



HAL
open science

Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts

Kamel Menighed

► **To cite this version:**

Kamel Menighed. Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts. Automatique / Robotique. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010. Français. NNT: 2010NAN10071 . tel-01748657v2

HAL Id: tel-01748657

<https://theses.hal.science/tel-01748657v2>

Submitted on 10 Dec 2010

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

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

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 23 Septembre 2010
pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1
Spécialité: Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

par

Kamel MENIGHED

Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	A. EL HAJJAJI	Professeur à l'Université de Picardie Jules Verne, MIS, Amiens
	L. CAUFFRIEZ	Maître de conférences HDR à l'Université de Valenciennes, TEMPO/PSI, Valencienne
<i>Examineurs :</i>	D. MAQUIN	Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, CRAN, Nancy
	C. AUBRUN	Professeur à l'Université Henri Poincaré, CRAN, Nancy (directeur de thèse)
	J.-J. YAMÉ	Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, CRAN, Nancy (co-encadrant de thèse)
	A.-L. GEHIN	Maître de Conférences à l'Université de Lille, LAGIS, Lille

*Je dédicace ce travail
A ma mère et mon père (paix à son âme),
A mes sœurs et mes frères,
Et plus particulièrement à ma chère fiancée.*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN-UMR 7039) plus particulièrement dans le groupe thématique SUFDIAG à l'Université Henri Poincaré-Nancy1. Je remercie M. **Alain Richard** pour m'avoir accueilli et m'avoir offert la possibilité d'effectuer ma thèse au sein du CRAN. Je remercie également M. **Dominique Sauter**, Professeur d'automatique à l'Université Henri Poincaré, pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe DESYR, et m'avoir permis de réaliser ce travail et surtout d'avoir permis à cette thèse d'exister.

Je tiens à remercier M. **Cristophe Aubrun**, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, qui a bien voulu prendre en charge la direction de ma thèse, pour m'avoir fait profiter de son expérience et pour ses remarques judicieuses, et M. **Joseph Yamé** Maître de conférence à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, pour avoir voulu co-encadrer ces travaux, pour m'avoir toujours su me faire profiter de ses compétences théoriques, ainsi que pour sa disponibilité et son soutien.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à tous les membres du jury qui m'on fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie vivement M. **Didier Maquin**, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, pour avoir accepté de présider ce jury de thèse et d'apporter son regard et son esprit d'analyse critique.

Je remercie M. **Ahmed El Hajjaji**, Professeur à l'Université de Picardie Jules Verne, Amiens, et M. **Laurent Cauffriez** Maître de conférences HDR à l'Université de Valenciennes, pour avoir accepté de rapporter sur ce travail et d'avoir consacré une partie de leur temps pour examiner minutieusement ce manuscrit. Je les remercie vivement pour tous leurs commentaires et suggestions.

Je remercie Mme. **Anne-Lise Gehin**, Maître de Conférences à l'Université de Lille, pour avoir accepté d'apporter son regard critique sur ce travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de l'équipe SUFDIAG, pour leur accueil, et plus particulièrement **C. Join** et **P. Sibille** pour leur gentillesse.

Merci à **Frédéric Hamelin**, **David Brie** et **Hugues Garnier** pour tous les instants de délire et l'ambiance quotidienne remarquable dans la cafétéria. Merci également à **Olivier Cervelin**, notre ingénieur informaticien, pour sa disponibilité infaillible. Un merci tout particulier à **Sabine Huraux**, notre secrétaire dévouée et sympathique, pour son assistance administrative, sa disponibilité et son efficacité irréprochable. Ma chère Sabine, tu vas certainement manquer mes gâteaux... :-))

Merci à **BOussaid Boumedyen** (alias **BOB**) pour tous les moments de travail que nous avons partagés et de m'avoir soutenu dans tous les moments, aussi bien joyeux que difficiles, et enfin, mais surtout, pour son amitié. **BOB**, merci pour toutes ces fructueuses discussions scientifiques, même si tes conseils et tes remarques ne sont pas toujours à mon goût ☺. Je te souhaite du courage pour finir ta thèse.

Merci à **Abdou, Ahmed et Houssein** pour la générosité, les éclats de rire, les blagues et aussi pour la bonne humeur quotidienne. Merci aussi, non seulement pour toutes les discussions scientifiques, et autres, que nous avons eues, mais également pour les conseils et le réconfort dans des moments difficiles.

