1} + F_{x_2}) \cos \alpha_f - (F_{x_3} + F_{x_4}) \cos \alpha_r - (F_{y_1} + F_{y_2}) \sin \alpha_f - (F_{y_3} + F_{y_4}) \sin \alpha_r \quad (3.2)$$

– l'axe transversal, nous donne

$$Ma_y = -(F_{x_1} + F_{x_2}) \sin \alpha_f - (F_{x_3} + F_{x_4}) \sin \alpha_r + (F_{y_1} + F_{y_2}) \cos \alpha_f + (F_{y_3} + F_{y_4}) \cos \alpha_r \quad (3.3)$$

Modélisation du système moteur de direction-roue-chaussée Soit le système constitué de l'essieu avant du véhicule, de la chaussée et du moteur de direction.

L'écriture du théorème du moment cinétique pour les roues avant est donnée par $J_f\ddot{\theta}_f = \sum M(F_{ext}^{\vec{}})$ où $\sum M(F_{ext}^{\vec{}})$ correspond à la somme des moments exercés par toutes les forces extérieures au système :

– le moment des forces de frottement visqueux et sec de braquage entre la roue avant et le moteur de direction : $f_f\dot{\alpha}_f$ et $k_f\alpha_f$

– les moments des forces d'impact longitudinale et transversale issues du contact roue avant / chaussée projetées sur l'axe longitudinale des roues avant : $(F_{x_1} + F_{x_2}) \cos \alpha_f D - (F_{y_1} + F_{y_2}) \sin \alpha_f D$

– le couple moteur généré par le moteur de direction des roues avant : U_f

Ainsi pour les roues avants, le théorème du moment cinétique s'écrit :

$$J_f\ddot{\alpha}_f + f_f\dot{\alpha}_f + k_f\alpha_f = U_f - (F_{x_1} + F_{x_2}) \cos \alpha_f D - (F_{y_1} + F_{y_2}) \sin \alpha_f D \quad (3.4)$$

De même, pour les roues arrières, le théorème du moment cinétique s'écrit :

$$J_r\ddot{\alpha}_r + f_r\dot{\alpha}_r + k_r\alpha_r = U_r - (F_{x_3} + F_{x_4}) \cos \alpha_r D - (F_{y_3} + F_{y_4}) \sin \alpha_r D \quad (3.5)$$

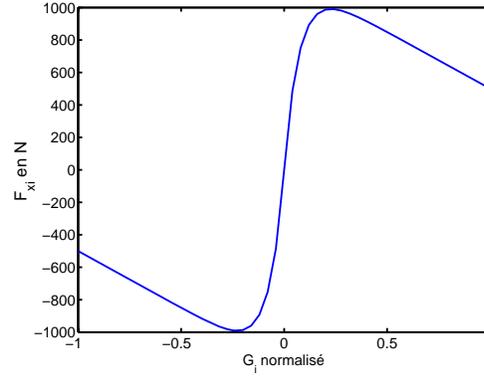


FIG. 3.6 – La force de contact roue i - chaussée F_{x_i} en fonction du glissement sur cette roue i

Equation d'évolution de la vitesse de lacet En considérant l'ensemble du véhicule, l'écriture du théorème du moment cinétique au centre d'inertie du véhicule donne 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 système :

- les moments des forces d'impact longitudinales issues des contacts roue / chaussée projetées sur l'axe transversale puis sur l'axe longitudinale du véhicule : $-a(F_{x_1} + F_{x_2}) \sin \alpha_f + b(F_{x_3} + F_{x_4}) \sin \alpha_r + \frac{d}{2}(F_{x_1} - F_{x_2}) \cos \alpha_f + \frac{d}{2}(F_{x_3} - F_{x_4}) \cos \alpha_r$
- les moments des forces d'impact transversales issues des contacts roue / chaussée projetées sur l'axe transversale du véhicule : $a(F_{y_1} + F_{y_2}) \cos \alpha_f - b(F_{y_3} + F_{y_4}) \cos \alpha_r$ (les moments des forces d'impact transversales issues des contacts roue / chaussée des roues de gauche et de droite projetés sur l'axe longitudinale sont opposés et se compensent donc)

Finalement, nous obtenons l'équation suivante :

$$I_z \dot{\Gamma} = -a(F_{x_1} + F_{x_2}) \sin \alpha_f + a(F_{y_1} + F_{y_2}) \cos \alpha_f + b(F_{x_3} + F_{x_4}) \sin \alpha_r - b(F_{y_3} + F_{y_4}) \cos \alpha_r + \frac{d}{2}(F_{x_1} - F_{x_2}) \cos \alpha_f + \frac{d}{2}(F_{x_3} - F_{x_4}) \cos \alpha_r \quad (3.6)$$

Expression des forces d'impact longitudinales et transversales issues des contacts roue/chaussée Suite à la définition du glissement au paragraphe 3.2.2 et de la dérive au paragraphe 3.2.2, nous avons cité différentes méthodes de modélisation des forces d'impact longitudinale et transversale au paragraphe 3.2.2. La méthode que nous allons utiliser pour exprimer ces forces longitudinales et transversales est basée sur une représentation mathématique.

Selon [Michelin, 2001], la forme canonique de la force longitudinale au niveau du contact roue-chaussée en fonction du glissement est donnée sur la figure 3.6.

Cette courbe peut être approximée par l'équation suivante :

$$F_{x_i} = \underbrace{\alpha_0 \text{sign}(G_i)}_{f. \text{ sec}} - \underbrace{\alpha_1 e^{-\beta(|G_i|)} \text{sign}(G_i)}_{\text{adhérence}} - \underbrace{\alpha_2(G_i)}_{\text{glissement}} \quad (3.7)$$

où $\alpha_0 > 0$, $\alpha_1 > 0$ et $\alpha_2 > 0$ et où G_i est le glissement sur la chaussée pour la roue i :

$$G_i = \frac{R\dot{\theta}_i - v_x}{v_x} \quad (3.8)$$

Quant à F_{y_i} , nous avons une relation de la même forme que F_{x_i} mais cette fois fonction de l'angle de dérive avant α'_f (si $i=1$ ou 2) ou de l'angle de dérive arrière α'_r (si $i=3$ ou 4).

Ainsi les forces transversales avants sont de la forme suivante :

$$F_{y_1} = F_{y_2} = \alpha'_0 \text{sign}(\alpha'_f) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|\alpha'_f|)} \text{sign}(\alpha'_f) - \alpha'_2(\alpha'_f) \quad (3.9)$$

où l'angle de dérive avant est approximé par :

$$\tan(\alpha'_f - \alpha_f) = -\frac{v_y + \Gamma a}{v_x}$$

ou encore, grâce à l'approximation des faibles angles :

$$\alpha'_f \simeq \alpha_f - \frac{v_y + \Gamma a}{v_x}$$

De même les forces transversales arrières sont de la forme :

$$F_{y_3} = F_{y_4} = \alpha'_0 \text{sign}(\alpha'_r) + \alpha'_1 e^{-\beta(|\alpha'_r|)} \text{sign}(\alpha'_r) - \alpha'_2(\alpha'_r)$$

où l'angle de dérive arrière vaut approximativement :

$$\alpha'_r \simeq \alpha_r - \frac{v_y - \Gamma b}{v_x}$$

Mise sous forme d'état

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

$$u = \left(u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_f \quad u_r \right)^T$$

Nous rappelons que les quatres premières entrées de commande correspondent aux moteurs de traction sur chacune des roues et que u_f et u_r correspondent à l'entrée de commande sur les moteurs de direction.

et y le vecteur composé des variables mesurées sur le système

$$y = \left(\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4 \quad d_x \quad d_y \quad \alpha_f \quad \alpha_r \quad \Gamma \right)^T$$

Les vitesses de rotation des roues, $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$ et $\dot{\theta}_4$, sont mesurées par des codeurs incrémentaux, les déplacements longitudinal et transversal d_x et d_y par un GPS, les angles de braquages avant et arrière α_f et α_r par un codeur absolu et enfin la vitesse de lacet Γ par la centrale inertielle.

Enfin, x est le vecteur d'états du système :

$$x = \left(\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4 \quad v_x \quad d_x \quad v_y \quad d_y \quad \dot{\alpha}_f \quad \alpha_f \quad \dot{\alpha}_r \quad \alpha_r \quad \Gamma \right)^T$$

Pour la suite, la notation suivante sera utilisée :

$$\begin{cases} u = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 \end{pmatrix}^T \\ y = \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 \end{pmatrix}^T \\ x = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{12} & x_{13} \end{pmatrix}^T \end{cases} \quad (3.10)$$

En utilisant cette notation, et en supposant les angles de braquage faible ($\sin \alpha_f = \alpha_f$, $\sin \alpha_r = \alpha_r$, $\cos \alpha_f = 1$ et $\cos \alpha_r = 1$), les équations 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 se synthétisent sous une forme non linéaire affine en la commande :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + B.u \\ y = C.x \end{cases} \quad (3.11)$$

où

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{f_1}{J_1}x_1 + \frac{RF_{x_1}}{J_1} + \frac{RF_{y_1}x_{10}}{J_1} \\ -\frac{f_2}{J_2}x_2 + \frac{RF_{x_2}}{J_2} + \frac{RF_{y_2}x_{10}}{J_2} \\ -\frac{f_3}{J_3}x_3 + \frac{RF_{x_3}}{J_3} + \frac{RF_{y_3}x_{12}}{J_3} \\ -\frac{f_4}{J_4}x_4 + \frac{RF_{x_4}}{J_4} + \frac{RF_{y_4}x_{12}}{J_4} \\ -\frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{M} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{M} - \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{M}x_{10} - \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{M}x_{12} \\ x_5 \\ -\frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{M}x_{10} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{M}x_{12} + \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{M} + \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{M} \\ x_7 \\ -\frac{f_f}{J_f}x_9 - \frac{k_f}{J_f}x_{10} - \frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{J_f}D - \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{J_f}x_{10}D \\ x_9 \\ -\frac{f_r}{J_r}x_{11} - \frac{k_r}{J_r}x_{12} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{J_r}D - \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{J_r}x_{12}D \\ x_{11} \\ \frac{a}{I_z}(-F_{x_1} - F_{x_2} + F_{y_1} + F_{y_2})x_{10} + \frac{b}{I_z}(F_{x_3} + F_{x_4} - F_{y_3} - F_{y_4})x_{12} + \frac{d}{2I_z}(F_{x_1} - F_{x_2} + F_{x_3} - F_{x_4}) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

Conclusion sur la modélisation de RobuCar

Nous disposons désormais d'un modèle non linéaire affine en la commande de 13 états, 9 sorties de mesures et 6 entrées de commande pour RobuCar.

Les nombreux paramètres de ce modèle ont été identifiés lors d'essais sur le véhicule par l'entreprise SERA-CD (situé à Courtaboeuf) spécialiste de la conception et de la modélisation du véhicule. Ainsi, lors des simulations au chapitre 4, les paramètres prendront les valeurs suivantes : pour $i = 1..4$, $f_i = 2Nms$ et $J_i = 1kgm^2$

$f_f = f_r = 0.003Nms$, $J_f = J_r = 1kgm^2$, $k_f = k_r = 5Nm$, $I_z = 82kgm^2$, $M = 350kg$, $L = 1.205m$, $a = L/3$, $b = 2L/3$ et $R = 0.35m$

$\alpha_0 = \alpha'_0 = 1200N$, $\alpha_1 = \alpha'_1 = 1200N$, $\alpha_2 = \alpha'_2 = 700N$, $\beta = \beta' = 14$.

Ayant à notre disposition, un modèle de la dynamique de RobuCar, nous pouvons maintenant analyser le système du point de vue de ses propriétés d'observabilité et d'accessibilité en fonctionnement normal puis donner l'évolution de ces propriétés suite à la panne d'un ou de plusieurs composants.

3.3 Analyse des capacités de RobuCar à tolérer les fautes

L'analyse de la tolérance aux fautes de RobuCar peut être faite en deux temps. Tout d'abord, nous nous intéresserons à la tolérance aux fautes de capteurs afin de connaître l'évolution des capacités d'estimation du système après des défaillances dans la mesure. Cette analyse du point de vue capteur se terminera par le calcul de RTBNE par rapport à différents ensembles de capteurs

pour le système linéarisé autour d'un point de fonctionnement. Ensuite, l'analyse des tolérances aux fautes d'actionneurs nous permettra de prévoir l'évolution des capacités de commande du système après des défaillances de certaines entrées de commande.

3.3.1 Du point de vue des capteurs

Les méthodes d'analyse de la tolérance aux fautes du point de vue des capteurs présentées dans la seconde partie sont appliquées à RobuCar dont l'équation d'état est donnée par l'équation 3.11.

Nous avons un système de treize états avec un ensemble de neuf capteurs. Une analyse de l'observabilité du système nous permet de dire qu'il est observable par cet ensemble.

Afin d'avoir une connaissance parfaite de l'état du système, nous choisissons que la fonctionnelle de l'état à estimer correspond à l'état dans sa totalité.

Dans ce cadre, l'analyse de l'observabilité du système montre qu'il est indispensable d'avoir les capteurs 5 et 6 correspondants respectivement à la mesure de la position de RobuCar en longitudinal (x) et en transversal (y) pour observer l'ensemble du système.

Nous épargnerons le lecteur d'un automate comprenant l'ensemble de capteurs initial et tous ses sous-ensembles suite à la perte de capteur(s). [Attouche, 2002] propose le regroupement d'ensembles de capteurs en classes afin de réduire la taille de l'automate et donc d'en améliorer la visibilité. Sur RobuCar, nous voyons aisément que le seul ensemble de capteurs minimal est $\{c_5, c_6\}$ et que tous les ensembles de capteurs contenant strictement les deux capteurs c_5, c_6 sont redondants.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse du système, nous avons fait le calcul du RTBNE.

Pour ce faire, le système a été linéarisé autour d'un point de fonctionnement envisageable pour le système. La linéarisation est donnée dans l'annexe B.

En prenant, comme ensemble de capteurs, l'ensemble initial composé de 9 capteurs (que nous nommerons I_{c_1}), l'algorithme du paragraphe 2.4.2 nous permet de déterminer la taille minimale de la fenêtre d'observation, le RTBNE de I_{c_1} et le RTBNE de I_{c_1} par rapport à chaque capteur. Ainsi, la taille minimale de la fenêtre d'observation calculée est de 2. Cela signifie que l'état du système peut être totalement estimé en 2 périodes de mesure. Pour cette fenêtre d'observation, le RTBNE de I_{c_1} est de 1. Ainsi, en partant de l'ensemble I_{c_1} , suite à la défaillance de n'importe quel capteur, l'état est toujours estimable à l'intérieur de la fenêtre d'observation pendant au moins 1 période de mesure. Ce temps pourra être utilisé pour détecter, localiser et reconfigurer le système. Le RTBNE de I_{c_1} par rapport aux capteurs 5 ou 6 est de 1 et il est égal à l'infini par rapport aux autres capteurs. Grâce aux propriétés sur le RTBNE données au paragraphe 2.4.2 du deuxième chapitre, comme le maximum des RTBNE de I_{c_1} par rapport à chaque capteur est de l' ∞ et que le RTBNE de I_{c_1} est de 1, nous pouvons dire que I_{c_1} est redondant et que ses

degrés de redondance fort et faible sont respectivement nul et supérieur ou égal à 1. Ce résultat est cohérent avec l'analyse précédente qui nous avait permis de trouver que le seul ensemble de capteur minimal était l'ensemble $\{c_5, c_6\}$.

Si maintenant, nous considérons l'ensemble de capteur minimal $I_{c_2} = \{c_5, c_6\}$, l'algorithme de détermination du RTBNE nous indique que la taille minimale de la fenêtre d'observation est de 7 et que le RTBNE de I_{c_2} est égal à 5. Ainsi, avec l'ensemble de capteur I_{c_2} , l'état est complètement estimable en 7 périodes de mesure et si l'un des capteurs est défaillant, l'état restera estimable à l'intérieur de la fenêtre d'observation minimale pendant au-moins 5 périodes de mesure. Enfin, le RTBNE de I_{c_2} par rapport aux capteurs c_5 ou c_6 est de 5. De même, d'après les propriétés du paragraphe 2.4.2 du deuxième chapitre, nous pouvons en déduire que l'ensemble de capteur I_{c_2} est minimal. Ceci confirme les résultats trouvés au début de ce paragraphe.

Cette analyse de la tolérance aux fautes du point de vue des capteurs a été faite dans le but de préparer un futur travail de recherche pour la mise en place d'un module de FTE (Fault Tolerant Estimation) mais aucune technique de reconfiguration suite à la perte de capteurs ne sera développé dans ce mémoire. Nous nous focaliserons uniquement sur les défauts d'actionneurs.

3.3.2 Du point de vue des actionneurs

De même que pour l'analyse de l'observabilité de RobuCar, nous utiliserons les méthodes exposées dans le deuxième chapitre afin d'analyser l'évolution des propriétés d'accessibilité de RobuCar suite à la perte d'un ou de plusieurs actionneurs.

Notre but final pour ce travail de recherche est d'être capable de suivre une trajectoire malgré la perte d'actionneurs. Il n'est donc pas indispensable que l'ensemble de l'état soit accessible. Nous choisirons donc $z = \begin{pmatrix} x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_{13} \end{pmatrix}^T$ comme fonctionnelle de l'état à accéder. En effet, c'est bien les vitesses et positions longitudinales et transversales ainsi que la vitesse de lacet qu'il nous importe de contrôler afin de suivre une trajectoire (x_6 et x_8) à une vitesse de consigne (x_5 et x_7) dans de bonnes conditions (x_{13}).

Suite à l'analyse du système comme exposée dans la deuxième partie, nous constatons qu'avec un moteur de braquage et un moteur de traction, la fonctionnelle est toujours accessible. Egalement, avec uniquement deux moteurs de traction, s'ils ne se situent pas du même côté du véhicule, la fonctionnelle est encore accessible.

Ainsi, tous les ensembles de deux actionneurs (sauf les ensembles $\{u_1, u_3\}$ et $\{u_2, u_4\}$) sont minimaux par rapport à la fonctionnelle.

Dans le chapitre 4, nous utiliserons l'ensemble d'actionneurs $\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ comme ensemble nominal (nous n'utiliserons donc pas l'angle de braquage arrière). Ensuite, une simulation de défaut sera faite sur le moteur commandant l'angle de braquage avant. Ainsi, nous disposerons encore de l'ensemble d'actionneurs $\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ avec lequel la fonctionnelle est encore acces-

sible. Dans un deuxième temps, c'est un défaut sur un moteur de traction qui sera simulé, là encore avec l'ensemble d'actionneurs $\{u_1, u_3, u_4, u_5\}$, la fonctionnelle est encore accessible. Si les deux défauts apparaissent successivement, il en est de même. Nous pourrions donc, dans les trois cas de défauts, reconfigurer la loi de commande afin de continuer à suivre la trajectoire désirée.

3.3.3 Conclusion sur l'analyse de la tolérance aux fautes

Cette phase d'analyse était juste une application sur RobuCar des méthodes présentées dans le chapitre 2. Nous voyons, qu'à partir des ensembles de capteurs et d'actionneurs initiaux, nous pouvons perdre plusieurs capteurs et/ou actionneurs et garder encore la fonctionnelle de l'état observable et accessible.

Cette redondance d'information et d'entrée de commande, nous permet de conclure qu'il est possible de mettre en place sur RobuCar une commande tolérante active aux défauts de capteurs et d'actionneurs. Dans la suite, c'est une commande tolérante active uniquement aux défauts d'actionneurs qui sera mise en place. Dans des travaux de recherche ultérieurs, il serait intéressant d'étendre cette tolérance aux défauts de capteurs.

3.4 Calcul d'une commande pour le système en fonctionnement normal

Le paragraphe précédent nous confirme la capacité de RobuCar à tolérer les fautes ; mais avant de mettre en place une commande tolérante, il nous faut disposer d'une commande qui fonctionne dans le cas nominal. Le but de cette commande est de permettre aux véhicules de suivre une trajectoire de référence à une vitesse également de référence.

Disposant, d'un modèle non linéaire, la première phase de notre étude (§3.4.1) consiste à mettre en place sur RobuCar une commande par bouclage linéarisant. Ainsi, le véhicule pourra être capable de suivre des vitesses de rotation de consignes pour chacune des roues ainsi que des angles de braquage des roues avant et arrière.

L'objectif étant de suivre une trajectoire à une vitesse donnée, la commande à bouclage linéarisant sera complétée en amont par un module de planification de trajectoire muni d'un contrôleur.

Ainsi, avec ce système de commande en cascade, le véhicule pourra suivre différentes trajectoires à différentes vitesses.

3.4.1 Mise en place d'une commande par bouclage linéarisant

Présentation du bouclage linéarisant

Une description détaillée de la commande par bouclage linéarisant peut par exemple être trouvée dans [Fossard et Normand-Cyrot, 1995] [Isidori, 1995] [Marquez, 2003]. Nous ne reprenons ici que

les points principaux.

Soit un système non linéaire affine en la commande défini par la relation suivante, où x représente le vecteur d'état, u le vecteur de commande et y le vecteur de sortie :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^p g_i(x).u_i \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.13)$$

On supposera par la suite que le système 3.13 possède n états (dimension du vecteur x) et un nombre m de commandes (ou entrées) égal au nombre p de sorties (i.e. système carré). Pour un tel système, la dérivée première par rapport au temps d'une sortie y_i , $i \in \{1, \dots, p\}$, s'écrit sous la forme :

$$\dot{y}_i = \dot{h}_i(x) = \sum_{j=1}^p \frac{\partial h_i(x_j)}{\partial x_j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^p \frac{\partial h_i(x_j)}{\partial x_j} \cdot (f_j(x) + \sum_{k=1}^p g_{jk}(x).u_k) \quad (3.14)$$

Grâce à la définition de la dérivé de Lie donnée à la page 41, le système 3.14 se met sous la forme compacte suivante :

$$\dot{y}_i = L_f h_i(x) + \sum_{k=1}^p L_{g_k} h_i(x).u_k \quad (3.15)$$

En supposant que $L_{g_k} h_i(x) = 0 \forall k \in \{1, \dots, p\}$ (i.e. que \dot{y} n'est pas fonction de u), la dérivée seconde de la sortie y_i s'écrit sous la forme suivante :

$$\ddot{y}_i = L_f(L_f h_i(x)) + \sum_{k=1}^p L_{g_k}(L_f h_i(x)).u_k = L_f^2 h_i(x) + \sum_{k=1}^p L_{g_k} L_f h_i(x).u_k \quad (3.16)$$

En supposant à nouveau que $L_{g_k} L_f h_i(x) = 0 \forall k \in \{1, \dots, p\}$, et en itérant les dérivations jusqu'à ce qu'une commande du système apparaisse de manière explicite, il vient pour une dérivation à l'ordre l ($l \geq 2$) :

$$y_i^l = L_f^l h_i(x) + \sum_{k=1}^p L_{g_k} L_f^{l-1} h_i(x).u_k \quad (3.17)$$

Le degré relatif de la sortie y_i , noté ρ_i $i \in 1, \dots, p$ est le nombre minimum de dérivations de la sortie y_i permettant de faire apparaître de manière explicite une commande du système :

$$\rho_i = \min\{l > 0 \text{ tel que } L_{g_k} L_f^{l-1} h_i(x) \neq 0, k \in \{1, \dots, p\}\} \quad (3.18)$$

Le vecteur $\xi(x)$ et la matrice $\Delta(x)$ sont alors définis de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} y_1^{\rho_1} \\ \vdots \\ y_p^{\rho_p} \end{pmatrix} = \xi(x) + \Delta(x).u \quad (3.19)$$

avec :

$$\begin{cases} \xi(x) = \begin{pmatrix} L_f^{\rho_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_p} h_p(x) \end{pmatrix} \\ \Delta(x) = \begin{pmatrix} L_{g_1} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_p-1} h_p(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{\rho_p-1} h_p(x) \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3.20)$$

Dans ces conditions, si et seulement s'il existe un sous-espace de \mathfrak{R}^n , noté M_0 , dans lequel la matrice $\Delta(x)$ est inversible, i.e. :

$$\text{rang}(\Delta(x)) = p$$

Alors le retour d'état suivant permet de découpler la dynamique des sorties du système 3.13 dans M_0 :

$$\begin{cases} u = \alpha(x) + \beta(x).v \\ \alpha(x) = -\Delta^{-1}(x).\xi(x) \\ \beta(x) = \Delta^{-1}(x) \end{cases} \quad (3.21)$$

Le vecteur v définit un nouveau vecteur de commande et il vient :

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1^{\rho_1} \\ \vdots \\ y_p^{\rho_p} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

De plus, il existe un difféomorphisme (changement de coordonnées locales) $\Phi_i : x \rightarrow z_i$ défini par :

$$z_i = \Phi_i(x) = \begin{pmatrix} h_i(x) \\ L_f h_i(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_i-1} h_i(x) \end{pmatrix} \quad \dim(z_i) = \rho_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, p\} \quad (3.23)$$

Dans le nouveau système de coordonnées, le système bouclé s'écrit sous la forme découplée (ou forme de Brunovsky) suivante :

$$\dot{z}_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix} .z_i + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} .v_i \quad (3.24)$$

$$y_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} .z_i \quad (3.25)$$

$$v_i = y_i^{(\rho_i)} = L_f^{\rho_i} h_i(x) + \sum_{k=1}^p L_{g_k} L_f^{\rho_i-1} h_i(x) \quad (3.26)$$

Dans le cas où la matrice $\Delta(x)$ est de rang k inférieur à la dimension n du système (i.e. $\sum_{i=1}^p \rho_i = k < n$), et dans le cas mono-entrée, mono-sortie ($p = 1$), un difféomorphisme peut être construit de la manière suivante [Khalil, 2002] :

$$z = \Phi(x) = \begin{pmatrix} h(x) \\ \vdots \\ L_f^{k-1} h_i(x) \\ \Psi_1(x) \\ \vdots \\ \Psi_{n-k}(x) \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

où les fonctions $\Psi_i(x)$ vérifient les conditions suivantes, et où x_e est un point d'équilibre du système (3.13)(i.e. $f(x_e) = 0$) :

$$\begin{cases} \Psi_i(x_e) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_i(x)}{\partial x_i} g_i(x) = 0 \end{cases} \quad \forall i \in \{1, \dots, n-k\} \quad (3.28)$$

Dans ce cas, il convient de vérifier que la partie du processus non observable (dynamique interne, appelée aussi dynamique des zéros), qui correspond à la dynamique des états $\Psi_1, \dots, \Psi_{n-k}$ est qui est de dimension $n-k$ est stable.