Merci à **Brian le mexicain** pour sa gentillesse et son sourire ensoleillé. **Brian**, ta manière de prononcer "Monsieur **KAMEL**" me manque déjà. Merci également à **Sinuhé** pour sa sympathie et pour les bons moments passés ensemble.

Merci aux autres membres du laboratoire, notamment **Samir** et **El-Hadi**, l'ex stagiaire **Christian**, les doctorants **Ahmed**, **Karim**, **Souleyman** et **Junbo** courage les gars!, sans oublié ma petite sœur **Rim**, courage et accroche toi Ra.... tu arriveras forcément à tes fins et les permanents **Marion**, **Taha** et **Thierry**.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur soutien dans cette aventure. Enfin, mon remerciement affectif va à la famille qui a été en permanence présente dans mon esprit et mon cœur. Particulièrement ma mère, mes sœur, mes frères et ma fiancée pour leurs conseils avisés et leurs encouragements continus.

La liste des personnes à remercier est longue, et les mots risquent de me manquer pour leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance. Je tiens à m'excuser auprès de celles et ceux que j'aurais omis de citer.

Notations

Les notations sont, dans la mesure du possible, les notations standards. Elles sont définies au fur et à mesure de leur utilisation dans le présent mémoire et sont conservées tout au long de celui-ci. Il nous a cependant paru utile de les rassembler ici.

- \mathbb{N} : Ensemble des nombres naturels.
- \mathbb{R} : Ensemble des nombres réels.
- \mathbb{Z} : Ensemble des nombres entiers.
- \mathbb{R}^n : ensemble des vecteurs réels de dimension n .
- $\mathbb{R}^{n \times m}$: Ensemble des matrices réelles de dimension $n \times m$.
- \mathcal{M}^T : Transposée de la matrice \mathcal{M} .
- $\mathcal{M} \succ 0$: \mathcal{M} Matrice définie positive.
- $\mathcal{M} \succeq 0$: \mathcal{M} Matrice semi définie positive.
- $0_{a \times b}$: Matrice nulle de dimension $a \times b$.
- 0_a : Matrice nulle de dimension $a \times a$.
- $I_{a \times b}$: Matrice identité de dimension $a \times b$.
- I_a : Matrice identité de dimension $a \times a$.
- I : Matrice identité de taille appropriée.
- $diag_a\{\mathcal{A}\}$: matrice de a blocs-diagonaux, dont les blocs diagonaux sont les \mathcal{A} .
- $\| \chi \|_{\Lambda}^2 \triangleq \chi^T \Lambda \chi$.
- $x(k)$: Vecteur du signal échantillonné x à l'instant k .
- $u(k|h)$: La valeur de $u(k)$, calculé à l'instant h .
- $X(k, m|h)$: Vecteur colonne de dimension m composé de $[x(k|h)^T, \dots, x(k+m-1|h)^T]^T$.
- $\hat{x}(k+1|h)$: Prédiction de la variable x à l'instant $k+1$ à partir des valeurs connues jusqu'à l'instant h .
- z : Variable de la transformation en \mathbb{Z} .
- $\hat{\bullet}$: Valeur estimée de la variable ou du paramètre \bullet .
- $\Delta u(k)$: Incrément du signal u , $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$.
- $\gamma_i^s(k)$: Valeur du facteur de perdre de puissance sur le s -ième actionneur du sous-système S_i .

Abréviations

AFTC	:	Active Fault Tolerant Control Systems.
EA	:	Eigenstructure Assignment.
FDI	:	Fault Detection and Isolation.
FTC	:	Fault Tolerant Control.
FTC	:	Fault Tolerant Control Systems.
GPC	:	Generalized Predictive Control.
MPC	:	Model Predictive Control.
NCS	:	Networked Control System.
PFTC	:	Passive Fault Tolerant Control Systems.
PIM	:	Pseudo Inverse Method.
RAFFE	:	Robust Adaptive Fast Fault Estimation.
SCB	:	Special Coordinate Basis.
UIO	:	Unknown Input Observer.