Il est possible d'introduire une ou plusieurs intégrations sur certaines entrées sous la forme suivante :

$$u_i = \int v_i dt \Leftrightarrow \dot{u}_i = v_i \quad (3.29)$$

La variable u_i devient une nouvelle variable d'état tandis que v_i est la nouvelle commande : il s'agit alors d'un bouclage dynamique.

Exemple [Khalil, 2002] : soit le système décrit par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + \frac{2+x_3^2}{1+x_3^2} u \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_3 + u \\ y = x_2 \end{cases} \quad (3.30)$$

Le point d'équilibre de ce système est $x_e = 0$. En dérivant deux fois la sortie y par rapport au temps, la commande u apparaît de manière explicite :

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{x}_2 = x_3 \\ \ddot{y} = \dot{x}_3 = x_1 x_3 + u \end{cases} \quad (3.31)$$

Par conséquent, le degré relatif de la sortie y est deux. Après avoir appliqué la relation 3.26, la nouvelle commande v s'exprime en fonction de la commande u sous la forme suivante :

$$v = \ddot{y} = L_f^{\rho_i} h(x) + L_g L_f^{\rho_i - 1} h(x) \cdot u = x_1 x_3 + u \quad (3.32)$$

Le changement de coordonnées locales $\Phi_1 : x \rightarrow z_1$ défini par 3.23 s'explique sous la forme suivante :

$$\begin{cases} z_1 = h(x) = x_2 \\ z_2 = L_f h(x) = x_3 \end{cases} \quad (3.33)$$

Comme le degré relatif de la sortie y vaut deux, il est par conséquent inférieur à l'ordre du système, égal à trois. Il convient donc de vérifier que le système est détectable c'est-à-dire que la partie non-observable du processus (dynamique des zéros) est stable. Cette dynamique est obtenue en fixant $u = 0$ et en restreignant le vecteur d'état x à $\{x_2 = 0; x_3 = 0\}$. Le processus se réduit alors au système stable suivant :

$$\dot{x}_1 = -x_1 \quad (3.34)$$

Enfin, il nous faut compléter les variables z_1 et z_2 pour construire un difféomorphisme. Nous pouvons par exemple utiliser la relation 3.28 :

$$z_3 = \Psi(x_1, x_2, x_3) \text{ tel que } \begin{cases} \Psi(0, 0, 0) = 0 \\ \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \Psi(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} g_i(x) = 0 \end{cases} \text{ où } \begin{cases} g_1(x) = \frac{2+x_3^2}{1+x_3^2} \\ g_2(x) = 0; g_3(x) = 1 \end{cases}$$

Il s'agit alors de résoudre l'équation aux dérivées partielles suivantes :

$$\frac{2+x_3^2}{1+x_3^2} \frac{\partial \Psi(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial \Psi(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (3.35)$$

La résolution de cette équation par la méthode de la séparation des variables conduit à la solution suivante qui satisfait $\Psi(0, 0, 0) = 0$:

$$z_3 = \Psi(x_1, x_2, x_3) = -x_1 + x_3 + \arctan x_3 \quad (3.36)$$

Ce difféomorphisme permet alors d'exprimer le système 3.30 sous forme normale :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v = z_2(z_2 + \arctan z_2 - z_3) + u \\ \dot{z}_3 = (z_2 + \arctan z_2 - z_3)(1 + \frac{2+z_3^2}{1+z_3^2} z_2) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (3.37)$$

Application de la méthode de bouclage linéarisant à notre système

La méthode du bouclage linéarisant présentée ci-dessus est appliquée au modèle de RobuCar donné à la page 83 affine en la commande.

Pour appliquer cette méthode, il faut avoir le même nombre d'entrées et de sorties. Afin de commander au mieux les six actionneurs que nous utilisons sur RobuCar, il est intéressant d'utiliser les mesures des variables les plus directement influencées par ces actionneurs. Ici, les quatre moteurs de traction agissent directement sur les vitesses de rotation des roues et les deux moteurs de direction agissent sur l'angle de braquage des roues. Ne pouvant utiliser que six capteurs (égal au nombre d'actionneurs), nous utiliserons donc les capteurs des vitesses de rotation des roues ainsi que les capteurs d'angle de braquage des roues avant et arrière.

La partie des sorties que nous utilisons est appelée y_u .

$$y_u = C_u \cdot x = h(x)$$

avec

$$C_u = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

La première phase consiste à calculer le degré relatif de chaque sortie

$$\begin{cases} \dot{y}_{u_1} = \dot{x}_1 = -\frac{f_1}{J_1}x_1 + \frac{RF_{x_1}}{J_1} + \frac{RF_{y_1}x_{10}}{J_1} + \frac{u_1}{J_1} \\ \dot{y}_{u_2} = \dot{x}_2 = -\frac{f_2}{J_2}x_2 + \frac{RF_{x_2}}{J_2} + \frac{RF_{y_2}x_{10}}{J_2} + \frac{u_2}{J_2} \\ \dot{y}_{u_3} = \dot{x}_3 = -\frac{f_3}{J_3}x_3 + \frac{RF_{x_3}}{J_3} + \frac{RF_{y_3}x_{12}}{J_3} + \frac{u_3}{J_3} \\ \dot{y}_{u_4} = \dot{x}_4 = -\frac{f_4}{J_4}x_4 + \frac{RF_{x_4}}{J_4} + \frac{RF_{y_4}x_{12}}{J_4} + \frac{u_4}{J_4} \\ \dot{y}_{u_5} = \dot{x}_{10} = x_9 \\ \dot{y}_{u_6} = \dot{x}_{12} = x_{11} \end{cases} \quad (3.38)$$

Les entrées de commande apparaissent dans l'expression des dérivées premières des quatre premières mesures utilisées. Ainsi

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = 1$$

Par contre, pour y_{u_5} et y_{u_6} , nous dérivons une seconde fois.

$$\begin{cases} \ddot{y}_{u_5} = \dot{x}_9 = -\frac{f_f}{J_f}x_9 - \frac{k_f}{J_f}x_{10} - \frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{J_f}D - \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{J_f}x_{10}D + \frac{u_5}{J_f} \\ \ddot{y}_{u_6} = \dot{x}_{11} = -\frac{f_r}{J_r}x_{11} - \frac{k_r}{J_r}x_{12} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{J_r}D - \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{J_r}x_{12}D + \frac{u_6}{J_r} \end{cases} \quad (3.39)$$

Comme \ddot{y}_{u_5} et \ddot{y}_{u_6} dépendent des entrées de commande, les degrés relatifs correspondants ρ_5 et ρ_6 sont égaux à 2.

$$\rho_5 = \rho_6 = 2$$

Ainsi selon l'équation 3.20 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi(x) = \begin{pmatrix} L_f^1 h_1(x) \\ L_f^1 h_2(x) \\ L_f^1 h_3(x) \\ L_f^1 h_4(x) \\ L_f^2 h_5(x) \\ L_f^2 h_6(x) \end{pmatrix} + = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \\ f_4(x) \\ f_9(x) \\ f_{11}(x) \end{pmatrix} \\ \Delta(x) = \begin{pmatrix} L_g L_f^0 h_1(x) \\ L_g L_f^0 h_2(x) \\ L_g L_f^0 h_3(x) \\ L_g L_f^0 h_4(x) \\ L_g L_f^1 h_5(x) \\ L_g L_f^1 h_6(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_r \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (3.40)$$

or $u = \alpha(x) + \beta(x).v$

avec d'après l'équation 3.21,

$$\alpha(x) = - \begin{pmatrix} J_1 f_1(x) \\ J_2 f_2(x) \\ J_3 f_3(x) \\ J_4 f_4(x) \\ J_f f_9(x) \\ J_r f_{11}(x) \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

$$\beta(x) = \begin{pmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_r \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

Le vecteur v définit un nouveau vecteur de commande et il vient :

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{y}_{u_1} \\ \dot{y}_{u_2} \\ \dot{y}_{u_3} \\ \dot{y}_{u_4} \\ \ddot{y}_{u_5} \\ \ddot{y}_{u_6} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

De plus, il existe un difféomorphisme $\Phi : x \rightarrow z$ défini par :

$$z = \Phi(x) = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \\ h_3(x) \\ h_4(x) \\ h_5(x) \\ L_f h_5(x) \\ h_6(x) \\ L_f h_6(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_{10} \\ x_9 \\ x_{12} \\ x_{11} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Dans le nouveau système de coordonnées (z), le système bouclé s'écrit sous la forme découplée (ou forme de Brunovsky) suivante :

$$\dot{z} = A_z z + B_z v \quad (3.45)$$

avec

$$A_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le bouclage a été étudié en considérant que l'ensemble de l'état était disponible. Or, il y a quelques états qui ne sont pas mesurés. Il faut donc mettre en place un estimateur d'état pour finaliser cette linéarisation. Enfin la dernière étape consistera à déterminer la commande à mettre en place sur ce système.

Mise en place d'un estimateur d'état

Puisqu'il existe une incertitude sur les paramètres utilisés dans le modèle et afin d'être robuste aux perturbations, l'observateur à mode glissant semble approprié.

Les observateurs basés sur le mode glissant [Utkin, 1978] [DeCarlo *et al.*, 1988] ont tout d'abord été développés dans le cas linéaire [Drakunov, 1992] [Drakunov *et al.*, 1990]

[Walcott et Zak, 1986] [Walcott *et al.*, 1987] :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.46)$$

$$y = Cx \quad (3.47)$$

Leur structure est similaire aux observateurs linéaires standards mis à part que le terme de correction utilise une fonction discontinue (la fonction signe) :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L.sign(y - C\hat{x}) \quad (3.48)$$

où la fonction signe donne en résultat un vecteur colonne si $(y - C\hat{x})$ est un vecteur colonne.

$$sign(z) = [sign(z_1) \quad sign(z_2) \quad \dots \quad sign(z_n)]^T \quad (3.49)$$

Si la matrice de gain L est correctement choisie, le glissement pour le système 3.48 se produit sur la surface $y - C\hat{x} = 0$ et l'observateur est alors équivalent à un observateur d'ordre réduit.

L'observateur peut être conçu de façon séquentielle par la méthode utilisée dans [Utkin, 1983] [Drakunov *et al.*, 1990].

Cette méthode est illustrée pour le système 3.46, 3.47. En utilisant une transformation linéaire des variables d'état, il peut être mis sous la forme :

$$\dot{y} = A_{11}y + A_{12}x_2 + B_1u \quad (3.50)$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}y + A_{22}x_2 + B_2u \quad (3.51)$$

où $x^T = [x_1 \quad x_2]^T$ et $A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$.

L'observateur à mode glissant pour le premier sous système est :

$$\dot{\hat{y}} = A_{11}\hat{y} + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u + L_1sign(y - \hat{y}) \quad (3.52)$$

Le système pour l'erreur d'estimation obtenue en soustrayant l'équation 3.50 de l'équation 3.52 a la forme :

$$\dot{\tilde{y}} = A_{11}\tilde{y} + A_{12}\tilde{x}_2 - L_1sign(\tilde{y}) \quad (3.53)$$

Par un choix approprié de la matrice de gain L_1 le glissement se produit sur l'équation 3.53 le long de la surface $\tilde{y} = 0$.

Pour le second sous-système 3.51, nous pouvons utiliser l'équation d'observation suivante :

$$\dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{y} + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + L_2L_1sign(y - \hat{y}) \quad (3.54)$$

qui donne comme erreur d'estimation :

$$\dot{\tilde{x}}_2 = A_{22}\tilde{x}_2 - L_2L_1sign(\tilde{y}) \quad (3.55)$$

Selon la méthode de commande équivalente, le système en mode glissant se comporte comme si $L_1sign(\tilde{y})$ était remplacé par sa valeur équivalente $(L_1sign(\tilde{y}))_{eq}$ qui peut être calculée à partir

du sous-système 3.53 en supposant que $\tilde{y} = 0$ et que $\dot{\tilde{y}} = 0$.

Ainsi

$$(L_1 \text{sign}(\tilde{y}))_{eq} = A_{12} \tilde{x}_2 \quad (3.56)$$

En remplaçant 3.56 dans 3.55, nous obtenons

$$\dot{\tilde{x}}_2 = (A_{22} - L_2 A_{12}) \tilde{x}_2 \quad (3.57)$$

Il peut être démontré que si le système 3.46, 3.47 (la paire (A, C)) est observable alors la paire (A_{22}, A_{12}) est aussi observable et, par conséquent, par un choix approprié de L_2 , la convergence de l'observateur vers $\tilde{x}_2 \rightarrow 0$ peut être obtenue.

Comment déterminer L_1 et L_2 ?

Soit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \tilde{y}^T \tilde{y} > 0 \quad (3.58)$$

alors

$$\dot{V} = 2\dot{\tilde{y}}^T \tilde{y} \quad (3.59)$$

Il reste à montrer que pour des valeurs de L_1 et L_2 bien choisies, nous avons $\dot{V} < 0$

$$\dot{V} = 2(\tilde{y}^T A_{11}^T \tilde{y} + \tilde{x}_2^T A_{12}^T \tilde{y} - (\text{sign}(\tilde{y}))^T L_1^T \tilde{y}) \quad (3.60)$$

Posons L_1 diagonale. Alors $(\text{sign}(\tilde{y}))^T L_1^T = \sum |\tilde{y}_i| l_i$

où $\tilde{y}^T = [\tilde{y}_1 \quad \tilde{y}_2 \quad \dots \quad \tilde{y}_p]^T$ et l_i correspond à la valeur du i ème terme de la diagonale de L_1 .

Or, par le théorème de Cauchy-Schwartz, nous avons

$$\tilde{y}^T A_{11}^T \tilde{y} \leq \|\tilde{y}^T\| \|A_{11}^T\| \|\tilde{y}\| \quad (3.61)$$

$$\tilde{x}_2^T A_{12}^T \tilde{y} \leq \|\tilde{x}_2^T\| \|A_{12}^T\| \|\tilde{y}\| \quad (3.62)$$

et par le théorème sur l'équivalence des normes, nous savons qu'il existe $\alpha \in \mathfrak{R}^{*+}$ tel que $\sum |\tilde{y}_i| l_i \geq \alpha \sum l_i \|\tilde{y}_i\|$.

Finalement, en supposant que l'observateur sur x_2 , obtenu par placement de pôle, converge ($\tilde{x}_2 \rightarrow 0$), et en choisissant les coefficients l_i suffisamment élevés au départ, notre observateur convergera également ($\tilde{y} \rightarrow 0$). Ensuite, les valeurs des l_i peuvent être diminuées afin d'ajuster l'observateur.

Toute la théorie sur les observateurs à mode glissant est expliquée dans le cas linéaire par souci de simplification mais peut être étendue au cas non linéaire comme pour RobuCar. Ainsi, avec un observateur de l'état qui converge vers la valeur réelle, le bouclage linéarisant peut être totalement réalisé.

Commande par retour d'Etat

Sur ce nouveau système, nous mettons en place une commande par retour d'état $v = -K.z + H.r$ calculée par placement de pôles. Prenons , Alors le système 3.45 s'écrit : $\dot{z} = (A_z - B_z.K)z$
Grâce à cette commande, le système peut suivre des références r pour la vitesse de rotation des roues et la dérivé de l'angle de braquage des roues avant et arrière. Le système linéarisé par bouclage linéarisant (§ 3.4.1) utilisant un estimateur de l'état (§ 3.4.1), auquel nous avons associé une commande par retour d'état (§ 3.4.1), peut être représenté de manière schématique comme indiqué sur la figure 3.7.

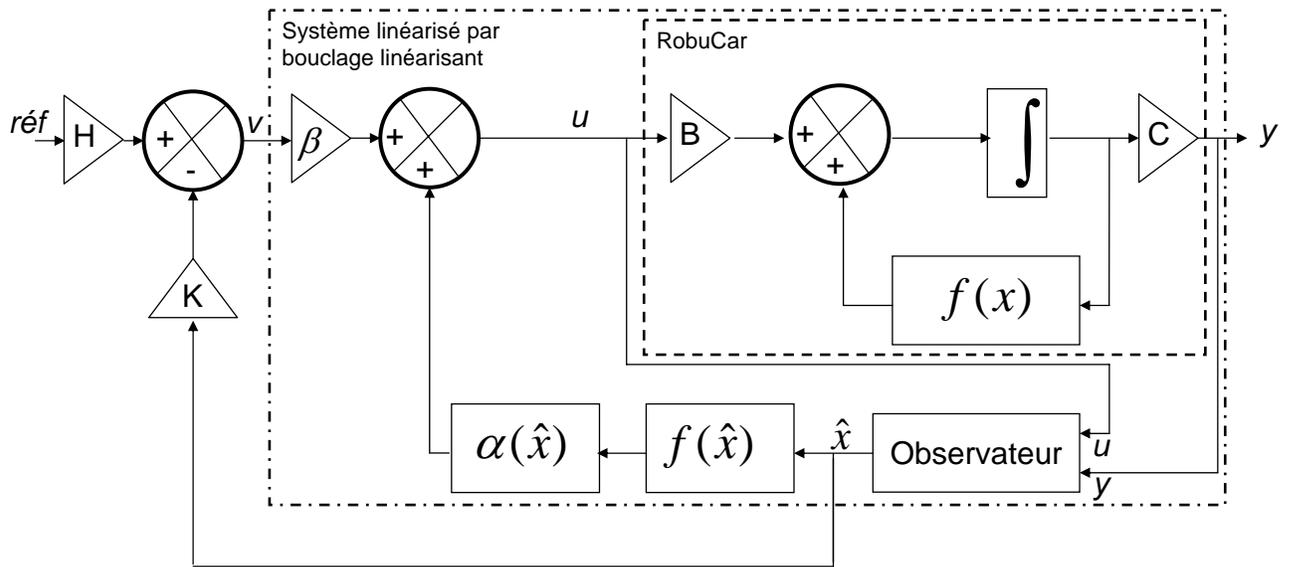


FIG. 3.7 – Suivi de vitesse de rotation de roues et d'angles de braquage

3.4.2 Suivi de trajectoire à une vitesse de référence

Ce système est conçu avec des consignes en vitesses de rotation et en dérivés d'angles de braquage. Dans notre application, le système doit suivre une trajectoire à une vitesse de référence. Donc, en amont du système bouclé de la figure 3.7, un module de planification de trajectoire muni d'une loi de commande est ajouté dans le but de suivre une trajectoire de référence à une vitesse donnée. Le système global est schématisé sur la figure 3.8.

Sur la figure 3.8, deux modules non pas encore été détaillés : l'estimateur de la position du véhicule et le module de Planification de trajectoire muni d'un contrôleur. En voici donc une description :

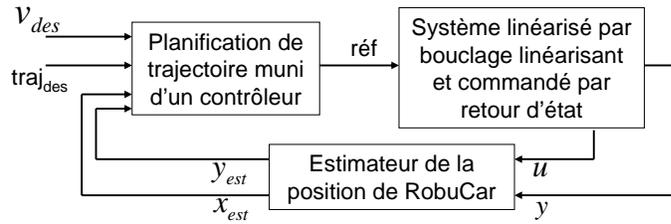


FIG. 3.8 – Schéma global de la commande nominale de RobuCar

- L'estimateur de la position du véhicule est détaillé sur la figure 3.9. Il prend en entrée les mesures délivrées par les capteurs de RobuCar et fournit en sortie, les coordonnées dans un repère fixe (lié à Terre) de la position du véhicule : $(x_{est}; y_{est})$.

Dans cette estimateur, le vecteur de fonction $m(v_x, v_y, \gamma)$ est défini par :

$$m(v_x, v_y, \gamma) = \begin{pmatrix} v_x \cos(\gamma) - v_y \sin(\gamma) \\ v_x \sin(\gamma) + v_y \cos(\gamma) \end{pmatrix}$$

Ce vecteur de fonction, qui prend en entrée les vitesses longitudinale et transversale dans le repère lié au véhicule ainsi que l'angle de lacet, donne la position en x et en y dans un repère fixe (lié à la Terre).

- Le module de planification de trajectoire muni d'un contrôleur est schématisé sur la figure 3.10. Au niveau de la consigne en vitesse, la transformation est basique puisqu'il suffit de convertir la consigne de vitesse linéaire en consigne de vitesse de rotation des roues. Par contre, au niveau du suivi de trajectoire, le principe est plus complexe. En fonction de la vitesse estimée en x et de la trajectoire désirée, la position désirée en y est déterminée. Cette dernière est comparée à la position estimée en y . La différence permet alors de savoir dans quel sens le véhicule doit tourner. Si l'erreur est positive (négative), le véhicule doit tourner à droite (gauche) et en conséquence l'angle de braquage avant doit augmenter (diminuer).

le contrôle est ensuite réalisé à l'aide d'un contrôleur PID réglé par simulation de manière à avoir le meilleur comportement du système en boucle fermée. Les simulations ont été réalisées avec ce réglage pour le PID : $K(s) = 0.2 + \frac{1.2}{s}$

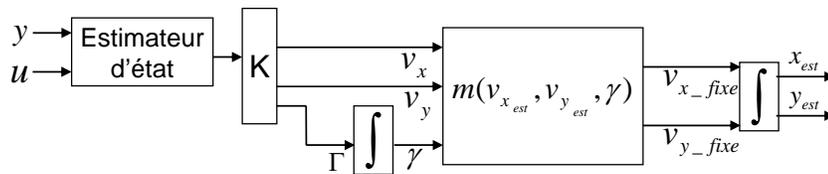


FIG. 3.9 – Estimateur de la position du véhicule

Avec cette commande et pour le système fonctionnant normalement, la trajectoire désirée est proche de la trajectoire mesurée (cf figure 3.11).

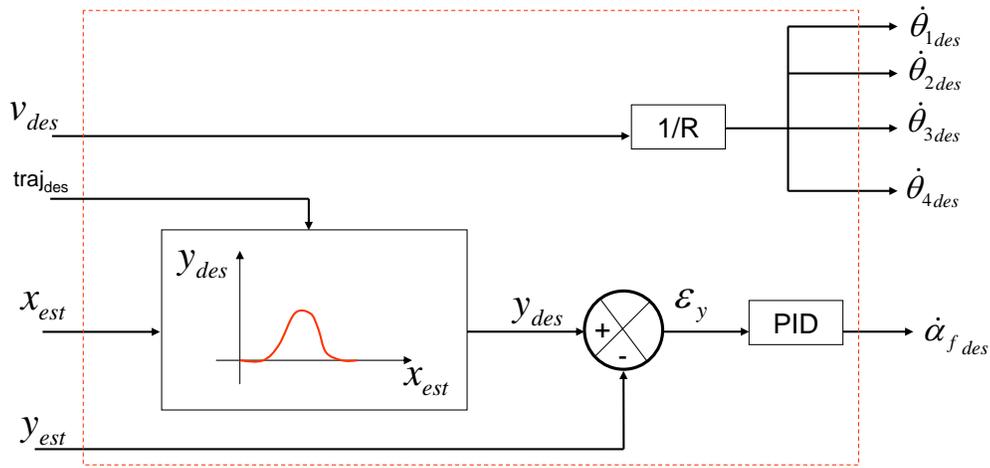


FIG. 3.10 – Module de planification de trajectoire

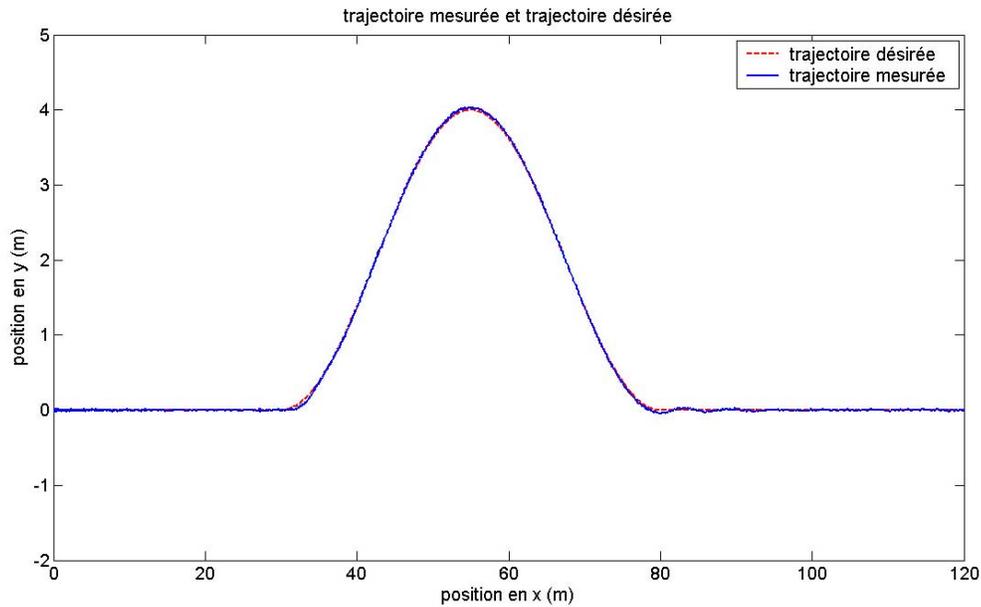


FIG. 3.11 – Trajectoire pour le système sans défaut

Il en est de même pour le suivi de la consigne en vitesse (figure 3.12).