Table des matières

Notations	v
Abréviations	vii
1 Introduction générale	1
2 Surveillance et commande tolérante aux défauts à base de modèle	7
2.1 Introduction	7
2.2 Terminologie et définitions	8
2.3 Surveillance à base de modèle	9
2.4 Conception d'un système de surveillance	10
2.4.1 Génération de résidu	10
2.4.2 Diagnostic des défauts	14
2.4.3 Critères de performance pour le diagnostic	15
2.5 Système de commande tolérante aux défauts	16
2.5.1 Lois de commande tolérante aux défauts	17
2.6 Surveillance et tolérance aux défauts des systèmes complexes	22
2.6.1 Surveillance des systèmes complexes	22
2.6.2 Organisation du diagnostic	24
2.6.3 Tolérance aux défauts des systèmes complexes	26
2.7 Réflexions sur les problématiques liées aux structures de commande tolérante aux défauts	28
2.7.1 Stratégie FDI/FTC retenue pour les systèmes complexes	30
2.8 Conclusion	31

3	La commande coopérative pour les systèmes complexes	33
3.1	Introduction	33
3.2	Qu'est ce qu'un système complexe?	33
3.3	Terminologie et représentations	34
3.3.1	Définitions existantes	34
3.4	Représentation des systèmes complexes par des systèmes interconnectés	37
3.5	Problématique de la commande des systèmes complexes	38
3.5.1	Les difficultés de la commande des systèmes complexes	38
3.5.2	Les problématiques clefs de la commande des systèmes complexes	39
3.5.3	La décomposition du problème de commande	40
3.6	Mise en œuvre de la décomposition horizontale	42
3.6.1	De la commande décentralisée à la commande quasi-décentralisée	43
3.6.2	De la commande quasi-décentralisée à la commande distribuée	46
3.7	Commande prédictive à base de modèle	47
3.7.1	Principes de base	47
3.7.2	Principe de fonctionnement	50
3.7.3	Problématiques liées à la stratégie de commande prédictive	51
3.7.4	Paramètres de réglage de la commande prédictive	52
3.8	Sur les formalismes de représentation des systèmes en commande MPC	54
3.9	La commande MPC centralisée	54
3.9.1	Critère de performance	55
3.9.2	Formulation du problème	56
3.9.3	Calcul de la loi de commande	56
3.9.4	Implantation de l'algorithme de commande	60
3.10	Analyse de stabilité de la commande MPC Centralisée : MPC-C	60
3.11	La commande MPC distribuée	62
3.12	Décomposition du système	63
3.12.1	Décomposition du problème de commande	64
3.12.2	Formulation du problème local	64
3.12.3	Calcul de la loi de commande locale	65
3.12.4	Implantation de l'algorithme	70
3.13	Conclusion	72

4	La commande FTC coopérative pour les systèmes complexes	73
4.1	Introduction	73
4.1.1	Capacité implicite à la tolérance aux défauts	74
4.1.2	Capacité explicite à la tolérance aux défauts	76
4.2	Diagnostic des systèmes complexes	77
4.2.1	Modèle du système	77
4.2.2	Décomposition du système	78
4.2.3	Problème de propagation de défauts	78
4.2.4	Stratégie de conception du module FDI local	79
4.3	Diagnostic de défauts actionneurs	80
4.3.1	Synthèse d'un observateur adaptatif robuste RAFFE	85
4.4	Système de diagnostic utilisant RAFFE-O	90
4.5	La commande FTC distribuée à base de MPC	95
4.5.1	Défauts d'actionneurs	95
4.5.2	Architecture de la commande FTC coopérative	96
4.5.3	Défauts capteurs	97
4.5.4	Défaillance du réseau	100
4.6	Exemple numérique et résultats de simulation	105
4.7	Conclusion	121
5	Conclusion générale	123
A	La transformation SCB pour la génération des résidus robustes	127
A.1	Synthèse de l'observateur RAFFE	128
A.1.1	Conditions d'existence de RAFFE	129
A.2	Algorithme pour la conception de l'observateur	129
	Bibliographie	131

Table des figures

1.1	La structure de commande coopérative embarquée et tolérante aux défauts.	5
2.1	Les étapes de la surveillance par la redondance analytique.	10
2.2	Principe de la génération de résidus par estimation paramétrique.	11
2.3	Principe de la génération de résidus par espace de parité.	12
2.4	Principe général d'un observateur.	13
2.5	Structure générale du système tolérant aux défauts.	17
2.6	Le principe de la commande AFTC pré-calculée.	18
2.7	Types des systèmes tolérants aux défauts.	19
2.8	Décentralisation des diagnostics indépendants.	24
2.9	Hierarchisation des diagnostics indépendants.	25
2.10	Hierarchisation de système de commande tolérant aux défauts.	28
2.11	La structure centralisée.	28
2.12	La structure décentralisée.	29
2.13	La structure hiérarchique du système tolérant aux défauts (Patton et al., 2007)	30
2.14	Le mécanisme FDI/FTC embarqué et coopératif pour le système complexe.	31
3.1	Interconnexion de sous-système (Scorletti, 1997)	36
3.2	Hierarchie des fonctions de commande.	40
3.3	Décomposition horizontale du système S et du contrôleur \mathcal{C}	41
3.4	Structure "multi-niveaux, multi-objectifs".	42
3.5	Les structures de commande.	43
3.6	Stratégie de commande décentralisée avec recouvrement pondéré.	44
3.7	Le principe de l'horizon glissant.	48

3.8	Poursuite de trajectoire de référence par stratégie de l'horizon fuyant.	51
3.9	Diagramme de MPC.	60
3.10	Structure interne de i -ième sous-contrôleur.	71
4.1	Système en situation nominale.	75
4.2	Système en situation défaillante-défaut sur u_3	76
4.3	Propagation de défaut entre les deux sous-systèmes.	79
4.4	Le signal résidu.	89
4.5	Estimation d'un défaut constant.	89
4.6	Estimation d'un défaut variable.	90
4.7	Ensemble d'observateurs pour le diagnostic de défauts partiels d'actionneurs.	93
4.8	Architecture de la commande coopérative tolérante aux défauts.	96
4.9	Diagramme interne d'un FTC/FDI local- défauts actionneurs.	96
4.10	Représentation du défaut capteur.	100
4.11	Diagramme interne d'un FTC/FDI local : défauts capteurs.	100
4.12	Défaillance du réseau dans la structure distribuée : obtention de la structure décentralisée.	104
4.13	Deux sous-systèmes interconnectés.	106
4.14	Les sorties des systèmes S_1 et S_2 - cas nominal.	108
4.15	Les commandes appliquées aux S_1 et S_2 - cas nominal.	108
4.16	Facteurs de perte de puissance - cas défauts actionneurs.	110
4.17	Les résidus pour défauts actionneurs - cas défauts actionneurs.	111
4.18	Les signaux réglants - cas défauts actionneurs.	111
4.19	Les sorties de S_1 et S_2 - cas défauts actionneurs.	112
4.20	Les commandes appliquées aux S_1 et S_2 - cas défauts actionneurs.	113
4.21	Les sorties des sous-systèmes S_1 et S_2 - premier scénario.	114
4.22	Les commandes appliquées sur S_1 et S_2 - premier scénario.	115
4.23	Les facteurs $\xi_i(k)$ de type biais appliqués sur les capteurs.	116
4.24	Les défauts capteurs f_{s_i} de type biais.	116
4.25	Les résidus - premier scénario.	117
4.26	La réponse de la variable de sortie mesurée - premier scénario.	117

4.27	La réponse de la variable de sortie mesurée - deuxième scénario.	118
4.28	La réponse du signal de sortie - deuxième scénario.	119
4.29	Le signal résidu r_i - deuxième scénario.	119
4.30	Le signal ξ - deuxième scénario.	120
4.31	Le signal f_{si} - deuxième scénario.	120

Chapitre 1

Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes automatisés de production sont soumis à des contraintes de rendement de plus en plus exigeantes entraînant de ce fait l'application de commandes toujours plus performantes. De par cette évolution, les systèmes asservis sont de plus en plus complexes, grands en dimension et interconnectés par nature. Ils deviennent aussi de plus en plus vulnérables aux défauts qui les rendent incapables de réaliser correctement leurs objectifs. Cette évolution a conduit au développement des systèmes de surveillance, dont l'objectif est de fournir à tout moment des informations à l'opérateur sur le fonctionnement du système. La surveillance devient alors une fonction importante parmi les différentes tâches de la supervision des systèmes industriels. Les activités de l'opérateur en charge de la supervision sont les suivantes :

- surveiller l'état de l'installation (monitoring) ;
- ajuster les paramètres de la commande, dans le cas par exemple où les conditions de fonctionnement ont changé ;
- exécuter les opérations planifiées et le cas échéant, le diagnostic, la maintenance, la compensation et la correction de situations anormales.