3.4.3 Conclusion sur la commande du système en fonctionnement normal

A partir du modèle de RobuCar, ce paragraphe décompose la commande qui permettra au véhicule de suivre une trajectoire à une vitesse de référence. Le modèle est tout d'abord linéarisé par bouclage linéarisant et une commande par retour d'état est appliquée au système linéarisé. Ainsi, le système peut suivre des vitesses de rotation des roues et des dérivés d'angles de braquage de

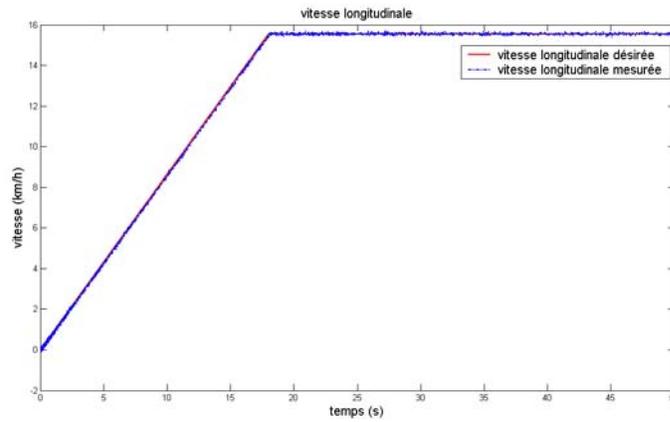


FIG. 3.12 – Vitesse longitudinale pour le système sans défaut

référence. En amont de ce système commandé, un module de planification de trajectoire permet de suivre la trajectoire à la vitesse désirée. Le test de cette commande sera davantage détaillé dans le chapitre 4.

La dernière étape dans la mise en place du système de commande tolérante active aux fautes est la conception du module de surveillance et du module de reconfiguration.

3.5 Mise en place d'une commande tolérante active aux fautes d'actionneurs

Suite au calcul d'une commande pour le fonctionnement normal et sachant que RobuCar est capable de tolérer des fautes d'instrumentation, nous pouvons maintenant mettre en place sur RobuCar une commande tolérante active aux fautes d'actionneurs (nous supposons que seuls des défaillances d'actionneurs peuvent se produire).

Nous commencerons par le calcul des résidus pour la détection des défaillances. Le défaut étant détecté, le module de reconfiguration est chargé de faire basculer la loi de commande du mode nominal au mode correspondant au défaut : il est donc nécessaire de prévoir, hors ligne, différents contrôleurs pour ces différents cas de défaillances.

Comme nous considérons des défauts majeurs d'actionneurs, il est inutile de continuer à utiliser ce dernier, ainsi la loi de commande du système en défaut n'utilisera que les actionneurs sains restants.

La stratégie de reconfiguration consiste donc, une fois le(s) défaut(s) détecté(s) et localisé(s), à

basculer vers la loi de commande correspondante.

3.5.1 Module de surveillance

Par la théorie de l'élimination appliquée à notre modèle, six résidus permettant de détecter et de localiser des défauts sur chacun des six actionneurs, peuvent être calculés.

Voici comment le premier résidu peut-être calculé. Nous avons :

$$J_1\ddot{\theta}_1 + f_1\dot{\theta}_1 - RF_{x_1} - RF_{y_1}\alpha_f - u_1 = 0 \quad (3.63)$$

or $F_{x_1} = \alpha_0 \text{sign}(G_1) - \alpha_1 e^{-\beta(|G_i|)} \text{sign}(G_i) - \alpha_2(G_i)$

avec $G_1 = \frac{R\dot{\theta}_1 - v_x}{v_x}$ et $y = \left(\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4 \quad d_x \quad d_y \quad \alpha_f \quad \alpha_r \quad \Gamma \right)^T$

donc $F_{x_1} = \alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right)$

De même $F_{y_1} = \alpha'_0 \text{sign}(\alpha'_f) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|\alpha'_f|)} \text{sign}(\alpha'_f) - \alpha'_2(\alpha'_f)$ avec $\alpha'_f = y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}$,

donc $F_{y_1} = \alpha'_0 \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right)$

Ainsi, l'équation 3.63 peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} J_1\dot{y}_1 + f_1y_1 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right)\right) \\ - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right)\right)y_7 - u_1 = 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

Finalement, le premier résidu s'écrit :

$$\begin{aligned} r_1 = J_1\dot{y}_1 + f_1y_1 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right)\right) \\ - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right)\right)y_7 - u_1 \end{aligned} \quad (3.65)$$

De la même manière, nous trouvons 5 autres résidus.

Voici donc les six résidus :

$$\begin{aligned} r_1 &= J_1\dot{y}_1 + f_1y_1 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}\right)\right) \\ &\quad - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right)\right)y_7 - u_1 \\ r_2 &= J_2\dot{y}_2 + f_2y_2 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}\right)\right) \\ &\quad - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}\right)\right)y_7 - u_2 \\ r_3 &= J_3\dot{y}_3 + f_3y_3 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}\right)\right) \\ &\quad - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right)\right)y_8 - u_3 \\ r_4 &= J_4\dot{y}_4 + f_4y_4 - R\left(\alpha_0 \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}\right) - \alpha_1 e^{-\beta\left(\left|\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}\right|\right)} \text{sign}\left(\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}\right) - \alpha_2\left(\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}\right)\right) \\ &\quad - R\left(\alpha'_0 \text{sign}\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_1 e^{-\beta'\left(\left|y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right|\right)} \text{sign}\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right) - \alpha'_2\left(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}\right)\right)y_8 - u_4 \end{aligned}$$

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
r_1	1	0	0	0	0	0
r_2	0	1	0	0	0	0
r_3	0	0	1	0	0	0
r_4	0	0	0	1	0	0
r_5	0	0	0	0	1	0
r_6	0	0	0	0	0	1

FIG. 3.13 – Matrice d'incidence

$$\begin{aligned}
 r_5 = & J_f \ddot{y}_7 + f_f \dot{y}_7 + k_f y_7 - D(\alpha_0 \text{sign}(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}) - \alpha_1 e^{-\beta(|\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}|)} \text{sign}(\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}) - \alpha_2 (\frac{R\dot{y}_1 - \dot{y}_5}{\dot{y}_1}) \\
 & + \alpha_0 \text{sign}(\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}) - \alpha_1 e^{-\beta(|\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}|)} \text{sign}(\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2}) - \alpha_2 (\frac{R\dot{y}_2 - \dot{y}_5}{\dot{y}_2})) \\
 & - D y_7 (\alpha'_0 \text{sign}(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}|)} \text{sign}(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}) - \alpha'_2 (y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}) \\
 & + \alpha'_0 \text{sign}(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}|)} \text{sign}(y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5}) - \alpha'_2 (y_7 - \frac{\dot{y}_6 + y_9 a}{\dot{y}_5})) - u_5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_6 = & J_r \ddot{y}_8 + f_r \dot{y}_8 + k_r y_8 - D(\alpha_0 \text{sign}(\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}) - \alpha_1 e^{-\beta(|\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}|)} \text{sign}(\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}) - \alpha_2 (\frac{R\dot{y}_3 - \dot{y}_5}{\dot{y}_3}) \\
 & + \alpha_0 \text{sign}(\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}) - \alpha_1 e^{-\beta(|\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}|)} \text{sign}(\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4}) - \alpha_2 (\frac{R\dot{y}_4 - \dot{y}_5}{\dot{y}_4})) \\
 & - D y_8 (\alpha'_0 \text{sign}(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}|)} \text{sign}(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}) - \alpha'_2 (y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}) \\
 & + \alpha'_0 \text{sign}(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}) - \alpha'_1 e^{-\beta'(|y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}|)} \text{sign}(y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5}) - \alpha'_2 (y_8 - \frac{\dot{y}_6 - y_9 b}{\dot{y}_5})) - u_5
 \end{aligned}$$

Lorsque le système est en fonctionnement normal, les résidus sont proches de zéro (cf figure 4.5). La figure 3.13 représente la matrice d'incidence pour ces résidus. Nous voyons donc que les signatures pour chacune des défaillances sont bien différentes. Les défauts sur chacun des actionneurs sont donc détectables et localisables. De plus, comme la valeur de chacun des résidus n'est influencée que par un actionneur, les pannes simultanées d'actionneurs peuvent également être détectées et localisées.

Exemple :

- Si la signature de la défaillance est $(0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$, il n'y a que l'actionneur 2 qui est en défaut.
- Si la signature de la défaillance est $(1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)^T$, nous avons donc les trois actionneurs 1 ; 4 et 5 qui sont en défaut.

Le module de surveillance des défauts étant mis en place, nous pouvons désormais nous intéresser aux contrôleurs pour les modes défaillants et à la stratégie de reconfiguration.

3.5.2 Calcul d'une banque de contrôleurs pour différents cas de défaillances et stratégie de reconfiguration

Dans le paragraphe 3.4, une commande a été proposée dans le cas nominal donc pour B de la forme :

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

Nous allons désormais considérer un certain nombres de défauts probables d'actionneurs.

1. Si le moteur de direction avant (actionneur 5) tombe en panne, la matrice B sera affectée sur sa cinquième colonne qui pourrait prendre, par exemple, la valeur suivante : $(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/(4.J_f) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$.

Puisque nous n'utilisons plus l'actionneur défaillant pour la reconfiguration, une nouvelle loi de commande doit être calculée pour le système

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + B_f u \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\text{où } B_f = \begin{pmatrix} 1/J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/J_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Comme le moteur de direction arrière n'est pas considéré (il n'y a donc plus de braquage

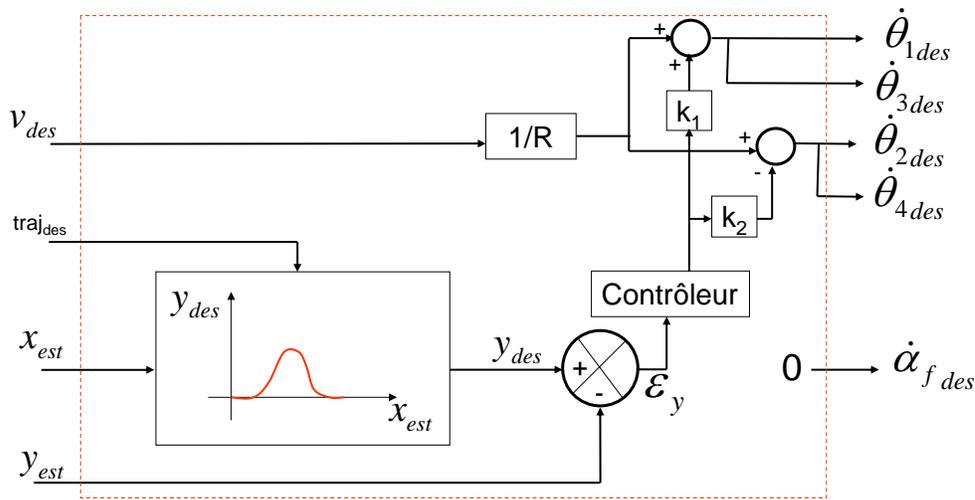


FIG. 3.14 – Module de planification de trajectoire reconfiguré suite à une défaillance sur l'actionneur 5

de roue possible), la seule possibilité pour que le véhicule puisse tourner est d'utiliser des vitesses de rotation des roues différentes à gauche et à droite. Par exemple, si le véhicule est trop à droite par rapport à la référence, il faut tourner les roues de droite plus vite que les roues de gauche afin de tourner à gauche. Le module de planification de trajectoire est alors reconfiguré pour devenir celui indiquée sur la figure 3.14.

Le contrôleur qui se trouve sur la figure 3.14 peut-être de deux types :

- soit un nouveau PID garantissant la stabilité du système. Pour les simulations, nous avons choisi ce réglage de PID : $K(s) = 4 + \frac{20}{s}$
- soit une commande à mode glissant où la surface de glissement est $s = \dot{\epsilon}_v - a\epsilon_v$ (avec pour les simulations $a = 3$)

Les deux types de contrôleurs seront comparés lors des simulations dans le chapitre 4.

Au niveau de la linéarisation du système par bouclage linéarisant, comme il y a un actionneur disponible en moins, nous devons de même utiliser un capteur en moins. Ceci se fait simplement en remplaçant la cinquième colonne de la matrice β de la figure 3.7 par une colonne de zéros.

Dans cette reconfiguration, le capteur de l'angle de braquage avant du véhicule n'est donc plus utilisée.

2. Le cas du moteur de direction des roues arrières (actionneur 6) en défaut ne sera pas étudié puisque nous avons précisé qu'il n'était pas utilisé et que le braquage des roues arrières restait nul.
3. Si un des moteurs de traction des roues tombe en panne, il a été constaté sur les simulations (chapitre 4) que le système commandé compensait de lui-même le défaut et qu'il était donc

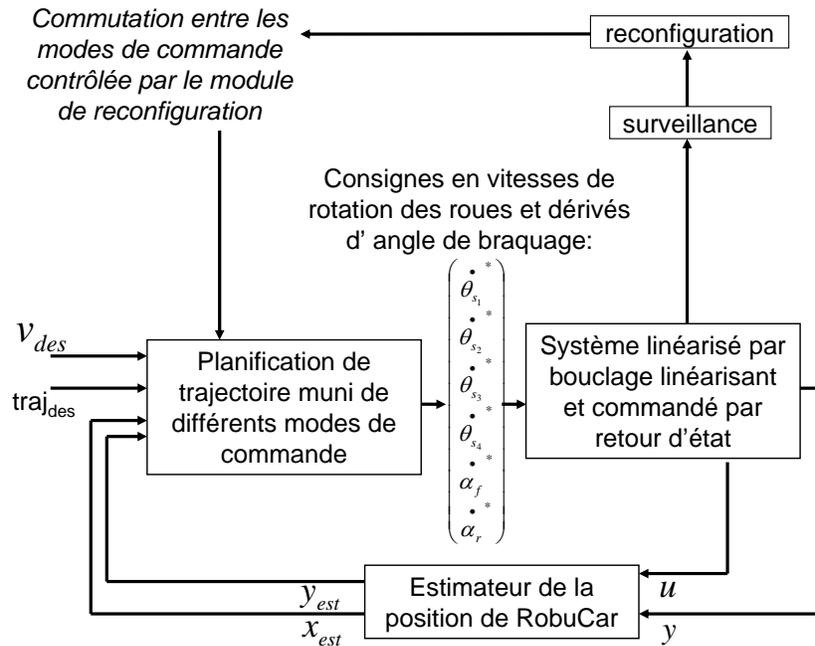


FIG. 3.15 – Système de commande tolérante active aux défauts d'actionneurs sur RobuCar

inutile de reconfigurer le système dans ce cas. Aucune reconfiguration n'est donc prévue pour ce type de défaillance.

Dans le cas général, une loi de commande est donc calculée pour chaque cas de défaillance détectable et localisable d'un ou de plusieurs actionneurs.

Ayant ensuite à disposition une loi de commande pour différents types de pannes d'actionneurs, le mécanisme de reconfiguration consiste uniquement, suite à la détection et à la localisation de défauts, à faire basculer la loi de commande du mode nominal au mode correspondant au défaut. Ici, le module de planification de trajectoire n'étant pas reconfiguré suite à un défaut de moteur de traction, ce module aura uniquement deux configurations possibles :

- la configuration pour le système sans défaut (figure 3.10)
- la configuration suite à un défaut sur le moteur de direction avant (figure 3.14)

Ce module sera alors appelé "Planification de trajectoire tolérante aux fautes". La figure 3.15 illustre ce mécanisme de reconfiguration ainsi que tout le système de commande tolérante active aux fautes d'actionneurs.

3.6 Conclusion

La décomposition de ce chapitre reflète la manière dont tout système peut être étudié pour le rendre tolérant actif aux fautes (ici aux fautes d'actionneur(s)).

En effet, la première phase consiste toujours à modéliser le système. Ici, La dynamique de RobuCar a été modélisé par un système non linéaire affine en la commande de 6 entrées, 9 sorties et 13 états. Sur le système modélisé, la seconde phase consiste à concevoir une commande afin d'atteindre les objectifs fixés. L'objectif, sur Robucar, était de suivre une consigne de trajectoire à une vitesse de référence. Celui-ci a été atteint par la mise en cascade d'un module de planification de trajectoire utilisant la position estimée du véhicule et les consignes en trajectoire et en vitesse et du modèle de RobuCar linéarisé par bouclage linéarisant et commandé par retour d'état. La simulation du système commandé sera donnée dans le chapitre 4.

Dans le but de rendre un système tolérant aux fautes arrive alors la troisième phase : l'analyse. Une analyse des redondances d'information sur le système permet de connaître sa capacité à tolérer les défauts. Là encore, l'analyse sur RobuCar a permis de confirmer sa capacité à être tolérant aux fautes. Ceci était prévisible vu le nombre de capteurs et d'actionneurs présents sur le véhicule.

Enfin, la dernière étape est la mise en place d'une commande tolérante active aux fautes sur le système. Celle-ci débute par la conception d'un module de surveillance puis par le calcul de différentes lois de commande pour chaque cas de défaillance(s) détectable(s) et localisable(s). Dans notre étude, nous nous sommes limités aux défauts d'actionneurs. En supposant que seul des défauts d'actionneurs peuvent survenir sur RobuCar, le module de surveillance a été conçu en utilisant la théorie de l'élimination sur les relations de redondance analytique du système. Le module de surveillance comprend six résidus permettant de détecter et localiser un ou plusieurs défauts d'actionneur. Le calcul des lois de commandes pour chaque cas de défaillance a conduit à transformer le module de planification de trajectoire en un module tolérant aux fautes et donc reconfigurable en cas de défaillance(s) d'actionneur.

Dans le prochain chapitre, le fonctionnement du système sera simulé dans le cas nominal mais aussi en cas d'occurrence de défaillance(s) sur le système.

Chapitre 4

Simulation et résultats

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré au test de la commande tolérante active aux fautes d'actionneurs mise en place, au chapitre précédent, sur le véhicule RobuCar.

Les tests sont faits à partir de simulations dans la mesure où l'apparition de défaut sur le système réel est difficile à provoquer et coûteuse.

L'objectif est de suivre une trajectoire de référence à une vitesse également de référence représentée sur les figures 4.1 et 4.2.

Ceci doit se faire dans des conditions de fonctionnement normales. Ainsi, l'angle de lacet nous donne l'orientation du véhicule par rapport à un repère fixe comme illustré sur la figure 4.3.

Les valeurs des paramètres, utilisées pour les simulations, et déterminées lors d'essais de RobuCar par l'entreprise SERA-CD, sont rappelées ci-dessous :

pour $i = 1..4$, $f_i = 2Nms$ et $J_i = 1kgm^2$

$f_f = f_r = 0.003Nms$, $J_f = J_r = 1kgm^2$, $k_f = k_r = 5Nm$, $I_z = 82kgm^2$, $M = 350kg$,
 $L = 1.205m$, $a = L/3$, $b = 2L/3$ et $R = 0.35m$

$\alpha_0 = \alpha'_0 = 1200N$, $\alpha_1 = \alpha'_1 = 1200N$, $\alpha_2 = \alpha'_2 = 700N$, $\beta = \beta' = 14$.

Pour tester cette commande, nous étudierons tout d'abord son comportement sans défaut en analysant le suivi des consignes en trajectoire et en vitesse, l'évolution des entrées de commande et de différentes variables d'état.

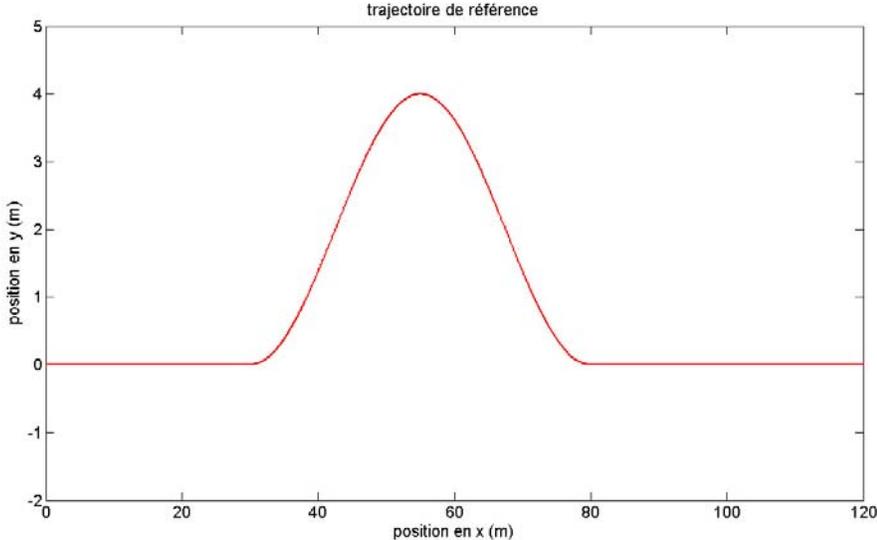


FIG. 4.1 – Trajectoire à suivre

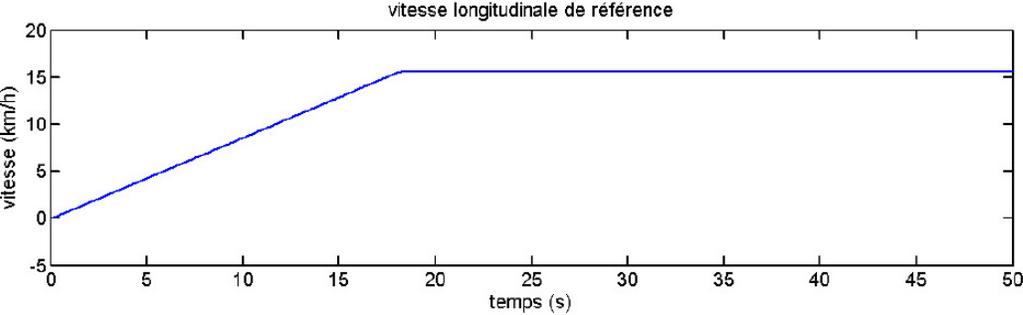


FIG. 4.2 – Consigne de vitesse longitudinale

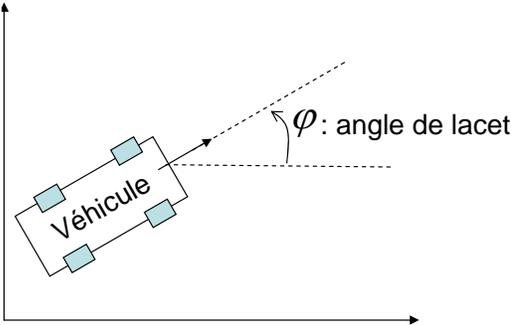


FIG. 4.3 – Exemple d'angle de lacet

Ensuite, l'occurrence de deux types de défauts sera simulée :

- défaut sur le moteur de traction de la roue avant gauche (actionneur 2)
- défaut sur le moteur de direction des roues avant (actionneur 5)

Enfin, la réaction du système face à ces défauts sera analysée.

4.2 Fonctionnement du système sans défaut

La figure 4.4 montre que la trajectoire mesurée sur le système sans défaut est proche de la consigne et comme aucun défaut n'apparaît, les résidus restent également au voisinage de zéro (cf figure 4.5).

Afin de suivre cette trajectoire, le PID impose à RobuCar de suivre les vitesses de rotation des roues et angles de braquage avant et arrière montrées sur la figure 4.6 et pour ce faire les entrées de commandes évoluent de la manière indiquée sur la figure 4.7. Comme l'accélération imposée sur le véhicule est faible, les actionneurs de traction ne sont pas beaucoup sollicités. Tout ceci se fait dans des conditions de fonctionnement normal puisque l'orientation du véhicule donnée par l'angle de lacet n'est jamais très éloignée de la direction à suivre (cf figure 4.8). De plus, la vitesse longitudinale du véhicule (cf figure 4.9) est proche de la vitesse linéaire de chacune des roues du véhicule donnée à la figure 4.6, ceci signifie que le glissement est quasiment nul pour les consignes choisies en vitesse.

Le fonctionnement du système sans défaut étant satisfaisant, nous pouvons maintenant simuler des défauts d'actionneurs.

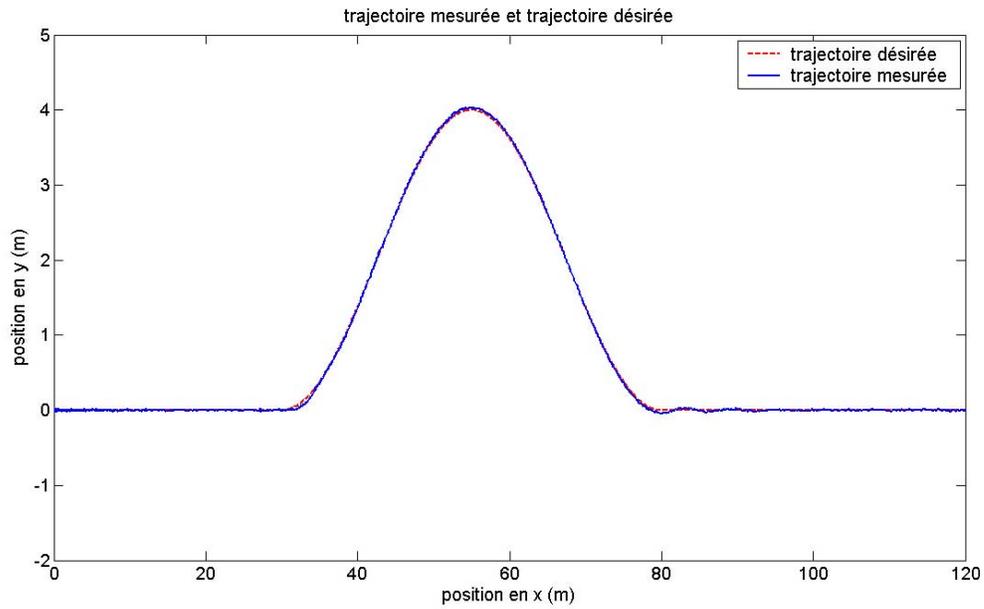


FIG. 4.4 – Trajectoire pour le système sans défaut

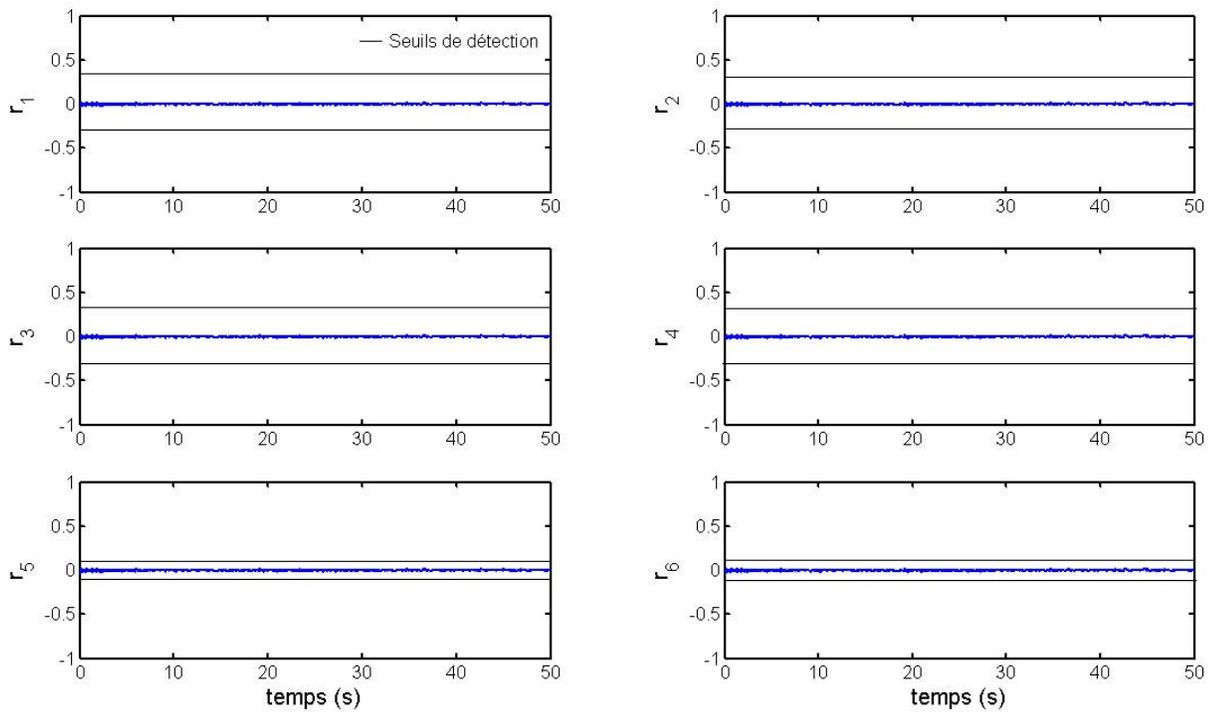


FIG. 4.5 – Calcul des résidus normalisés pour le système sans défaut

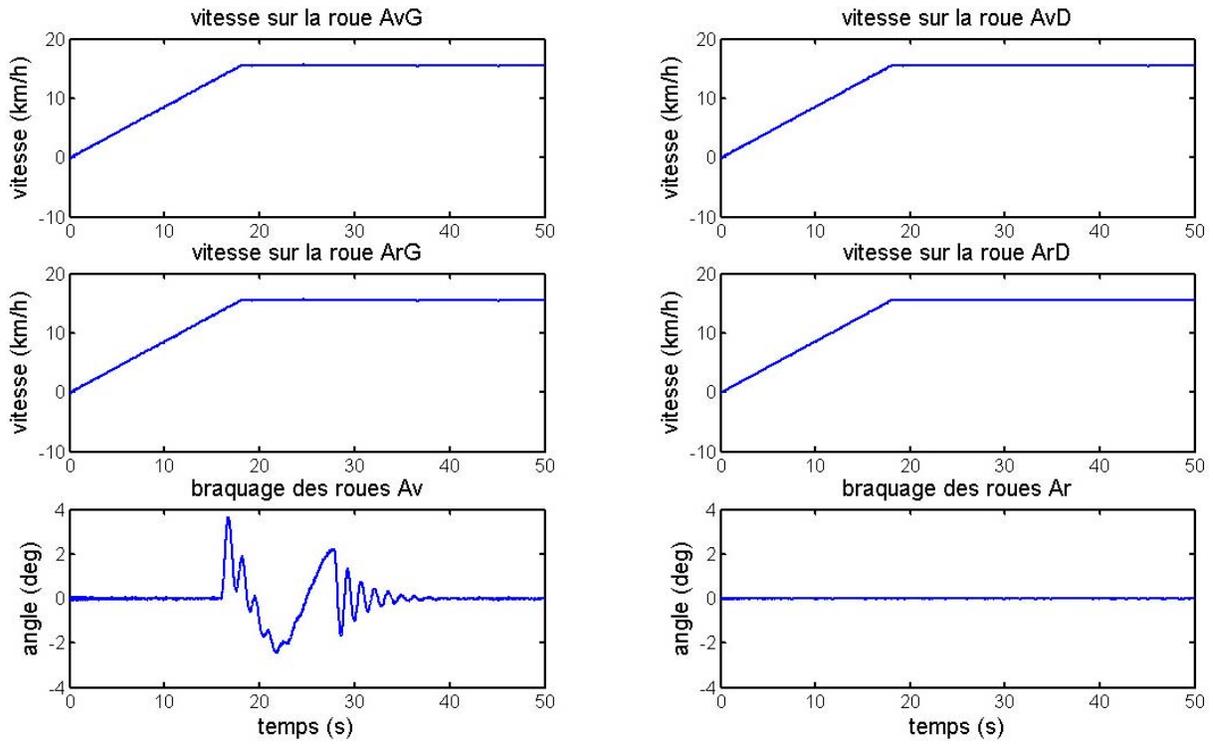


FIG. 4.6 – Vitesse linéaire de chacune des roues et angles de braquage mesurée pour le système nominal

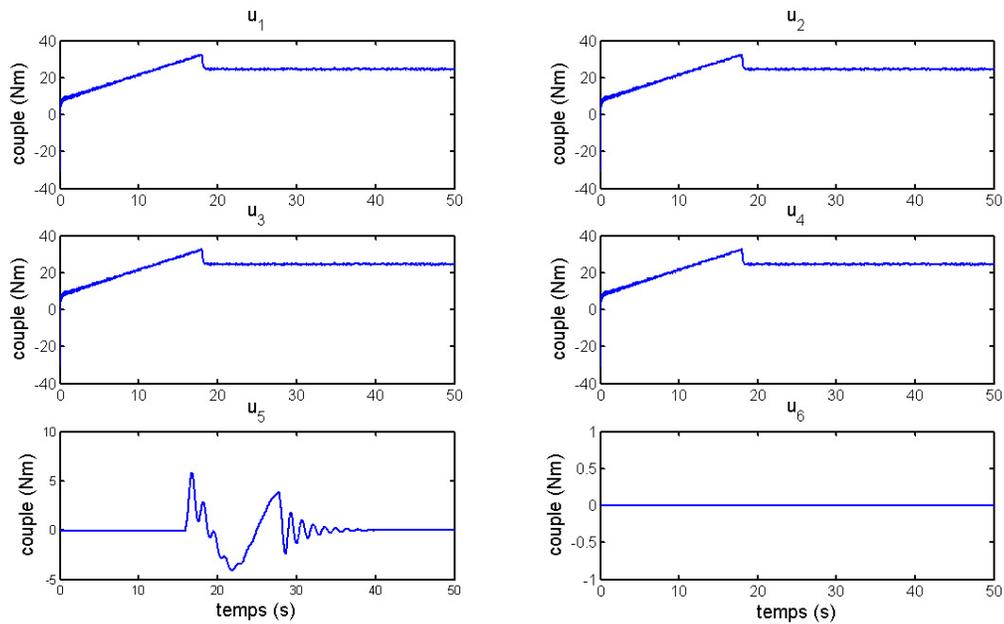


FIG. 4.7 – Les entrées de commande (sur les 4 moteurs de traction et les deux moteurs de direction) pour le système nominal

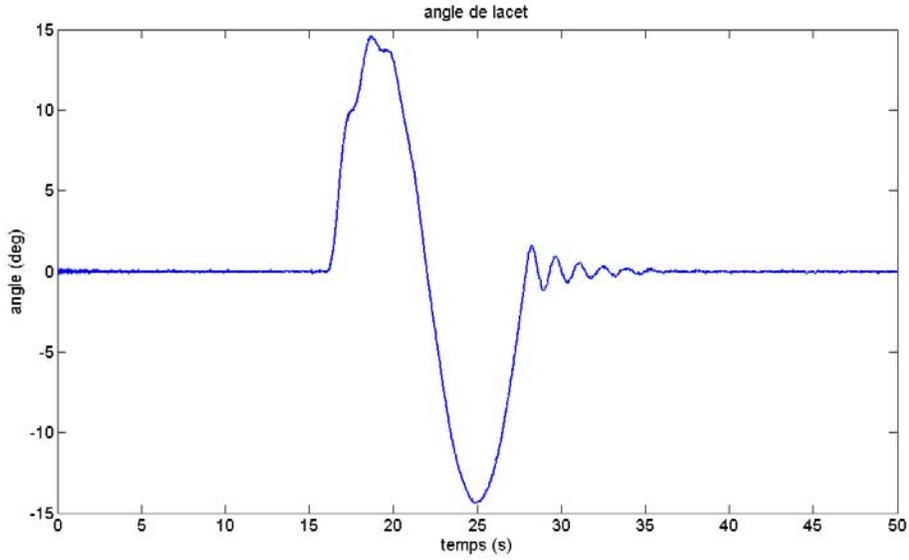


FIG. 4.8 – Evolution de l'angle de lacet pour le système nominal

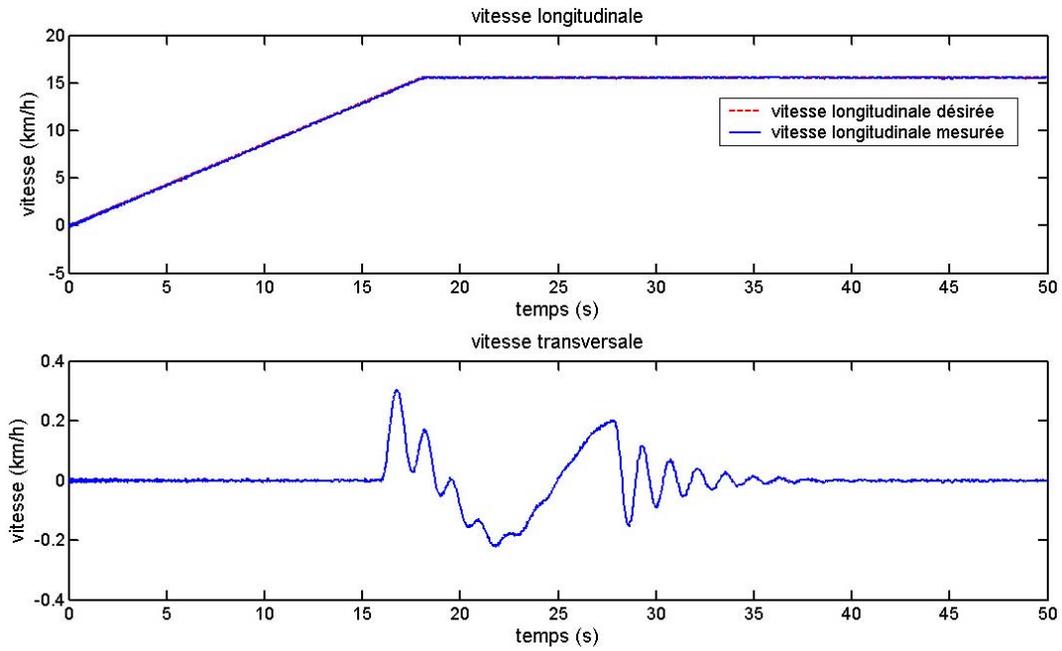


FIG. 4.9 – Evolution des vitesses longitudinale et transversale pour le système sans défaut

4.3 Fonctionnement du système suite à des défaillances d'actionneurs

Deux types de défauts seront simulés dans la suite :

- défaut sur le moteur de traction de la roue avant gauche (actionneur 2)
- défaut sur le moteur de direction des roues avant (actionneur 5)

A chaque apparition de pannes, le module de surveillance a en charge, lorsque cela est possible de détecter et localiser le défaut. Pour ce faire, ce module va prendre un certain temps (ici, selon le type de défaut, cette durée varie entre $0.05s$ et $0.2s$). Ainsi à l'occurrence d'un défaut, comme il a été dit au chapitre 1, trois intervalles de temps sont à considérer pour décrire le comportement du système :

- $t \in [0; t_f[$: le système est en fonctionnement normal et la loi de commande nominale est appliquée.
- $t \in [t_f; t_d[$: le système est en défaut mais le module de surveillance n'a pas encore détecté et localisé le défaut : la loi de commande n'a donc pas encore été reconfigurée (c'est donc toujours la loi de commande nominale)
- $t \in [t_d; \infty[$: le système est en défaut et le module de surveillance a détecté et localisé le défaut et le mécanisme de reconfiguration fait basculer la loi de commande du contrôleur nominal au contrôleur correspondant au défaut.

4.3.1 Défaillance sur le moteur de traction de la roue avant gauche

Une panne sur le moteur de traction de la roue avant gauche (actionneur 2) est simulée à l'instant $t_f = 21s$.

La figure 4.10 représente l'évolution des résidus normalisés r_1, r_2, \dots, r_6 sur l'intervalle de temps $[0, 50s]$.

En choisissant un seuil de détection (qui est le meilleur compromis trouvé entre le minimum de fausse alarme et le minimum de non-détection) à 0.3 pour les résidus r_1 à r_4 et à 0.1 pour les résidus r_5 et r_6 , le défaut est détecté à l'instant $t_d = 21.05s$. Cependant le résidu ne dépasse le seuil que sur une durée très courte. Cela signifie que le défaut a peu de conséquence sur le système. Il n'est donc peut-être pas utile de reconfigurer la commande. Regardons donc les suivis des consignes sans faire de reconfiguration. La figure 4.11 montre la trajectoire du véhicule qui est toujours proche de la consigne. Il en est de même pour la vitesse longitudinale (cf figure 4.12). Comme le suivi des consignes reste bon, nous ne reconfigurons pas le système suite à une défaillance d'un moteur de traction.

L'évolution des angles de braquage et vitesses de rotation des roues du véhicule (transformées

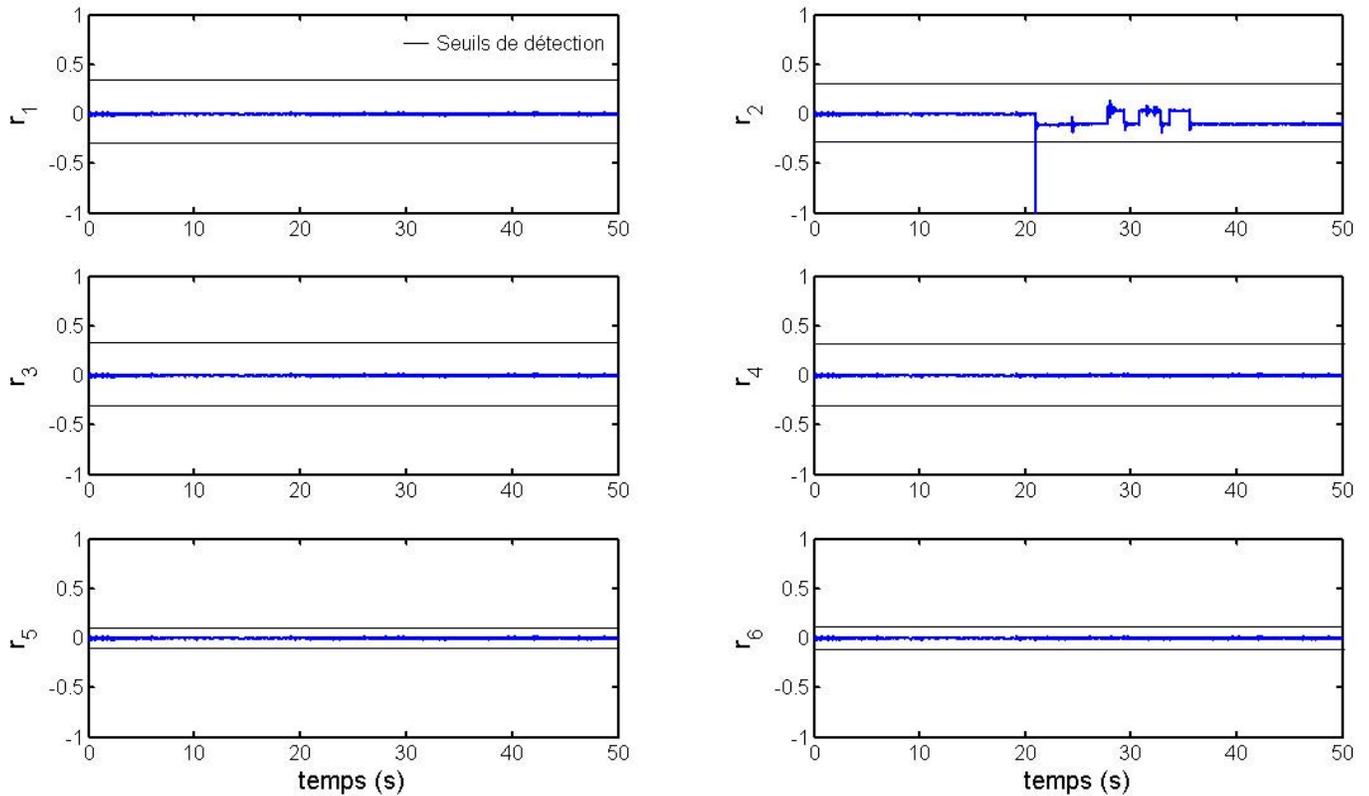


FIG. 4.10 – Evolution des résidus normalisés suite à la panne du moteur de traction de la roue AvD (actionneur 2) à $t = 21s$

en vitesse linéaire) est donnée sur la figure 4.13.

Une information également intéressante est l'évolution de l'angle de lacet au cours du temps (cf figure 4.14). Cette évolution nous montre que le véhicule continue à suivre sa trajectoire sans faire trop de zig zag.

En conclusion, nous voyons qu'une panne sur une des roues de traction, n'influe que très peu sur les capacités du système à suivre les objectifs nominaux. En effet, le véhicule dispose encore de trois moteurs de traction et du moteur de direction avant. Il est donc encore aisé de suivre les consignes.

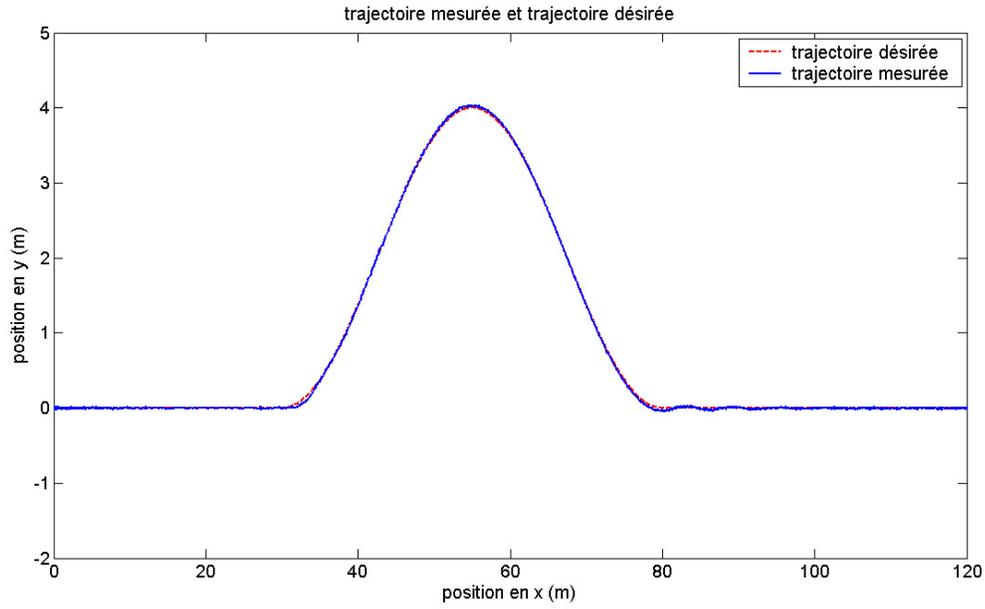


FIG. 4.11 – Trajectoire du véhicule avec une panne de l'actionneur 2 à $t=21s$

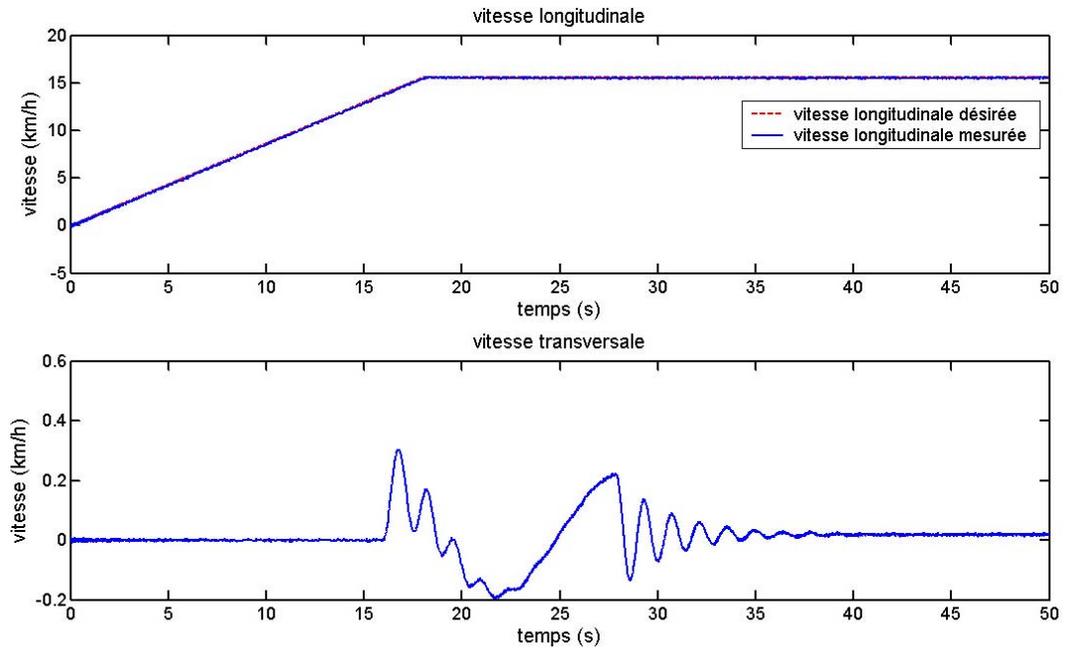


FIG. 4.12 – Evolution de la vitesse du véhicule suite à la panne de l'actionneur 2 à $t = 21s$

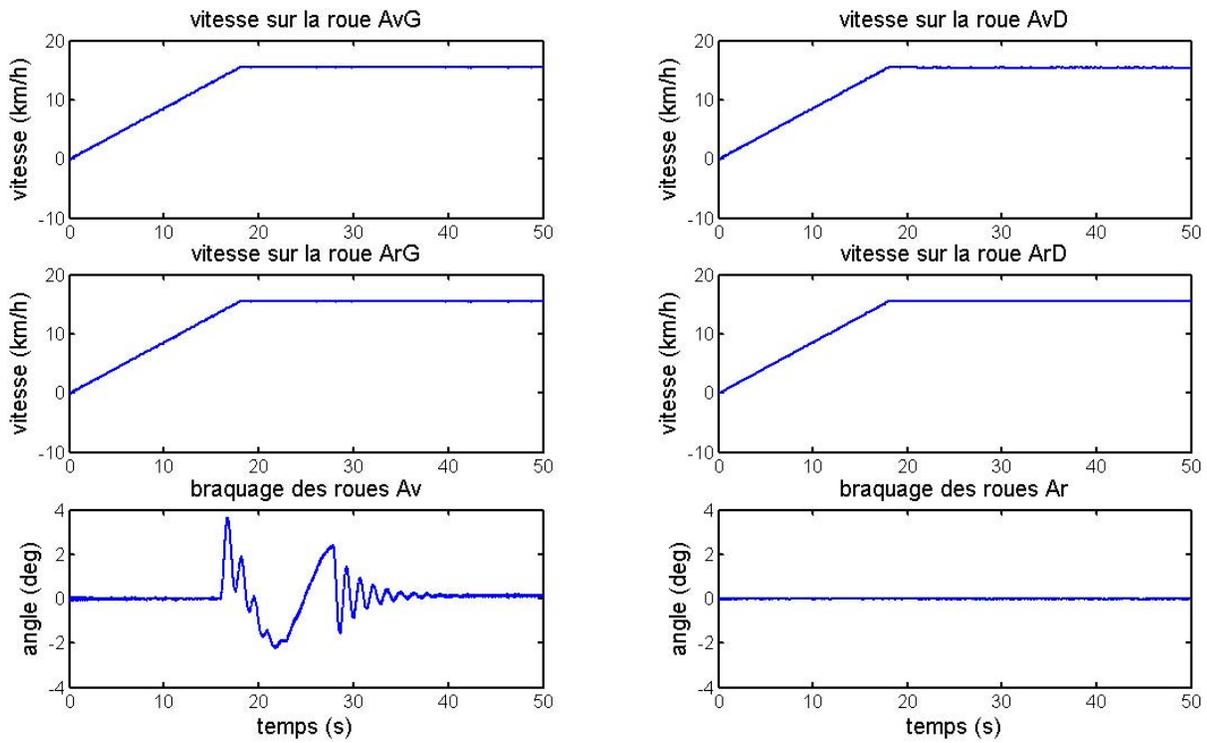


FIG. 4.13 – Evolution de la vitesse linéaire de chacune des roues et des angles de braquage suite à la panne de l'actionneur 2 à $t = 21s$

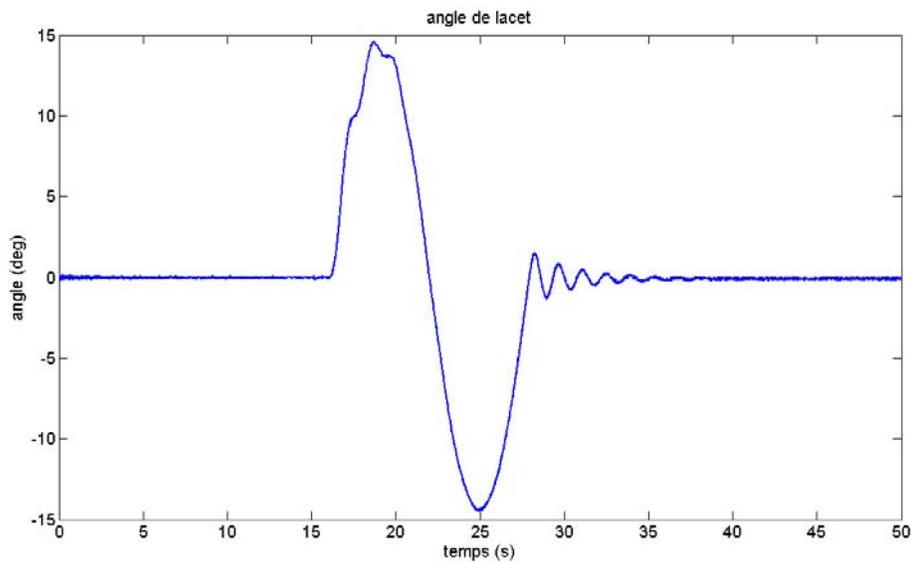


FIG. 4.14 – Evolution de l'angle de lacet suite à la panne de l'actionneur 2 à $t = 21s$

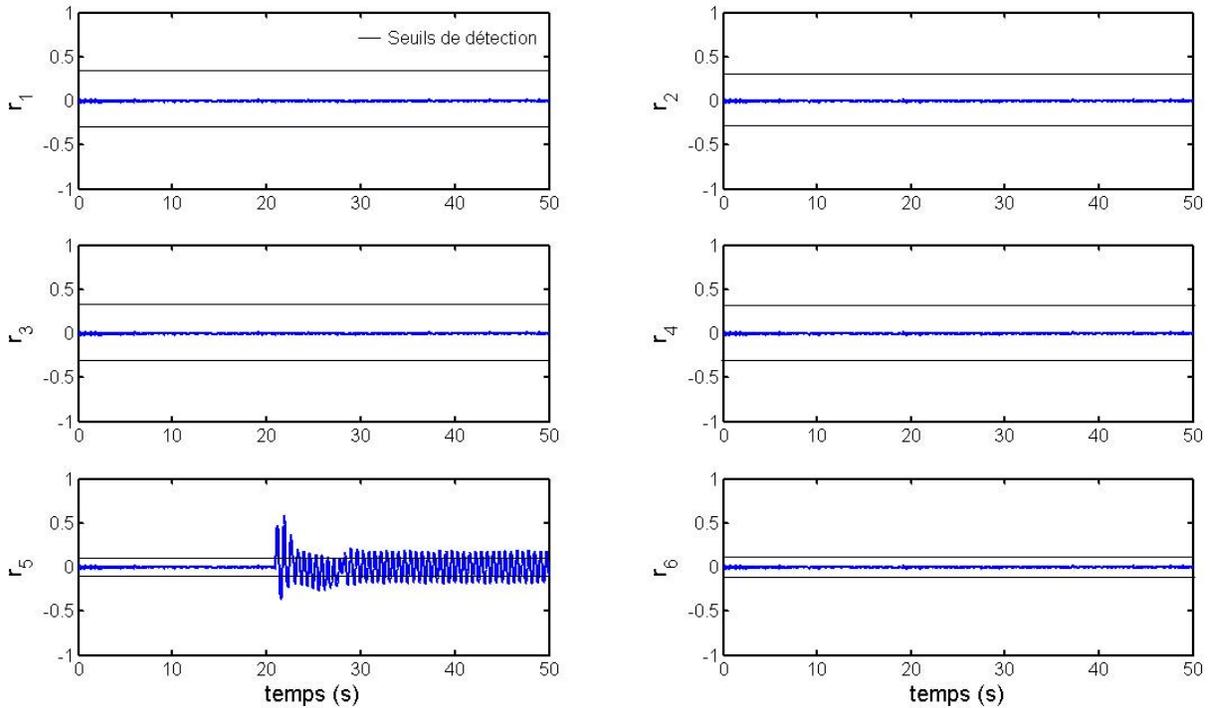


FIG. 4.15 – Evolution des résidus suite à la panne du moteur de direction avant (actionneur 5) à $t = 21s$

4.3.2 Défaillance sur le moteur de direction avant

Une panne sur le moteur de direction avant (actionneur 5) est simulée à l'instant $t_f = 21s$.

Il est à noter que l'instant d'apparition du défaut à $t = 21s$ est l'un des pires moments puisque le véhicule est en plein virage. La commande risque donc d'être fortement sollicitée.

La figure 4.15 montre comment évoluent les résidus avant et après le défaut. Nous pouvons constater que le défaut dépasse le seuil à $t = 21.2s$; instant où le défaut peut donc être détecté et localisé. A cet instant, le module de reconfiguration impose de faire basculer la loi de commande du mode nominal au mode correspondant à la panne de l'actionneur 5.

Lorsque le moteur de direction avant tombe en panne, les moteurs de traction sont alors fortement sollicités pour continuer à suivre la trajectoire. Nous montrerons donc la réaction du système face à ce défaut d'abord sans valeur limite pour les entrées de commande puis en considérant que les actionneurs de traction saturent à $\pm 120Nm$.

Simulation sans saturation imposée pour les entrées de commande

Nous avons conçu deux lois de commande pour ce type de défaut.

La figure 4.16 montre donc l'évolution de la trajectoire du véhicule :

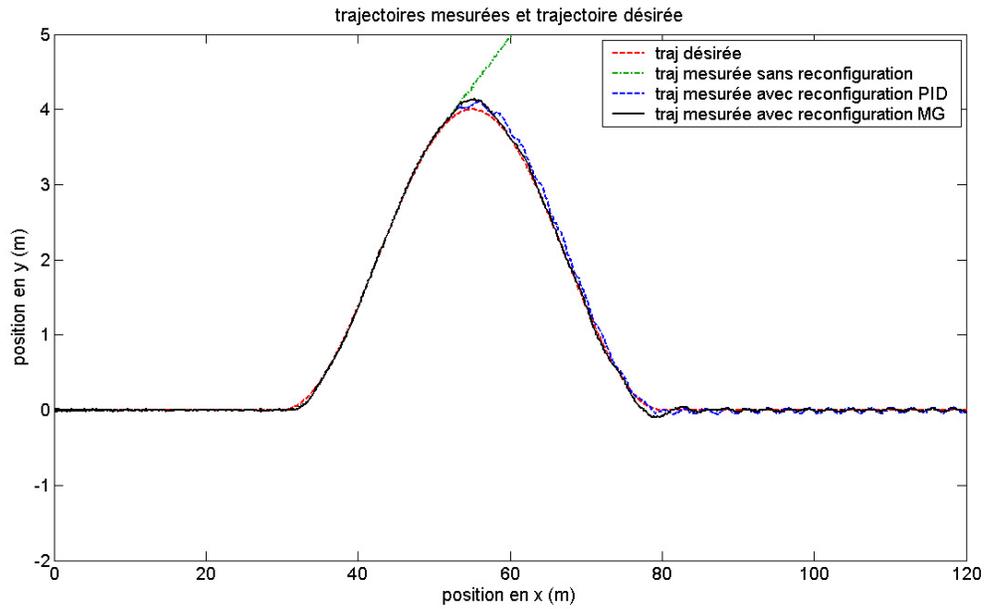


FIG. 4.16 – Trajectoire mesurée suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$, sans reconfiguration, avec reconfiguration à l’aide d’un PID et avec reconfiguration d’un contrôleur à mode glissant

- désirée
- pour le système sans reconfiguration
- pour le système reconfiguré à l’aide d’un PID
- pour le système reconfiguré à l’aide d’un contrôleur à mode glissant

Avec les 2 reconfigurations proposées, la trajectoire mesurée reste proche de la consigne.

Reconfiguration par la commande à mode glissant : L’inconvénient du contrôleur à mode glissant est que les entrées de commande basculent rapidement d’une valeur à la valeur opposée (cf figure 4.17). Ainsi, ce type de commande risque d’user rapidement les moteurs. Il faut donc voir cette reconfiguration comme une solution permettant au véhicule d’éviter une déviation de trajectoire causant un accident mais il est évident qu’un arrêt rapide pour réparation du véhicule sera nécessaire. La figure 4.17 montre également qu’à partir de l’instant de reconfiguration ($t_d = 21.2s$), la nouvelle loi de commande n’utilise plus cet actionneur et donc u_5 est mis à 0. Cette solution est d’autant plus temporaire que lorsque nous regardons l’évolution de l’angle de lacet (cf figure 4.18), la commande par mode glissant provoquera de faibles variations de cet angle rendant le trajet désagréable.

Au niveau de la vitesse longitudinale, elle suit toujours très bien la référence (cf figure 4.19).

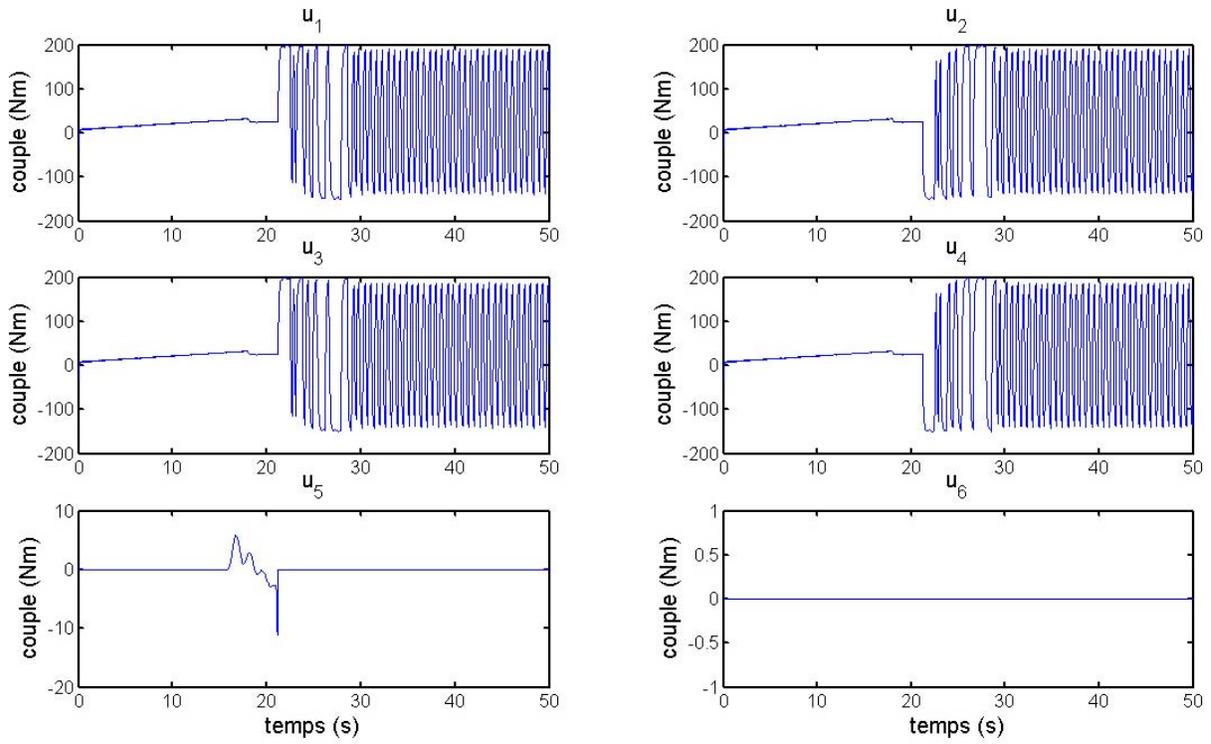


FIG. 4.17 – Evolution des entrées de commande avec une reconfiguration par la commande à mode glissant suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$

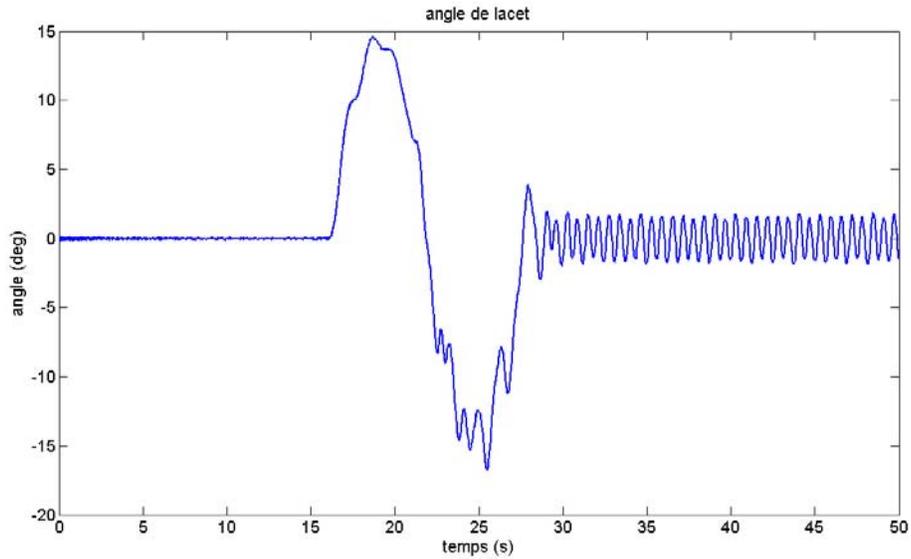


FIG. 4.18 – Evolution de l'angle de lacet avec une reconfiguration par la commande à mode glissant suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$

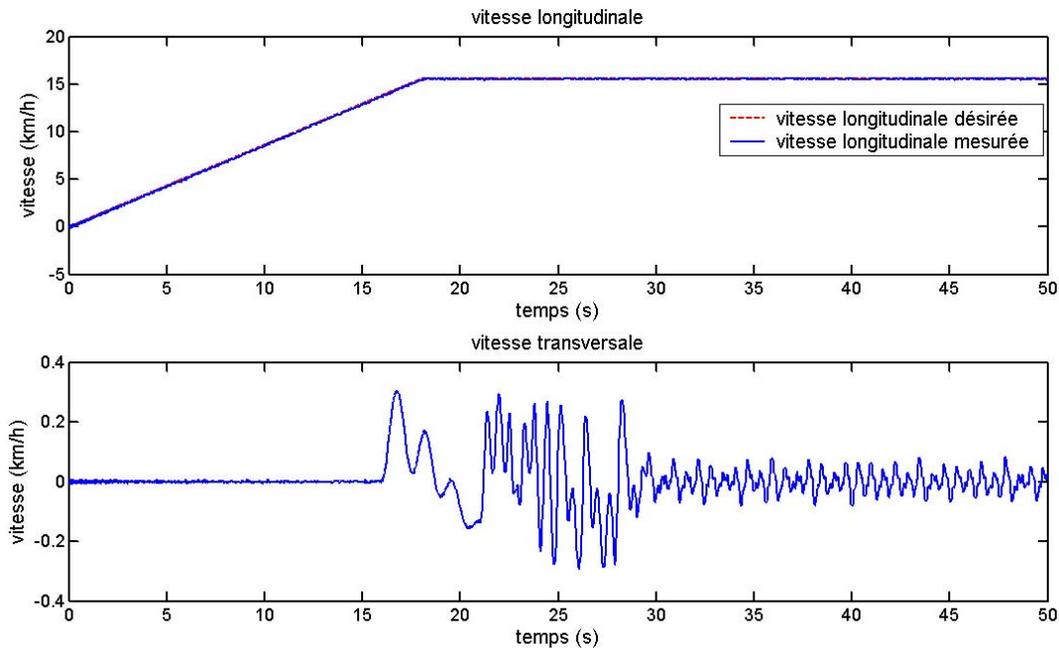


FIG. 4.19 – Evolution des vitesses longitudinale et transversale avec une reconfiguration par la commande à mode glissant suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$

Reconfiguration par un PID : En utilisant un PID pour la reconfiguration, le suivi de la vitesse longitudinale est aussi bon qu’avec la commande à mode glissant (cf figure 4.20). Au niveau, de l’angle de lacet (cf figure 4.21), ce dernier fluctue plus qu’avec la commande à mode glissant rendant le trajet encore plus désagréable. Les entrées de commande (cf figure 4.22) fluctuent également plus qu’avec la commande à mode glissant. Cette forte variation montre la difficulté qu’a le PID à maîtriser la non linéarité causée par la panne brutale de l’actionneur de direction.

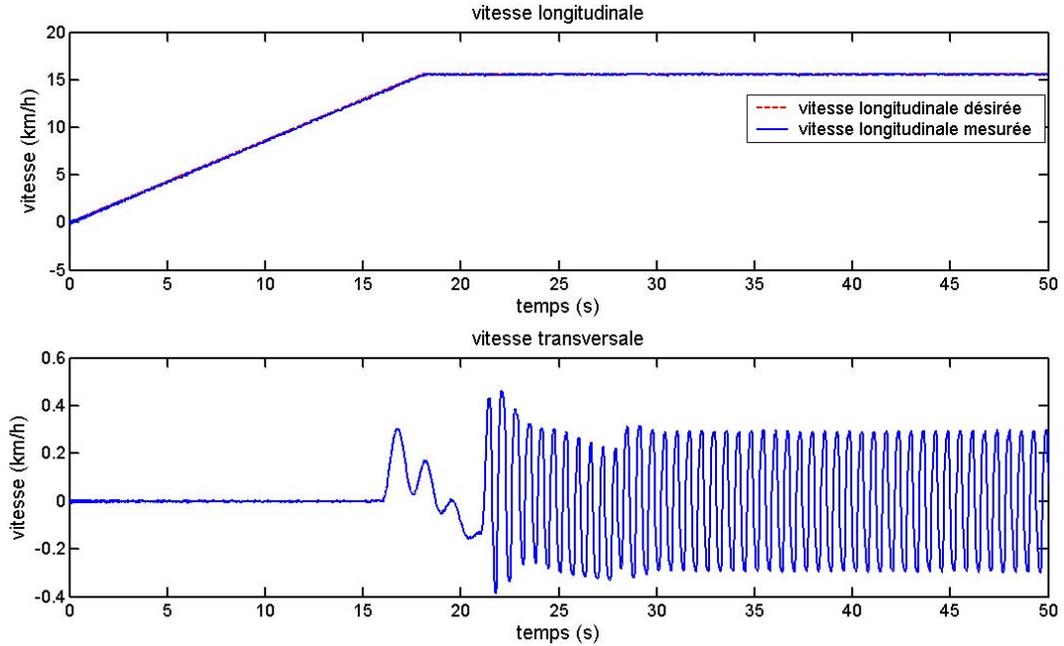


FIG. 4.20 – Evolution des vitesses longitudinale et transversale avec une reconfiguration par PID suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$

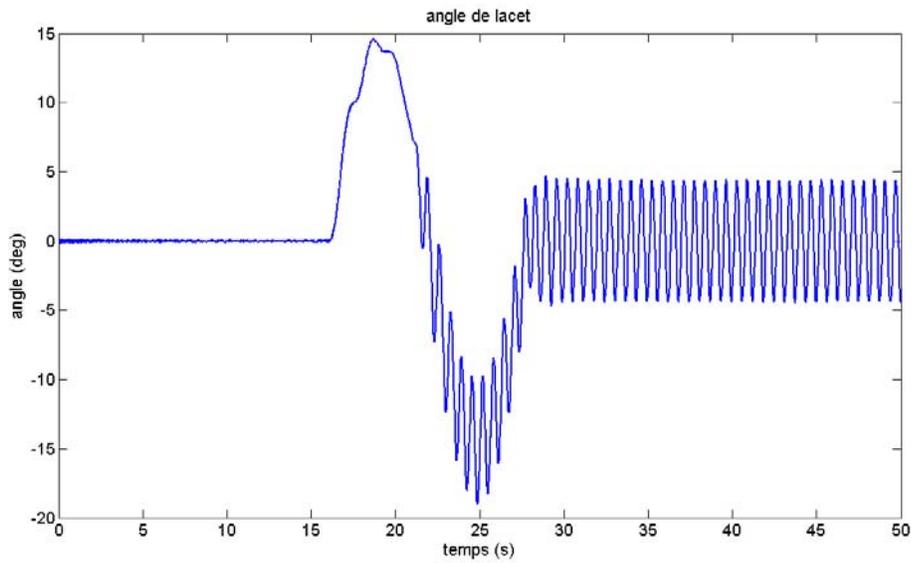


FIG. 4.21 – Evolution de l'angle de lacet avec une reconfiguration par PID suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$

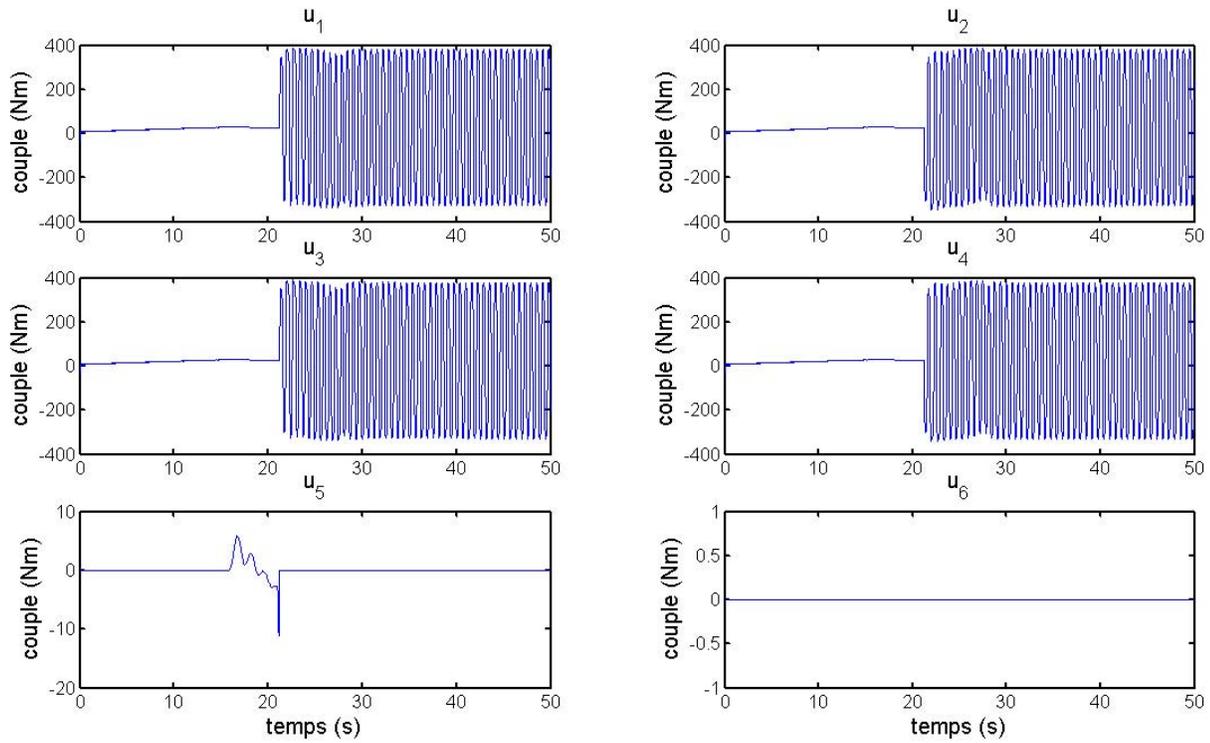


FIG. 4.22 – Evolution des entrées de commande avec une reconfiguration par PID suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21$ s

Comparaison des deux commandes Sans considérer de valeur de saturation pour les entrées de commande, c'est la commande à mode glissant qui semble la plus performante. En effet, pour un suivi de trajectoire de qualité assez similaire, l'angle de lacet ainsi que les entrées de commande fluctuent beaucoup plus en utilisant le PID. Sans prise en compte de la saturation, nous préfererons donc la commande à mode glissant.

Simulation avec une saturation imposée pour les entrées de commande

Les simulations précédentes ont été réalisées sans mettre une valeur limite aux entrées de commande. Dans la réalité, ces entrées ne peuvent pas fluctuer si fortement. Considérons maintenant que les actionneurs de traction saturent à $\pm 120 Nm$. La figure 4.23 montre alors que la trajectoire est plus difficile à suivre même si le véhicule reste toujours à moins de 25 cm de la consigne. Nous constatons également sur cette figure que le suivi est un peu plus performant avec la commande à mode glissant.

Au niveau des entrées de commande, celles-ci oscillent entre les deux valeurs limites pour le contrôle par mode glissant (figure 4.24) comme pour le contrôle par PID (figure 4.25). Elles sont donc moins sollicitées et leurs valeurs sont plus réalistes. Au niveau du suivi de la vitesse de consigne, la reconfiguration avec une commande à mode glissant (cf figure 4.26) est légèrement plus performante que la reconfiguration avec un PID (cf figure 4.27). Enfin la fluctuation de l'angle de lacet est limitée grâce à la prise en compte d'une saturation pour les entrées de commande (cf figure 4.28).

En conclusion, mis à part au niveau de la fluctuation de l'angle de lacet, la reconfiguration en utilisant une commande à mode glissant est encore légèrement plus performante que la reconfiguration par PID (notamment pour les suivis de trajectoire et de vitesse longitudinale)

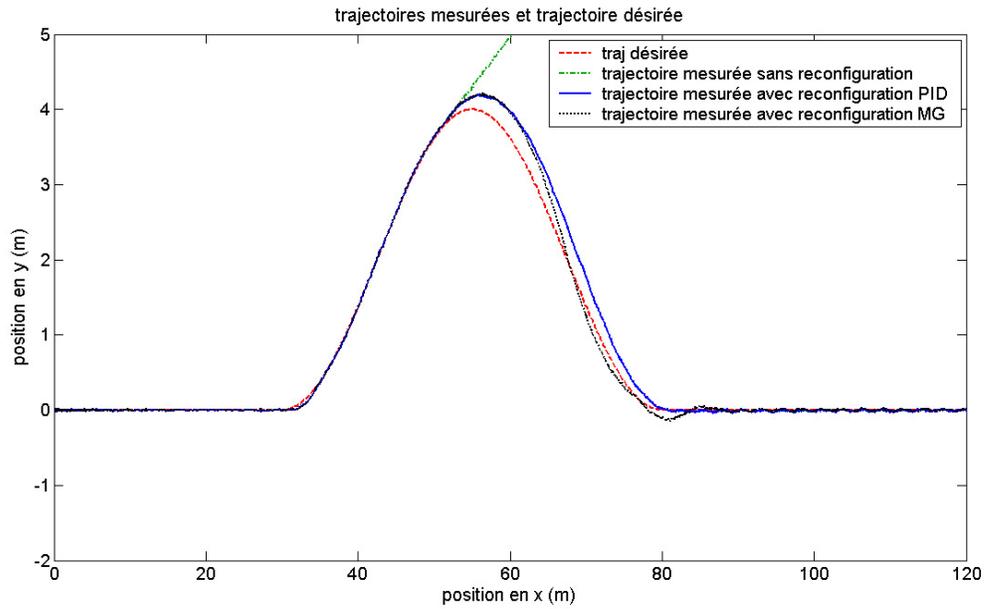


FIG. 4.23 – Trajectoire mesurée suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$, sans reconfiguration, avec reconfiguration à l’aide d’un PID et avec reconfiguration d’un contrôleur à mode glissant (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

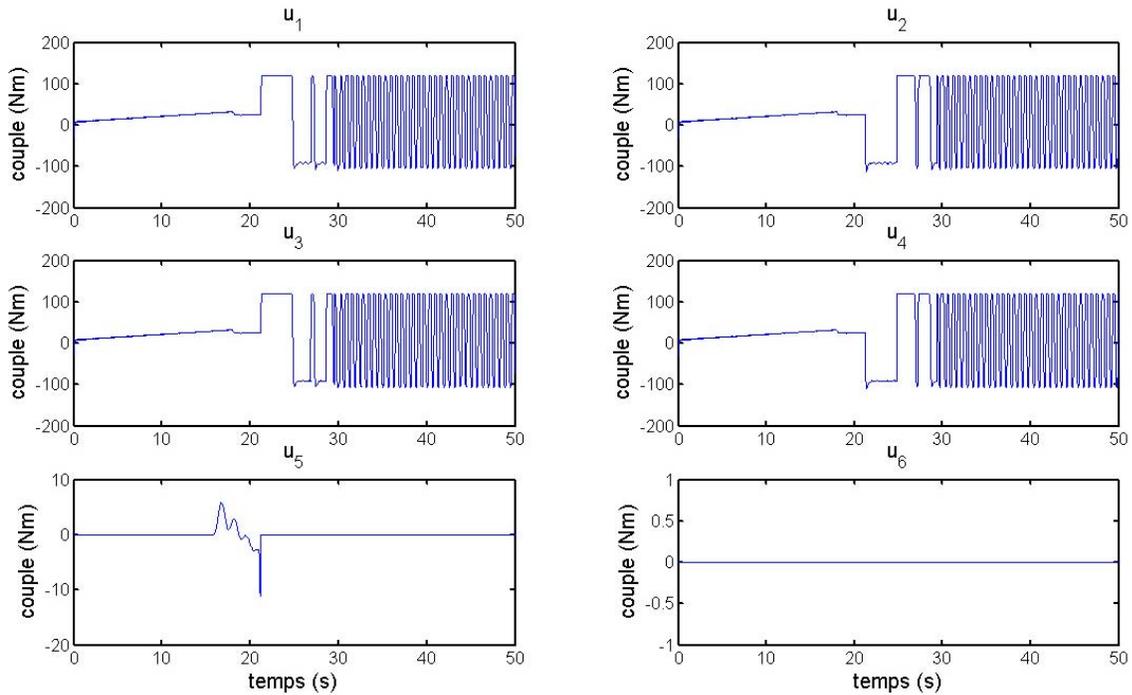


FIG. 4.24 – Evolution des entrées de commande avec une reconfiguration par la commande à mode glissant suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$ (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

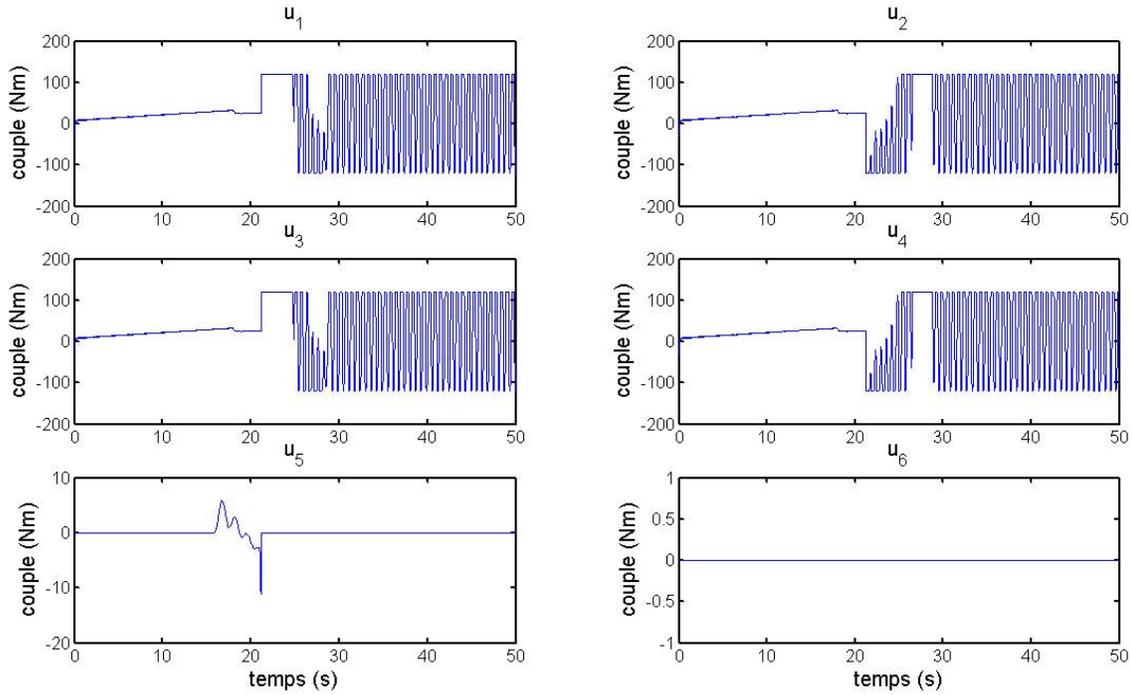


FIG. 4.25 – Evolution des entrées de commande avec une reconfiguration par PID suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$ (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

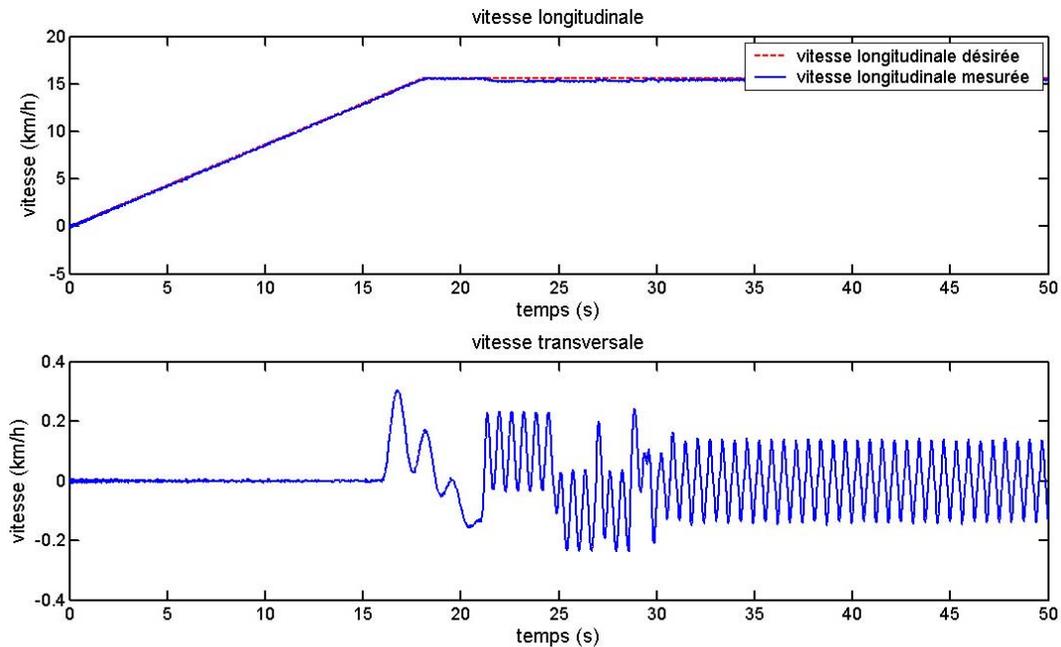


FIG. 4.26 – Evolution des vitesses longitudinale et transversale avec une reconfiguration par la commande à mode glissant suite à la panne de l'actionneur 5 à $t = 21s$ (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

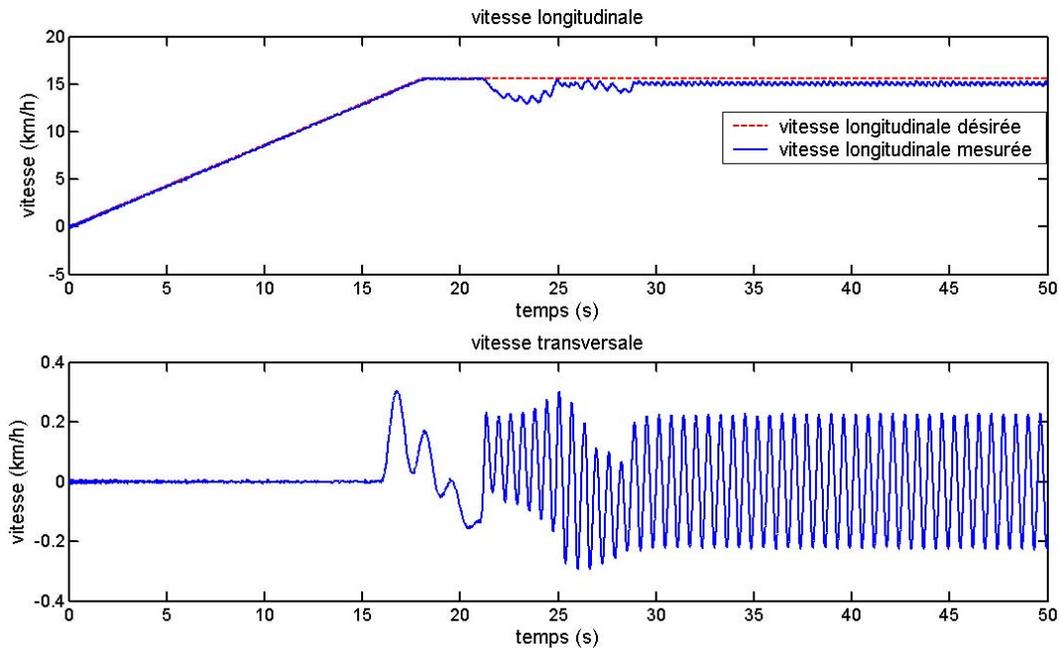


FIG. 4.27 – Evolution des vitesses longitudinale et transversale avec une reconfiguration par PID suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$ (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

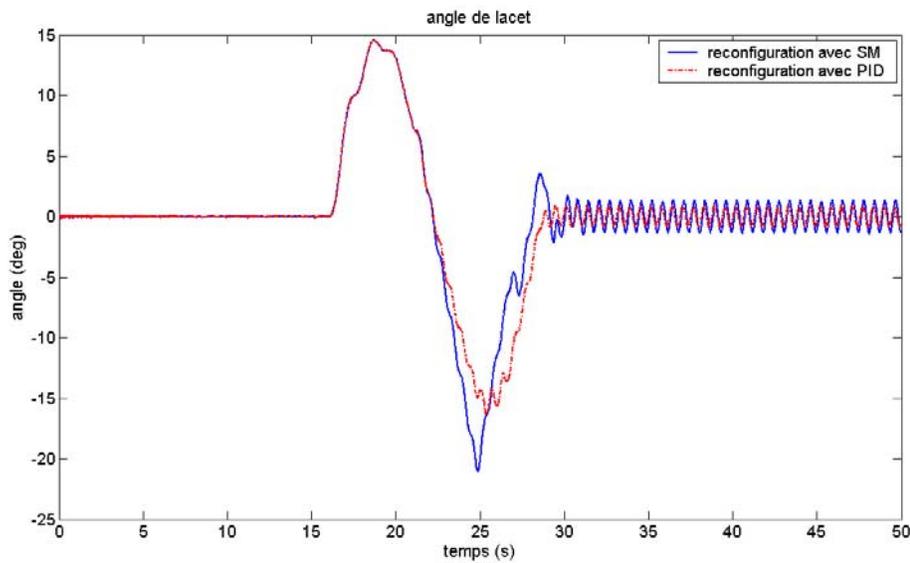


FIG. 4.28 – Evolution de l’angle de lacet avec une reconfiguration par la commande à mode glissant ou par PID suite à la panne de l’actionneur 5 à $t = 21s$ (en considérant des saturations pour les entrées de commande)

4.4 Conclusion

Les différentes simulations effectuées montrent que le système est capable de tolérer un certain nombre de défauts d'actionneurs en ce sens qu'il est toujours capable de suivre la trajectoire de référence à une vitesse de consigne. Le module de surveillance détecte et localise les défauts d'actionneur(s) en supposant que seul ce type de défaillance peut survenir et le mécanisme de reconfiguration bascule bien d'une loi de commande à une autre.

Un défaut sur les moteurs de traction est compensé par la commande nominale elle-même grâce à la "sur-instrumentation" au niveau des moteurs de traction. Par contre, les défauts sur les moteurs de direction avant sont bien plus handicapants pour le système. En effet, n'utilisant pas le moteur de direction arrière, il ne reste plus que les moteurs de traction pour faire tourner le véhicule et c'est donc par une vitesse différente des roues de gauche et de droite que le véhicule peut tourner. Les figures présentées dans le chapitre, montrent que, sans saturation, l'objectif de suivre une trajectoire à une vitesse de consigne est relativement bien rempli mais au prix d'une commande qui varie très souvent et d'un angle de lacet un peu trop fluctuant. À l'opposé, en imposant des saturations, le suivi de trajectoire est moins performant même si le véhicule reste tout de même à moins de 25 cm de la consigne en trajectoire. Par contre, l'ajout des saturations rend la simulation plus proche de la réalité et permet d'avoir moins de variation du lacet.

Dans des travaux ultérieurs, il serait intéressant de se focaliser sur les lois de commande afin d'améliorer ce suivi tolérant au défaut pour que, suite à des défaillances d'actionneur(s), l'angle de lacet fluctue moins intensément.

Conclusion générale et Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans l'optique de construire une commande tolérante active aux fautes d'actionneurs sur un système non linéaire affine en la commande.

Dans un premier temps, nous avons présenté les commandes tolérantes passive et active. Puis se focalisant sur la seconde, nous avons décrit la stratégie de reconfiguration qui consiste à faire basculer la loi de commande d'un mode nominal au mode défaillant approprié suite à la détection et à la localisation de la faute. Cette stratégie nécessite un module de surveillance pour la détection et la localisation et un module de reconfiguration disposant, pour le basculement, d'une banque de contrôleurs pour différents types de pannes envisageables.

Dans un deuxième temps, une méthode d'analyse a été développée pour connaître la capacité d'un système non linéaire à tolérer des défauts de composants. Celle-ci consiste à savoir si le système, ou une partie de celui-ci, est toujours estimable et accessible suite à la panne de composants. Si cette analyse, présentée pour des systèmes non linéaires, met en évidence la présence de redondances d'informations et d'entrées de commande, la mise en place d'une commande tolérante aux défauts de composants est envisageable.

L'introduction d'un nouvel indice, le RTBNE (Remaining Time Before Non Estimability), apporte un plus à la phase d'analyse puisqu'il donne, pour un ensemble de capteurs, l'information sur le temps dont nous disposons pour détecter et localiser des pannes éventuelles de capteurs et pour reconfigurer le système en étant sûr que l'état (ou une partie de l'état) reste estimable. Les liens que nous avons mis en évidence avec les degrés de redondance fort et faible permettent d'intégrer parfaitement cet indice à l'analyse des redondances du système.

Dans un dernier temps, la démarche exposée a été appliquée à un véhicule électrique expérimental, RobuCar. La mise en place d'une commande tolérante sur le véhicule s'est déroulée en plusieurs étapes :

– **modélisation de RobuCar et calcul d'une commande**

Après avoir présenté les six dynamiques du véhicule et la problématique du contact pneu-chaussée, une modélisation de RobuCar, prenant en compte les dynamiques longitudinale et transversale ainsi que le lacet, a été réalisée. Celle-ci a conduit à un modèle non linéaire affine en la commande comprenant treize états, neuf sorties de mesure et six entrées de commande. Les paramètres de ce modèle ont été identifiés, lors d'essais sur le véhicule, par une entreprise spécialiste de la conception et de la modélisation de véhicule, SERA-CD. Disposant d'un modèle du véhicule, une commande a été calculée afin de suivre des trajectoires de référence à une certaine vitesse.

– **analyse de la capacité du système à tolérer des défauts de composants**

L'analyse de la capacité du système à tolérer les défauts a mis en évidence des redondances d'informations et d'entrées de commande sur le système permettant d'envisager la mise en place d'une commande tolérante.

– **mise en place de la commande tolérante aux fautes d'actionneurs**

Le module de surveillance, basé sur les relations de redondances analytiques non linéaires, et le module de reconfiguration ont été mis en place sur RobuCar. Ainsi, suite à la simulation de défauts sur un moteur de traction et/ou sur un moteur de direction, le véhicule équipé de la commande tolérante aux défauts d'actionneurs reste capable de suivre la trajectoire imposée à la vitesse désirée.

Les contributions sur la mise en place d'une commande tolérante active aux défauts d'actionneurs appliquée à un véhicule sont très peu nombreuses. En effet, en prenant pour exemple la conférence IFAC SafeProcess (qui est une référence dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et du diagnostic), le tableau 4.1 montre le très faible nombre de papiers en AFTCS appliqué à un véhicule (bien inférieur par exemple au nombre de contributions en aéronautique).

	SafeProcess'00	SafeProcess'03	SafeProcess'06
Automobile	0	2	2
Aéronautique	4	2	10

TAB. 4.1 – Nombre de contributions à SafeProcess en AFTCS dans le domaine de l'automobile et de l'aéronautique

Nous avons donc voulu proposer, dans ce mémoire, la mise en place d'un AFTCS appliqué à un véhicule en passant par les étapes de modélisation, d'analyse, de conception des modules de surveillance et de reconfiguration et de simulation du fonctionnement du système global en cas de panne d'actionneurs.

En gardant les différentes étapes de cette démarche, des améliorations ponctuelles peuvent être envisagées. En particulier, le module de surveillance peut être remplacé par un autre module présentant des caractéristiques différentes en terme de temps de réponse et de précision. Dans la méthode, nous nous sommes limités à un sous-ensemble de pannes (pannes majeures d'actionneurs) : nous pouvons également considérer d'autres types de pannes. De la même manière, la commande proposée peut être modifiée et adaptée à d'autres performances désirées en suivi de trajectoire où à d'autres objectifs (par exemple, dans le cas d'un convoi, suivre le véhicule qui

précède).

L'intérêt de la reconfiguration proposée est de palier aux défaillances des actionneurs et de permettre au véhicule de poursuivre la tâche qu'il effectuait. Cette solution, préférable à un arrêt complet du véhicule sur place, conduit cependant à des basculements de commande qui créent des discontinuités dont l'importance n'est pas perceptible en simulation.

Des investigations, avec implantation de la méthode proposée sur le système, sont à entreprendre de manière à envisager, si nécessaire, un moyen d'adoucir ces discontinuités.

L'AFTCS n'a été fait que du point de vue des actionneurs. La suite logique consiste donc à étendre ce travail au niveau des pannes de capteurs et même du processus et des régulateurs.

Enfin, le bilan des défaillances devra conduire à une analyse permettant de déterminer dans quels cas utiliser la méthode proposée. En effet pour des défaillances mineures dont la nature est identifiable, il faudra prévoir une accommodation. Cette analyse pourrait éventuellement se faire à l'aide d'un indice que fournirait le module de surveillance par l'étude de la nature du défaut.

Bibliographie

- [Adjallah, 1993] K.H. ADJALLAH. *Contribution au diagnostic de systèmes par observateurs d'état*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), 1993.
- [Aitouche et Hoblos, 2002] A. AITOUCHE et G. HOBLOS. Fault Tolerance analysis of sensor system -application to a combat aircraft system. *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic*, 2002.
- [Aitouche et al., 2004] A. AITOUCHE, G. HOBLOS, et H. CHAFOUK. Détection de défauts de capteurs basée sur les indices de pseudo-observabilité, Instrumentation aspects fondamentaux. *Lavoisier 2000-2005, 402p.*, 2004.
- [Alloum, 1994] A. ALLOUM. *Modélisation et commande dynamique d'une automobile pour la sécurité de conduite*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne (UTC), 1994.
- [Attouche, 2002] S. ATTOUCHE. *Contribution de la théorie du diagnostic à l'amélioration de la sécurité et de la fiabilité des systèmes multi-capteurs : application à la conduite automatique de convois de camions poids lourds*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille I, 2002.
- [Bingulac et Kitolica, 1987] S. BINGULAC et R. KITOLICA. On admissibility of pseudo-observability and pseudo-controllability indices. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32 :920–922, 1987.
- [Blanke et al., 2003] M. BLANKE, M. KINNAERT, J. LUNZE, et M. STAROSWIECKI. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer, 2003.
- [Blanke et al., 2001] M. BLANKE, M. STAROSWIECKI, et N.E. WU. Concepts and methods in fault-tolerant control. *American Control Conference*, pages 2606–2620, 2001.
- [Bodson et Groszkiewicz, 1997] M. BODSON et J. GROSZKIEWICZ. Multivariable adaptative algorithms for reconfigurable flight control. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 5(2) :217–229, 1997.
- [Borne et al., 1990] P. BORNE, G. DAUPHIN-TANGUY, J.P. Richard and J.P. ROTELLA, et F. ZAMBETTAKIS. *Automatique : Commande et optimisation des processus*. 1990.

- [Boskovic et Mehra, 2002] J.D. BOSKOVIC et R.K. MEHRA. Multiple-model adaptative flight control scheme for accomodation of accomodation of actuator failures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 25(4) :712–724, 2002.
- [Boucher, 1997] R. BOUCHER. Sur la modélisation des pneumatiques dans les véhicules à roues. Mémoire de dea, Université de Technologie de Compiègne (UTC), 1997.
- [Boudaoud et Masson, 2000] N. BOUDAUD et M. H. MASSON. Diagnosis of transient states : A pattern recognition approach. *APII-JESA*, 34(5) :689–708, 2000.
- [Burdisso et Haftka, 1989] R.A. BURDISSO et R.T. HAFTKA. Optimal location of actuators for correcting distortions in large space structures. *AIAA Journal*, 27(10) :1406–1411, 1989.
- [Burdisso et Haftka, 1990] R.A. BURDISSO et R.T. HAFTKA. Statistical analysis of static shape control in large space structures. *AIAA Journal*, 28(8) :1504–1508, 1990.
- [Caccavale et Villani, 2003] F. CACCAVALE et L. VILLANI. *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems. Recent Advances*. springer, 2003.
- [Canudas *et al.*, 1995] C. CANUDAS, H. OLSSON, K.J.ASTRÖM, et P. LISCHINSKY. A new model for control of system with friction. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 40, 1995.
- [Canudas et Triotras, 1999] C. CANUDAS et P. TRIOTRAS. Dynamic tire friction models for vehicle traction. *38th IEE-CDC*, 1999.
- [Chen et Patton, 1999] J. CHEN et R.J. PATTON. *Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [Chen et Jiang, 2005] W. CHEN et J. JIANG. Fault-tolerant control against stuck actuator faults. *IEEE Proc. Control Theory and Applications*, 152(2) :138–146, 2005.
- [Chow, 1980] E.Y. CHOW. *Failure detection system design methodology*. Thèse de doctorat, Lab. Information and Deecision system, M.I.T., 1980.
- [Chow et Willsky, 1984] E.Y. CHOW et A.S. WILLISKY. Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. *IEEE trans. Automatic Control*, 29(7) :603–614, 1984.
- [Clark, 1978] R.N CLARK. Instrument fault detection. *IEEE trans. Aerospace & Electronic System*, EAS-14, pages 558–563, 1978.
- [Cocquempot, 1993] V. COCQUEMPOT. *Surveillance des processus industriels complexes - Génération et optimisation des relations de redondance analytiques*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille I, 1993.
- [Commault *et al.*, 2006] C. COMMAULT, J.M. DION, et S.Y. AGHA. Structural analysis for sensor location problem in fault detection and isolation. *6th IFAC Symp. on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes, SafeProcess'06*, 2006.
- [Courtine, 1997] S. COURTINE. *Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques*. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble (INPG), 1997.

-
- [Crowe *et al.*, 1983] C.M. CROWE, Y.A. Garcia CAMPOS, et A. HRYMAK. Reconciliation of process flow rates by matrix projection, Part 1 : the linear case. *AICHE journal*, 29(6), 1983.
- [DeCarlo *et al.*, 1988] R.A DECARLO, S.H. ZAK, et G.P. MATTHEWS. Variable structure control for nonlinear multivariable systems : A tutorial. *IEEE. Trans. AUT. Cont.*, 76(3) :212–232, 1988.
- [Delmaire *et al.*, 1994] G. DELMAIRE, J.P. CASSAR, et M. STAROSWIECKI. Comparison of identification and parity space approach for failure detection in single-input single output systems. *IEEE Conf. on Control Applications*, pages 865–870, 1994.
- [Delmaire *et al.*, 1995] G. DELMAIRE, J.P. CASSAR, et M. STAROSWIECKI. Comparison of generalized least square identification and parity space techniques for FDI purpose in SISO systems. *3rd European Control Conf.*, 3 :2011–2116, 1995.
- [Denoeux, 1997] T. DENOEU. Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification. *Pattern recognition*, 30(7) :1095–1107, 1997.
- [Deur, 2001] J. DEUR. Modeling and analysis of longitudinal tire dynamics based on the lugre friction model. *IFAC Workshop in Advances Automotive Control*, 2001.
- [Deutsch, 1970] C. DEUTSCH. *Dynamique des véhicules routiers : données de bases*. ONSER, 1970.
- [Ding *et al.*, 1999] X.S DING, E.L. DING, et T. JEINSCH. An approach to analysis and design of observer and parity relation based FDI systems. *14th IFAC World Congress*, P(7-041) :37–42, 1999.
- [Ding et Frank, 1991] X. DING et P.M. FRANK. Frequency domain approach and threshold selector for robust model-base fault detection and isolation. *IFAC Symp. on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes, SafeProcess'91*, 1 :307–312, 1991.
- [Ding et Frank, 1994] X. DING et P.M. FRANK. Comparison of observer-based fault detection approaches. *2nd IFAC Symp. on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes, SafeProcess'94*, 2 :556–561, 1994.
- [Drakunov, 1992] S.V. DRAKUNOV. Sliding mode observers based on equivalent control method. *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2368–2369, Decembre 1992.
- [Drakunov *et al.*, 1990] S.V. DRAKUNOV, D.B. IZOSIMOV, A.G LUK'YANOV, et V.A. UTKIN. The block control principle, Part II. *Automation and Remote Control*, 51(6) :737–746, 1990.
- [Dubuisson, 1990] B. DUBUISSON. *Diagnostic et Reconnaissance Des Formes*. Hermès, 1990.
- [Dugoff *et al.*, 1970] H. DUGOFF, P.S. FANCHER, et L. SEGEL. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance. *SAE transaction*, 3 :1219–1243, 1970.

- [Dumont *et al.*, 2004a] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, et M. BAYART. Fault tolerant analysis for multisensor nonlinear systems. Application to an autonomous vehicle. *Vehicle Power and Propulsion, VPP'04*, 2004.
- [Dumont *et al.*, 2004b] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, et M. BAYART. Nonlinear reachability analysis and fault tolerance control of autonomous vehicle. *Advanced Control and Diagnosis Workshop Conference, ACD'04*, 2004.
- [Dumont *et al.*, 2005a] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, et M. BAYART. Control reconfiguration after major actuator faults. Application to a thermal process. *1st Workshop on Networked Control Systems & Fault Tolerant Control, NECST'05*, 2005.
- [Dumont *et al.*, 2005b] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, et M. BAYART. Interval time for reconfiguration after sensor loss. *Mediterranean Conference on Control and Automation, IEEE MED'05*, 2005.
- [Dumont *et al.*, 2006a] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, et M. BAYART. Fault tolerant control on an electric vehicle. *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT'06*, 2006.
- [Dumont *et al.*, 2006b] P.E. DUMONT, A. AÏTOUCHE, R. MERZOUKI, et M. BAYART. Reconfiguration on electric vehicle after major actuator faults. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SafeProcess'06*, 2006.
- [Emani-Naeni, 1988] A.E.A. EMANI-NAENI. Effect of model uncertainty of failure detection : the threshold selector. *IEEE Transaction on Automatic Control*, AC-33 :1106–1115, 1988.
- [Fossard et Normand-Cyrot, 1995] A.J. FOSSARD et D. NORMAND-CYROT. *Systèmes non linéaires, volume 3 : commande*. Editions Masson, 1995.
- [Frank, 1987] P.M. FRANK. Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation - a survey. *Systems fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, 1 :35–98, 1987.
- [Frank, 1998] P.M. FRANK. The application of fuzzy logic to fault diagnosis and supervision. *LFA*, pages 59–87, 1998.
- [Frank et Wünnenberg, 1989] P.M. FRANK et J. WÜNNENBERG. *Robust diagnosis using unknown input observer schemes*. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, 1989.
- [Frei *et al.*, 1999] C.W. FREI, F.J. KRAUS, et M. BLANKE. Recoverability viewed as a system property. *European Control Conference, ECC'99*, 1999.
- [Garcia et Frank, 1997] E.A. GARCIA et P.M. FRANK. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis : a survey. *Control Eng. Practice*, 5(5) :663–670, 1997.
- [G.Baille *et al.*, 1999] G.BAILLE, P. GARNIER, H. MATHIEU, et PISSARD-GIBOLLET. Le Cycab de l'INRIA Rhône-Alpes. Rapport Technique, INRIA, Avril 1999.
- [Gentil, 1996] S. GENTIL. Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus. *Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble*, 1, 1996.

-
- [Gertler, 1991] J.J. GERTLER. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation - survey and synthesis. *1st IFAC Symp., SafeProcess'91*, pages 9–21, 1991.
- [Gertler, 1995] J. GERTLER. Diagnosing parametric faults : from parameter estimation to parity relations. *American Control Conference*, 1995.
- [Gertler, 1998] J. GERTLER. Fault detection and diagnosis in engineering systems, New York : Marcel Dekker. 1998.
- [Ghosh et Byrnes, 1983] B.K. GHOSH et C.I. BYRNES. Simultaneous stabilization and simultaneous pole-placement by non-switching dynamic compensation. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, (6) :735–741, 1983.
- [Gillespie, 1992] T. D. GILLESPIE. *Fundamentals of vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers (SAE), 1992.
- [Graebe et Salgado, 2001] G.C. Goodwin and S.F. GRAEBE et M.E. SALGADO. *Control System Design*. Prentice Hall, 2001.
- [Hermann et Krener, 1977] R. HERMANN et A.J. KRENER. Nonlinear controllability and observability. *IEEE Trans. Automatic Control*, (22) :728–740, 1977.
- [Himmelblau, 1978] D.M. HIMMELBLAU. Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes. *Amsterdam : Elsevier press*, 1978.
- [Hoblos, 2001] G. HOBLOS. *Contribution à l'analyse de la tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille I, 2001.
- [Horowitz et al., 1985] I. HOROWITZ, P.B. ARNOLD, et C.H. HOUPIS. YF-16-CCV Flight control system reconfiguration design using quantitative feedback theory. *Nat. Aero. & Electr. Dayton*, pages 578–585, 1985.
- [Howitt et Luus, 1991] G. HOWITT et R. LUUS. Simultaneous stabilization of linear single-input systems by linear state feedback control. *Int. J. Control*, 54 :1015–1030, 1991.
- [Huang et Stengel, 1990] C.Y. HUANG et R.F. STENGEL. Restructurable control using proportional-integral implicit model-following. *J. Guid, Cont. Dyn*, 13(2) :303–309, 1990.
- [Isermann, 1984] R. ISERMANN. Process fault detection based on modelling and estimation methods - a survey. *Automatica*, 20(4) :387–404, 1984.
- [Isermann, 1994] R. ISERMANN. Integration of fault detection and diagnosis methods. *2nd IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Industrial Processes, SafeProcess'94*, pages 597–612, 1994.
- [Isermann et Ballé, 1996] R. ISERMANN et P. BALLÉ. Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical process. *IFAC, 13th Triennial World Congress*, 7 :1–12, 1996.

- [Isermann et Fussel, 1999] R. ISERMANN et D. FUSSEL. Knowledge-based fault detection and diagnosis systems. *Tutorial Workshop*, 1999.
- [Isidori, 1995] A. ISIDORI. *Nonlinear Control Systems, 3ème édition*. Springer-Verlag, 1995.
- [Jiang et Chowdhury, 2005] B. JIANG et F.N. CHOWDHURY. Fault estimation and accomodation for linear MIMO discrete-time systems. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 13(3) :493–499, 2005.
- [Kailath, 1980] T. KAILATH. *Linear Systems*. Prentice-Hall, 1980.
- [Khalil, 2002] H.K. KHALIL. *Nonlinear Systems, 3ème édition*. Prentice Hall, 2002.
- [Kwakernaak, 1993] H. KWAKERNAAK. Robust control and h_∞ -optimisation : Tutorial paper. *Automatica*, 29 :255–273, 1993.
- [Landau *et al.*, 1993] I.D. LANDAU, C. CYROT, et D. REY. Robust control design using the combined pole placement/sensibility function shaping method. *European Control Conférence ECC'97*, pages 130–170, 1993.
- [Landau *et al.*, 1997] I.D. LANDAU, R. LOZANO, et M. M'SAAD. Adaptative control. 1997.
- [Leuschen, 2001] M.L. LEUSCHEN. *Derivation and Application of Nonlinear Analytical Redundancy Techniques with Applications to Robotics*. Thèse de doctorat, RICE University, 2001.
- [Lou *et al.*, 1986] X.C. LOU, A.S. WILLSKY, et G.C. VERGHESE. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems. *Automatica*, 22(3) :333–344, 1986.
- [Luenberger, 1971] D.G. LUENBERGER. An introduction to observers. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 16(6) :596–602, 1971.
- [Magni et Manouan, 1994] J.F. MAGNI et A. MANOUAN. Robust flight control design by eigenstructure assignment. *IFAC Symposium on Robust Control Design*, 1994.
- [Mah *et al.*, 1976] R.S.H MAH, G.M. STANLEY, et D.M. DOWNING. Reconciliation and rectification of process flow and inventory data. *Industrial Engineering Process Design Development*, 15(1), 1976.
- [Mahmoud *et al.*, 2003] M. MAHMOUD, J. JIANG, et Y.M. ZHANG. *Active Fault Tolerant Control Systems : Stochastic Analysis and Synthesis - Lecture Notes in Control and Information Sciences*, volume 287. Springer, 2003.
- [Mamdani, 1977] E. MAMDANI. application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic system. *Fuzzy sets and systems*, 26 :1182–1191, 1977.
- [Marquez, 2003] H.J. MARQUEZ. *Nonlinear Control Systems*. Wiley-Interscience, 2003.
- [Massoumnia, 1986] M.A. MASSOUMNIA. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 31(9), 1986.

-
- [Maurice et Pacejka, 1997] J.P. MAURICE et H.B. PACEJKA. Relaxation length behavior of tyres. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 27 :339–342, 1997.
- [Merzouki, 2002] R. MERZOUKI. *Méthodes d'estimation et compensations robustes et adaptatives*. Thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, 2002.
- [Michelin, 2001] MICHELIN. *Le pneu, l'adhérence*. Société de Technologie Michelin, 2001.
- [Morse et Ossman, 1990] W.D. MORSE et K.A. OSSMAN. Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16. *J. Guid., Cont. Dyn.*, 13(6) :969–976, 1990.
- [M'Saad et Chebassier, 1996] M. M'SAAD et J. CHEBASSIER. Commande prédictive des systèmes, commande optimale : conception optimisée des systèmes. *Diderot*, 1996.
- [Murad *et al.*, 1996] G.A. MURAD, I. POSTLETHWAITE, et D.W. GU. A robust design approach to integrated controls and diagnostics. *13th IFAC World Congress*, page 199, 1996.
- [Musgrave *et al.*, 1997] J.L. MUSGRAVE, T.H. GUO, E. WONG, et A. DUYAR. Real-time accommodation of actuator faults on a reusable rocket engine. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 5(1) :100–109, 1997.
- [Nijmeijer et der Schaft, 1990] H. NIJMEIJER et I. Van der SCHAFT. *Nonlinear Dynamical Control Systems*. Springer-Verlag, 1990.
- [Noura *et al.*, 1993] H. NOURA, C. FONTE, et M. ROBERT. Fault tolerant control using simultaneous stabilization. *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic*, 1993.
- [Noura *et al.*, 2000] H. NOURA, D. SAUTER, F. HAMELIN, et D. THEILLIOL. Fault tolerant control in dynamic systems : Application to a winding machine. *IEEE Control System Magazine*, 20(1) :33–49, 2000.
- [Ochi, 1993] Y. OCHI. Application of feedback linearisation method in a digital restructurable flight control system. *J. Guid., Cont. Dyn.*, 16(1) :111–117, 1993.
- [Ochi et Kanai, 1991] Y. OCHI et K. KANAI. Design of restructurable flight control systems using feedback linearisation. *J. Guid., Cont. Dyn.*, 14(5) :903–911, 1991.
- [Omerdic et Roberts, 2003] E. OMERDIC et G.N. ROBERTS. Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles. *Control Engineering Practice*, 12(12) :1575–1598, 2003.
- [Oustaloup, 1993] A. OUSTALOUP. The great principles of CRONE Control. *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic*, 1993.
- [Pacejka, 1996] H.B. PACEJKA. The tyre as a vehicle component. *26th FISITA congress'96 : Engineering challenge human friendly vehicles*, 1996.
- [Pacejka et Besselink, 1997] H.B. PACEJKA et I.J.M. BESSELINK. Magic formula tyre with transient properties. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 27 :234–249, 1997.

- [Pacejka et Sharp, 1991] H.B. PACEJKA et R.S. SHARP. Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions : A review of modelling aspects. *Vehicle System Dynamics*, 20 :121–176, 1991.
- [Patton, 1997] R.J. PATTON. Fault tolerant control, the 1997 situation. *IFAC Safeprocess'97*, 2 :1033–1055, 1997.
- [Patton et Chen, 1991a] R.J. PATTON et J. CHEN. A re-examination of the relationship between parity space and observers-based approaches in fault diagnosis. *Revue Européenne Diagnostic et Sécurité de Fonctionnement*, 1 :183–200, 1991.
- [Patton et Chen, 1991b] R.J. PATTON et J. CHEN. A review of parity space approaches to fault diagnosis. *IFAC/IMACS Symp. SafeProcess'91*, 1 :238–255, 1991.
- [Patton et al., 1989] R.J. PATTON, P.M. FRANK, et R.N. CLARK. *Fault diagnosis in dynamic systems - Theory and applications*. Prentice Hall, 1989.
- [Petersen, 1987] I.R. PETERSEN. A procedure for simultaneously stabilizing a collection of single input linear systems using non-linear state feedback control. *Automatica*, 23(1) :33–40, 1987.
- [Potter et Suman, 1977] J.E. POTTER et M.C. SUMAN. Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments. *Electronic flight control systems, Agardograph 224*, pages 2115–2121, 1977.
- [Ragot et Maquin, 1996] J. RAGOT et D. MAQUIN. Techniques récentes de diagnostic de systèmes et rôle de l'instrumentation. *Congrès de la Société de l'industrie Minérale*, 1996.
- [Rao et al., 1991] S.S. RAO, T.S. PAN, et V.B. VENKAYYA. Optimal placement of actuators in actively controlled structures using genetic algorithms. *AIAA Journal*, 29 :942–943, 1991.
- [Richards, 2005] N. RICHARDS. Retrofit FDI and adaptative outer loop control for inflight failure accomodation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, pages 849–863, 2005.
- [Riess, 2000] M. RIESS. Qualification d'un télémètre à balayage laser pour la robotique mobile : Intégration et expérimentations. Mémoire de diplôme d'ingénieur, CNAM, 2000.
- [Saeks et Murray, 1982] R. SAEKS et B. MURRAY. Fractional representation, algebraic geometry, and the simultaneous stabilization problem. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, (4) :895–903, 1982.
- [Sauter et al., 2006] D. SAUTER, T. BOUKHOBZA, et F. HAMELIN. Decentralized and autonomous design for fdi/ftc of networked control systems. *6th IFAC Symp. on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes, SafeProcess'06*, 2006.
- [Sauter et al., 1996] D. SAUTER, F. HAMELIN, M.A. GHETIE, et C. FONTE. Adaptative residual evaluation of model uncertainties : some methods and results. *Engineering Simulation*, pages 773–788, 1996.

-
- [Schrick, 1993] D. Van SCHRICK. Estimator schemes for instrument fault detection and isolation. *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic*, pages 406–411, 1993.
- [Shin *et al.*, 2004] J.Y. SHIN, N.E. WU, et C. BELCASTRO. Adaptative linear parameter varying control synthesis for actuator failure. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 27(4) :787–794, 2004.
- [Simani *et al.*, 2003] S. SIMANI, C. FANTUZZI, et R.J. PATTON. *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems using Identification Techniques*. Springer, 2003.
- [Souleiman *et al.*, 2000] I. SOULEIMAN, A. GLUMINEAU, et C.H. MOOG. Equivalence and observers for state affine systems. *Mathematical Theory of Networks and Systems*, 2000.
- [Staroswiecki *et al.*, 1993] M. STAROSWIECKI, J.P. CASSAR, et V. COCQUEMPOT. Generation of optimal structured residuals in the parity space. *12th IFAC World Congress*, 5 :535–542, 1993.
- [Staroswiecki et Gehin, 2001] M. STAROSWIECKI et A.L. GEHIN. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25 :1–11, 2001.
- [Staroswiecki *et al.*, 1999] M. STAROSWIECKI, G. HOBLOS, et A. AITOUICHE. Fault tolerant analysis of sensor systems. *38th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3581–3586, 1999.
- [Staroswiecki *et al.*, 2004] M. STAROSWIECKI, G. HOBLOS, et A. AITOUICHE. Sensor network design for fault tolerant estimation. *International Journal of adaptative Control and signal processing*, 18 :55–72, 2004.
- [Szederkenyi *et al.*, 2002] G. SZEDERKENYI, N.R. KRISTENSEN, K.M. HANGOS, et S.B. JORGENSEN. Nonlinear analysis and control of a continuous fermentation process. *Computers and Chemical Engineering*, 2002.
- [Takagi et Sugeno, 1985] T. TAKAGI et M. SUGENO. Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 15(1) :116–132, 1985.
- [Thelliol *et al.*, 2003] D. THELLIOL, D. SAUTER, et J.C. PONSART. A multiple model based approach for fault tolerant control in nonlinear systems. *5th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 151–156, 2003.
- [Toscano, 2005] R. TOSCANO. *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : Modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état, diagnostic*. Ellipse édition Marketing, 2005.
- [Utkin, 1978] V.I. UTKIN. Sliding modes and their application in variable structure systems. *MIR*, 1978.
- [Utkin, 1983] V.I. UTKIN. A method of separation of motion for designing a state identifier. *Problems of Control of multivariable Systems*, 1983.

- [Vaclavek, 1969] V. VACLAVEK. Studies on system engineering iii. optimal choice of the balance measurements in complicated chemical engineering systems. *Chemical Engineering Systems*, 24 :947–955, 1969.
- [Venkatasubramanian *et al.*, 2003] V. VENKATASUBRAMANIAN, R. RENGASWAMY, K. YIN, et S. KAVURI. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. *Computer and Chemical Engineering*, 2003.
- [Vidyasagar et Viswanadham, 1982] M. VIDYASAGAR et K. VISWANADHAM. Algebraic design techniques for reliable stabilization. *IEEE Trans. Automat. contr.*, (5) :1085–1095, 1982.
- [Viswanathan *et al.*, 1984] C.N. VISWANATHAN, R.W. LONGMAN, et P.W. LIKINS. A degree of controllability definition : fundamental concepts and applications to modal systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, pages 222–230, 1984.
- [Walcott *et al.*, 1987] B.L. WALCOTT, M.J. CORLESS, et S.H. ZAK. Comparative study of nonlinear state observation techniques. *Int. J. Control*, 45(6) :2109–2132, 1987.
- [Walcott et Zak, 1986] B.L. WALCOTT et S.H. ZAK. Observation of dynamical systems in the presence of bounded nonlinearities-uncertainties. *Proceedings of 25th CDC*, pages 961–966, 1986.
- [Walker et Gai, 1979] B.K. WALKER et E. GAI. Fault detection threshold determination techniques using Markov theory. *Int. J. Guidance, Control and Dynamics*, 2(4) :313–319, 1979.
- [Weiss, 1988] J.L. WEISS. Threshold computations for detection of failures in siso systems with transfert function errors. *American Control Conference*, pages 2213–2218, 1988.
- [Willsky, 1976] A.S. WILLSKY. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica* 12, pages 601–611, 1976.
- [Willsky et Jones, 1976] A.S. WILLSKY et H.L. JONES. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, pages 108–112, 1976.
- [Wu, 1998] H.S. WU. Sufficient conditions for robust stability of LQG optimal control systems including delayed perturbations. A comparison of characteristic locus and h_∞ design methods for VSTOL flight control system design. *Journal of optimization theory and applications*, 96(2) :437–451, 1998.
- [Yen et Ho, 2003] G.G. YEN et L.W. HO. Online multiple-model-based fault diagnosis and accommodation. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 50(2) :296–312, 2003.
- [Youla *et al.*, 1974] D.C. YOULA, J.J. BONGIORNO, et C.N. LU. Single-loop feedback-stabilization of linear multivariable dynamical plants. *Automatica*, 10 :159–173, 1974.
- [Zhang et Jiang, 2001] Y.M. ZHANG et J. JIANG. Integrated design of reconfigurable fault-tolerant control systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24(1) :133–136, 2001.

-
- [Zhang et Jiang, 2002] Y.M. ZHANG et J. JIANG. An active fault-tolerant control system against partial actuator failures. *IEEE Control Theory and Application*, 149(1) :95–104, 2002.
- [Zhang et Jiang, 2003a] Y.M. ZHANG et J. JIANG. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *5th IFAC Symposium on fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 265–276, 2003.
- [Zhang et Jiang, 2003b] Y.M. ZHANG et J. JIANG. Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 39(3) :838–848, 2003.
- [Zhang et Jiang, 2006] Y.M. ZHANG et J. JIANG. Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault-tolerant control systems. *6th IFAC Symp. on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes, SafeProcess'06*, 2006.

Annexe A

Description de RoBucar

Cette annexe est consacré à la description de RobuCar avec dans un premier temps, une présentation générale du véhicule, dans un second et troisième temps, la description des capteurs et actionneurs dont dispose RobuCar et enfin par un aperçu des modes de fonctionnement du véhicule.

Le Robucar (Fig. A.1) est un prototype de véhicule électrique servant de plate-forme expérimentale pour des études d'automatique menées au laboratoire LAGIS de Lille et dans le cadre du pôle en Sciences et Technologies pour la Sécurité des Transports (ST2).



FIG. A.1 – Photo de RoBuCar (vue de face)

La représentation schématique de la Fig. A.2 permet de décrire les différents éléments du véhicule.

Ce véhicule est équipé de huit batteries qui lui confèrent une autonomie de deux heures à vitesse maximale (20 km/h).

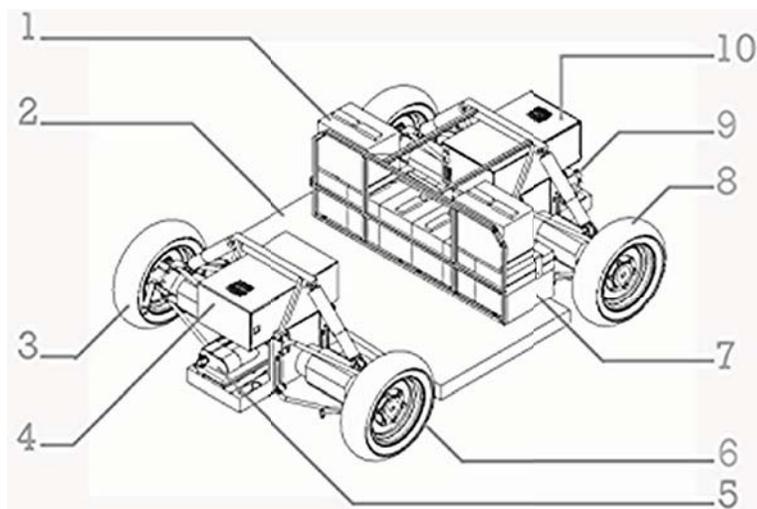


FIG. A.2 – Vue éclatée de Robucar

(1 : Batteries de 12 volts 60Ah, 2 : La châssis, 3 : Roue avant droite, 4 : Panneau de contrôle avant, 5 : Vérin électrique de direction avant, 6 : Roue avant gauche, 7 : Batteries, 8 : Roue arrière gauche, 9 : Vérin électrique de direction arrière, 10 : panneau de contrôle arrière)

Le Robucar possède dix moteurs, commandés et contrôlés par une architecture matérielle distribuée (fig A.3).

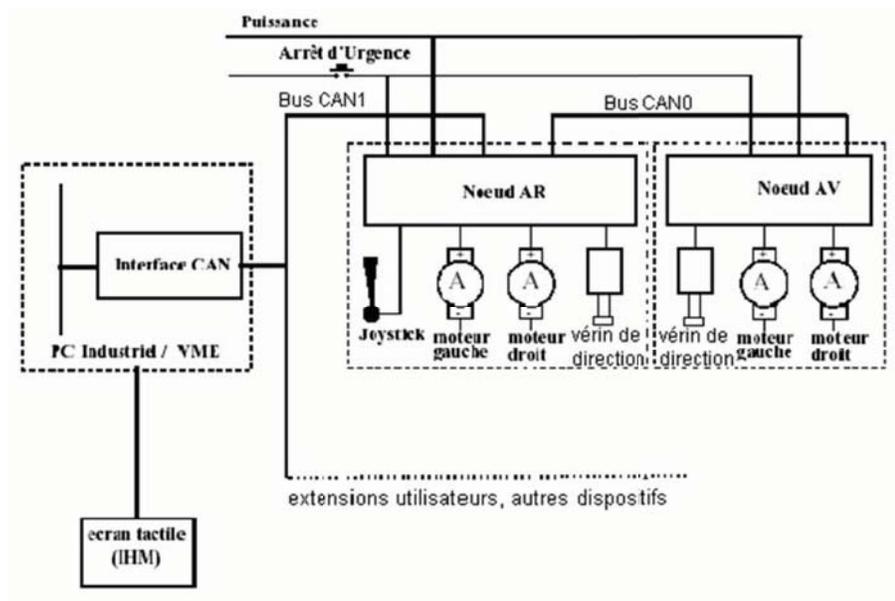


FIG. A.3 – Synoptique de l'architecture matérielle de Contrôle/Commande

Cette architecture est constituée de deux noeuds intelligents API (Amplificateur de Puissance

Intelligent) pouvant gérer chacun deux moteurs et un vérin de direction (plus le joystick pour le noeud arrière). La commande de frein de parking est unique pour les quatre moteurs. Un PC industriel complète cette architecture matérielle. Les deux noeuds, le PC et le microcontrôleur communiquent entre eux via deux bus de terrain CAN (Controler Area Network).

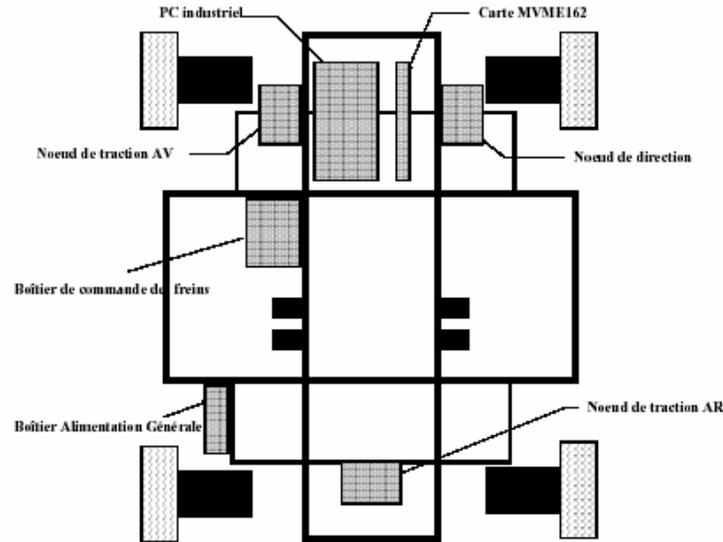


FIG. A.4 – Architecture matérielle : Implantation sur le châssis

Ces noeuds ont pour rôle d’asservir les moteurs en fonction des consignes de vitesse et de braquage qui transitent via les deux bus CAN0 et CAN1. Celles-ci proviennent soit de l’interface Homme/Machine, soit elles sont calculées par un programme de planification des trajectoires (pas encore implémenté sur la machine). Le rôle dees noeuds est de fournir la puissance aux moteurs et d’exécuter les boucles d’asservissement de vitesse et de position. Ils prennent en compte les informations délivrées via le bus CAN1 par les capteurs.

Chaque noeud est ainsi composé de trois modules : un module Calcul, un module Puissance, et un module Interface. L’architecture est représentée fig A.5.

Le module Puissance commande les deux moteurs à l’aide de transistors MOS-FET.

Le module Interface génère les signaux Tout ou Rien, convertit les signaux analogiques en signaux numériques, et gère les bus de communication.

Le module Calcul permet de déterminer le courant à envoyer au moteur à partir des consignes et des informations des capteurs. Ce module est en fait constitué de la mémoire flash et des microcontrôleurs.

L’architecture matérielle du véhicule ayant été présentée, nous allons décrire les différents capteurs, actionneurs ainsi que l’interface homme-machine présente sur RobuCar.

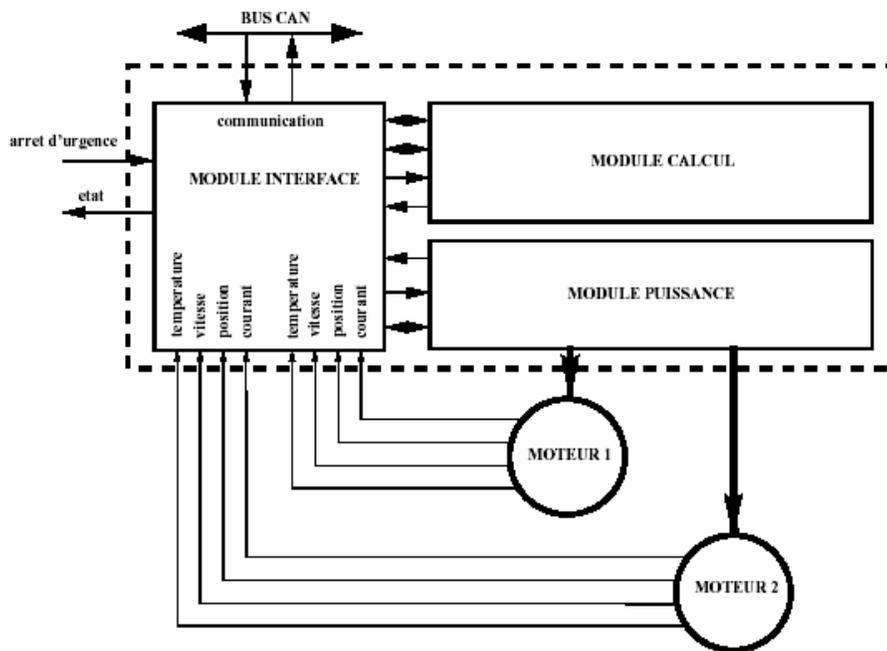


FIG. A.5 – Schéma fonctionnel d'un noeud

A.1 Description des Capteurs

Le fonctionnement en mode autonome du RobuCar nécessite l'implantation d'un certain nombre de capteurs destinés à l'informer sur son environnement ou sur sa position et sa vitesse :

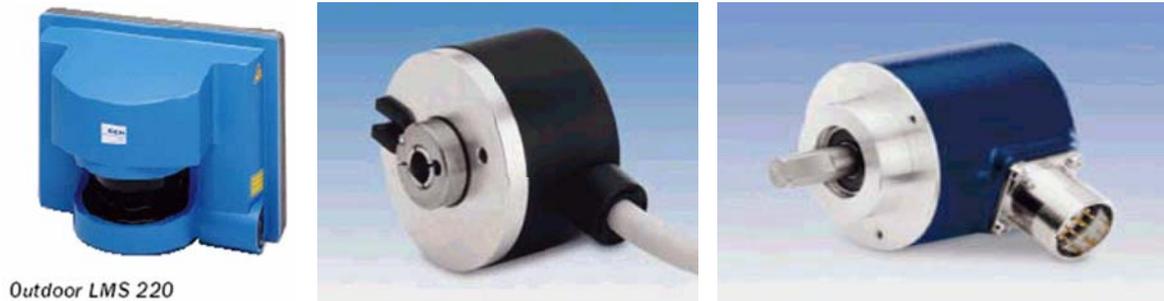
- Le télémètre à balayage laser LMS221-30106 de la figure A.6(a) a été développé par la société allemande SICK. Le principe de fonctionnement est le suivant : pour chaque angle, le détecteur envoie un faisceau laser. Le capteur calcule le temps pris par le faisceau entre le moment de l'envoi du signal et le retour du signal réfléchi par un objet. Le télémètre peut ainsi fournir la distance et la direction d'un éventuel obstacle.

Pour plus de détail sur ce capteur, le lecteur pourra se référer à [Riess, 2000].

- L'encodeur incrémental de la figure A.6(b) permet d'effectuer des mesures odométriques, c'est-à-dire les mesures de vitesse des roues [G.Baille *et al.*, 1999].
- L'encodeur absolu de la figure A.6(c) permet de contrôler le braquage des roues. En effet, il déduit l'angle de braquage à partir de la longueur de la tige du vérin.
- le GPS donne la position absolue du véhicule en x et en y .
- la centrale inertielle est en cours d'achat par le LAGIS. Ce capteur délivre les valeurs de la vitesse et de l'accélération de lacet, de roulis et de tangage (ces termes sont définis au

paragraphe 3.2.2).

Nous avons décrit les capteurs externes au véhicule. Il existe également d'autres capteurs en interne.



(a) Le télémètre laser

(b) Encodeur incrémental de mesure de la vitesse des roues

(c) Encodeur absolu de mesure de la longueur de la tige du vérin

A.2 Description des actionneurs

Le Robucar est composé de dix moteurs à courant continu :

- 4 moteurs de traction (un par roue)
- 4 moteurs de frein à commande unique (un par roue)
- 2 vérins motorisés de direction (un par essieu).

Les actionneurs sont donc de trois types, que nous développerons sous forme de modules (module de direction, module de traction et module de freinage).

A ces trois modules, nous pouvons ajouter le joystick de commande utilisé pour commander RobuCar manuellement.

A.2.1 Module de direction

Pour assurer le braquage du véhicule, un système de vérin électrique relié aux biellettes de direction a été choisi. Celui-ci est représenté fig. A.6.

Pour actionner les biellettes de direction, la crémaillère et le volant ont été remplacés par un vérin électrique. Celui-ci est équipé d'un codeur optique incrémental pour le contrôle du braquage. Il lui est associé un capteur de déplacement rectiligne de type REC- TIP12 de MCB industrie pour pouvoir lire la position initiale du vérin et de 2 capteurs inductifs Baumer pour les fins de course. La position absolue du vérin de direction est obtenue par une mesure analogique de la tension aux bornes du potentiomètre linéaire de 10kOhm fixé sur le vérin. La mesure de la tension aux bornes du potentiomètre varie sur une plage de 1 à 2.8 volts pour un angle variant d'environ -20° à $+20^\circ$.

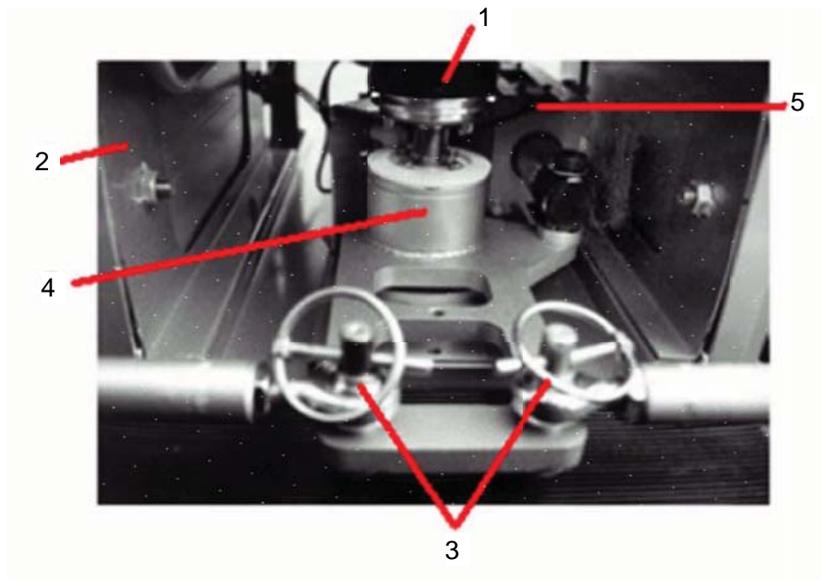


FIG. A.6 – Module de direction

(1 : Encodeur absolu, 2 : Module de direction, 3 : Attache Biellette, 4 : Support de l'encodeur, 5 : Vérin électrique)

A.2.2 Module de traction

Le module de traction est composé des quatre roues motorisées contrôlables séparément. Les moteurs sont censés avoir les mêmes caractéristiques, mais dans la réalité il s'avère que chaque roue réagit différemment à une même consigne. La figure A.7 représente une vue du module de traction.

Le contrôle de la vitesse se fait à l'aide d'un encodeur incrémental qui transmet un signal au module de calcul. Le moteur est alimenté par une tension continue de 48V fournie par les batteries. Pour rendre variable cette tension continue, on fait appel à un contrôleur PWM (Pulse Width Modulation) et à une entrée T/R (appelée DIR). Le signal PWM fait commuter l'alimentation du moteur avec une suite d'impulsions à fréquence fixe dont on fait varier la largeur. Pour contrôler à la fois la vitesse et la direction du véhicule, on utilise le signal T/R qui code le sens de rotation des roues et le signal PWM dont le rapport cyclique donne la vitesse. Ainsi, le moteur voit à ses bornes une tension d'alimentation grossièrement égale au produit de la tension délivrée par les batteries et du rapport cyclique du signal de commande (signal PWM). Le réducteur du moteur a pour rapport 1/29.

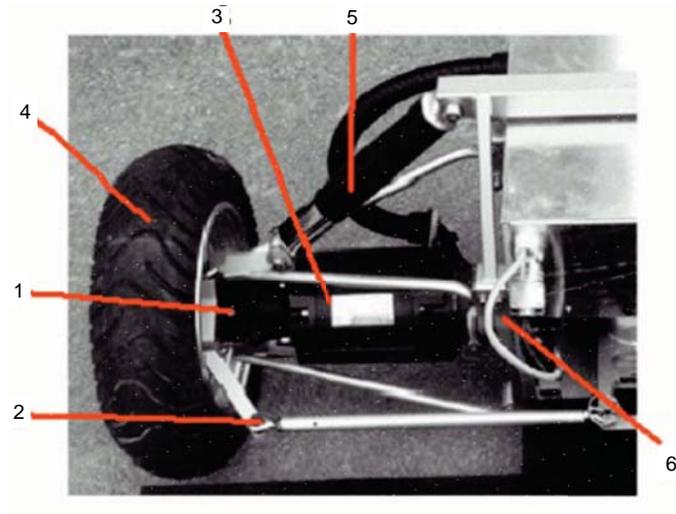


FIG. A.7 – Module de traction

(1 : Interface moteur, 2 : Biellette de direction, 3 : Moteur 1200Watts, 4 : Roue 10", 5 : Amortisseur, 6 : Encodeur incrémental)

A.2.3 Module de freinage

Chaque roue du Robucar est munie d'un frein à tambour mécanique commandable électroniquement : un moteur de type essuie-glace tire ou relâche le câble.

Les quatre freins sont solidaires et la commande de freinage est en fait un signal T/R venant du noeud de direction ou du bouton poussoir d'arrêt d'urgence.

Ces moteurs de freinage n'interviennent pas dans la modélisation au paragraphe 3.2.3.

A.2.4 Le joystick de commande

Le joystick de commande (figure A.8) sert à manoeuvrer le véhicule. Il contrôle deux potentiomètres dont la lecture analogique par le noeud de direction simule l'accélérateur et le volant d'un véhicule. Dans le travail présenté sur ce document, le joystick n'est pas utilisé.



FIG. A.8 – Le joystick de commande

A.3 Les différents modes de fonctionnement de RobuCar

Grâce aux possibilités de braquage sur l'essieu avant ou arrière, RobuCar peut fonctionner selon trois modes présentés sur la figure A.9 :

- Le mode single : Il correspond au fonctionnement d'une voiture ordinaire. Le braquage des roues se fait uniquement sur l'essieu avant et les roues tournent toutes selon le même sens de rotation.
- Le mode dual : C'est le mode single avec en plus la possibilité de braquer les roues arrière pour accentuer le rayon de courbure de la trajectoire du véhicule.
- Le mode park : Pour ce mode, le braquage sur l'essieu avant et arrière se fait dans le même sens. Ce mode est particulièrement utile pour garer une voiture par exemple.

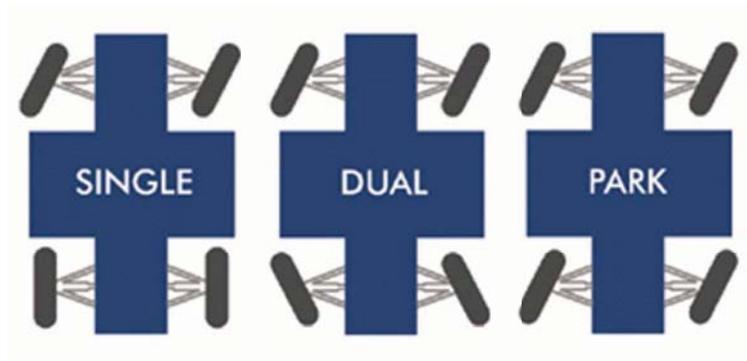


FIG. A.9 – Les différents modes de fonctionnement de RobuCar

La modélisation présentée au paragraphe 3.2.3 est effectuée à partir du mode dual qui représente le cas le plus général.

La simulation au chapitre 4 est, quant à elle, effectuée par souci de simplification sur le modèle single (cas particulier du mode dual où la direction des roues arrière est bloquée à 0°).

Annexe B

Linéarisation du modèle de RobuCar autour d'un point de fonctionnement

Prenons le modèle non linéaire affine en la commande trouvé à la page 83 et rappelé ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + B.u \\ y = C.x \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

où

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{f_1}{J_1}x_1 + \frac{RF_{x_1}}{J_1} + \frac{RF_{y_1}x_{10}}{J_1} \\ -\frac{f_2}{J_2}x_2 + \frac{RF_{x_2}}{J_2} + \frac{RF_{y_2}x_{10}}{J_2} \\ -\frac{f_3}{J_3}x_3 + \frac{RF_{x_3}}{J_3} + \frac{RF_{y_3}x_{12}}{J_3} \\ -\frac{f_4}{J_4}x_4 + \frac{RF_{x_4}}{J_4} + \frac{RF_{y_4}x_{12}}{J_4} \\ -\frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{M} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{M} - \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{M}x_{10} - \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{M}x_{12} \\ x_5 \\ -\frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{M}x_{10} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{M}x_{12} + \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{M} + \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{M} \\ x_7 \\ -\frac{f_f}{J_f}x_9 - \frac{k_f}{J_f}x_{10} - \frac{F_{x_1}+F_{x_2}}{J_f}D - \frac{F_{y_1}+F_{y_2}}{J_f}x_{10}D \\ x_9 \\ -\frac{f_r}{J_r}x_{11} - \frac{k_r}{J_r}x_{12} - \frac{F_{x_3}+F_{x_4}}{J_r}D - \frac{F_{y_3}+F_{y_4}}{J_r}x_{12}D \\ x_{11} \\ \frac{a}{I_z}(-F_{x_1} - F_{x_2} + F_{y_1} + F_{y_2})x_{10} + \frac{b}{I_z}(F_{x_3} + F_{x_4} - F_{y_3} - F_{y_4})x_{12} + \frac{d}{2I_z}(F_{x_1} - F_{x_2} + F_{x_3} - F_{x_4}) \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

Considérons le véhicule en phase d'accélération (les glissements $G_i > 0$), roulant à une vitesse de $16km/h$ en longitudinal et $1km/h$ en transversal. Il est positionner au point de coordonnée $(x = 50m; y = 2m)$. L'angle de braquage des roues avant et arrière est respectivement égal à 2.8° et 0.6° . Enfin les angles de glissement des roues avant et arrières sont strictement positifs.

Le point de fonctionnement suivant, respecte les indications précédentes :

$$\left[4.51 \quad 4.505 \quad 4.515 \quad 4.512 \quad 4.44 \quad 50 \quad 0.42 \quad 2 \quad 0.01 \quad 0.05 \quad 0.015 \quad 0.01 \quad 0.001 \right]$$

Nous pouvons donc linéariser le système autour de ce point. Dans ce cas, le système s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = A.x + B.u \\ y = C.x \end{cases} \quad (B.3)$$

où les matrices B et C n'ont pas été modifiées et où la matrice A correspondant à la linéarisation

de la fonction f autour du point de fonctionnement précédemment cité est donnée par :

$$\begin{pmatrix} 3.84e6 & 0 & 0 & 0 & -3.90e6 & 0 & -121.18 & 0 & 0 & 182.88 & 0 & 0 & -97.35 \\ 0 & 3.86e6 & 0 & 0 & -3.92e6 & 0 & -121.18 & 0 & 0 & 182.88 & 0 & 0 & -97.35 \\ 0 & 0 & 3.82e6 & 0 & -3.89e6 & 0 & -42.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & -740.83 & 17.14 \\ 0 & 0 & 0 & 3.83e6 & -3.90e6 & 0 & -42.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & -740.83 & 17.14 \\ -3.14e4 & -3.15e4 & -3.12e4 & -3.13e4 & 1.27e5 & 0 & 2.67 & 0 & 0 & -2.99 & 0 & 12.091.31 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.57e3 & -1.58e3 & -311.93 & -312.96 & 3.84e3 & 0 & -109.25 & 0 & 0 & 5.72e4 & 0 & 5.69e4 & -3.80 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.10e4 & -1.10e4 & 0 & 0 & 2.23e4 & 0 & 0.69 & 0 & -0.00 & -6.04 & 0 & 0 & 0.56 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.09e4 & -1.09e4 & 2.22e4 & 0 & 0.24 & 0 & 0 & 0 & -0.00 & -0.77 & -0.10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 6.16e4 & -7.27e4 & 6.71e4 & -6.63e4 & 1.03e4 & 0 & -16.21 & 0 & 0 & 1.96e5 & 0 & -9.76e4 & -156.98 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Ce modèle linéarisé de RobuCar sera utilisé pour déterminer les indices RTBNE au troisième chapitre (page 85)

Résumé :

Cette thèse s'inscrit dans la problématique de la tolérance aux fautes de systèmes non linéaires et plus particulièrement de la commande tolérante active aux fautes d'actionneurs.

Dans un premier temps, les commandes tolérantes passive et active sont exposées. La seconde technique, choisie dans ce mémoire, est composée d'un module de surveillance basé sur la redondance analytique non linéaire et d'un module de reconfiguration. Lorsque des défauts se produisent, le système de surveillance les détecte et les localise, puis transmet cette information au module de reconfiguration qui n'utilise que les composants sains restants. Ce module est chargé de faire basculer la loi de commande du mode nominal au mode correspondant aux défauts. Dans un deuxième temps, une méthode d'analyse est développée pour connaître la capacité d'un système non linéaire à tolérer des défauts. Celle-ci consiste à savoir si l'état du système est toujours estimable et accessible suite à la panne de composants. Si cette analyse met en évidence la présence de redondances d'informations et d'entrées de commande, la mise en place d'une commande tolérante aux défauts de composants est envisageable. Dans un dernier temps, la stratégie de reconfiguration est appliquée à un véhicule électrique expérimental, RobuCar. Le véhicule est modélisé en tenant compte des dynamiques longitudinale et transversale ainsi que du lacet. Après une analyse confirmant la capacité du système à tolérer les défauts, une commande tolérante aux fautes est mise en place sur le véhicule. Enfin, des simulations de suivi de trajectoire à une vitesse désirée lors de pannes de moteurs de traction ou de direction illustrent nos résultats.

Mots clés : tolérance active aux fautes, diagnostic, dynamique de véhicule, véhicule tout électrique, reconfiguration, perte d'actionneurs, observabilité non linéaire, accessibilité non linéaire.

Abstract :

This PhD thesis deals with fault tolerance and more accurately with Active Fault Tolerant Control System (AFTCS) for nonlinear system.

At first, passive and active fault tolerant approaches are presented. The second technique, chosen in this thesis, needs diagnosis module based on nonlinear analytical redundancy and reconfiguration module. When faults occur, diagnosis module deals with detection and isolation of faulty component(s) and transmits the information to the reconfiguration module which uses only remaining healthy components. This module is in charge of switching the control law from nominal mode to the appropriate faulty mode. Then, analysis method is developed in order to know nonlinear system ability to tolerate fault. It consists of studying the evolution of nonlinear observability and reachability properties after sensors and actuators loss. If this analysis brings to the fore redundancy of information on the system, setting up AFTCS on the system can be considered. Finally, reconfiguration strategy is applied on an experimental electric vehicle (RobuCar). At first, RobuCar is modelled by an affine control nonlinear system taking account of longitudinal and transversal dynamics and of yaw. As system analysis confirms the ability to tolerate faults, AFTCS is set up on the electric vehicle. Simulations of trajectory tracking at desired speed in presence of traction or steering engine failure illustrate our results.

Keywords : Active Fault Tolerant System, diagnosis, vehicle dynamics, electric vehicle, reconfiguration, actuators loss, nonlinear observability, nonlinear reachability