D'une manière générale, lorsque la connaissance sur le comportement du procédé est incomplète ou l'environnement dans lequel il doit évoluer est changeant, le système de commande doit présenter un certain degré d'autonomie (ou d'intelligence) de manière à assurer une continuité de la fonction pour laquelle il a été conçu. Dans son ouvrage intitulé "Supervision des procédés automatisés et ergonomie" [Millot \(1990\)](#) souligne le manque d'adaptativité des outils de production face à une situation imprévue telle que l'apparition d'un défaut.

Se pose alors la question de savoir quelle stratégie adopter afin de permettre au système de s'affranchir de l'apparition du défaut. Cette question conduit à la notion générale des systèmes de commande tolérante aux défauts. De toute évidence, la stratégie à employer dépend fortement de facteurs tels que la gravité du ou des défauts, ou le degré de redondance matériel de l'installation. Si une "échelle des stratégies" pouvait être établie elle

irait de : ne rien faire car le défaut n'est pas grave à : arrêter l'installation. Le domaine de la tolérance aux défauts regroupe l'ensemble des approches se situant entre ces deux situations extrêmes. La vulnérabilité des systèmes industriels face aux défauts explique le développement récent de ce concept. Depuis une dizaine d'années, les recherches se sont orientées vers des méthodes ne nécessitant pas la connaissance a priori du modèle du système en présence de défauts, ceci dans le but de s'affranchir de l'explosion combinatoire liée aux différentes causes de défauts. Un important travail de standardisation des termes utilisés a été entrepris. On peut noter les quelques définitions qui ont été établies par (Staroswiecki et Gehin, 2001) et (Noura, 2002) sur un ensemble de termes tels que tolérance aux défauts, reconfiguration ou accommodation. Ainsi, la notion générale de tolérance aux défauts exprime la capacité qu'a un système à atteindre ses objectifs en dépit de l'apparition de défauts. La tolérance aux défauts est réalisée par la reconfiguration des lois de commande, i.e, modification des paramètres du système de commande ou le cas échéant par la restructuration du contrôleur, i.e, modification des paramètres et de la structure du système de commande. Il est commode de considérer que le problème de la tolérance aux défauts est un problème de commande particulier. Même si la formulation reste très générale, elle présente l'intérêt de poser le problème de la tolérance aux défauts en termes de gestion de contraintes et d'objectifs à atteindre $\langle \gamma_g, \mathcal{S}, \theta, \mathcal{U} \rangle$,

- γ_g Objectif global du système ;
- \mathcal{S} Structure du système ;
- θ Vecteur des paramètres du système ;
- \mathcal{U} Ensemble des lois de commande.

Une solution à ce problème consiste à trouver une loi de commande $u \in \mathcal{U}$ afin d'assurer les objectifs globaux γ_g du système sous les contraintes de structure \mathcal{S} et les paramètres θ .

Comme nous l'avons souligné en préambule, les contraintes croissantes exercées sur les systèmes se traduisent par une augmentation de leur complexité. Parallèlement, l'évolution de la technologie de communication permet une coopération plus efficace entre les éléments constitutifs du système. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux présentés dans ce document. Les moyens de communication industriels sont utilisés dans le cadre de la mise en œuvre d'une architecture de commande tolérante aux défauts pour des systèmes complexes. Une coopération entre les fonctions de commande /diagnostic assure la tolérance à certains types de défauts qui affectent le système.

La problématique

La commande des systèmes est traditionnellement réalisée à partir d'un calculateur central qui collecte l'ensemble des informations relevées sur le procédé, puis les traite pour

élaborer un ensemble de commande qui est appliqué au procédé. Avec le développement des systèmes commandés en réseaux, en anglais Networked Control System, et des calculateurs embarqués, la stratégie des tâches de diagnostic et de commande s'oriente vers une distribution des algorithmes. Le problème de la coopération entre différents calculateurs autour d'un objectif commun constitue aujourd'hui un enjeu important tant sur le plan économique que scientifique. Sur le plan scientifique, de nombreuses questions de nature fondamentale sont sans réponse à ce jour. Parmi ces questions, on se propose d'aborder le problème de la conception des stratégies de distribution de diagnostic/commande et de coopération des tâches de commande entre les sous-contrôleurs associés à chaque sous-système qui composent le système complexe et de prendre en compte, outre les défauts dans les sous-systèmes, des possibilités de défaillance du réseau de communication entre les différentes unités.

On voit donc s'étendre dans ce contexte les notions de diagnostic/commande tolérante aux défauts (FDI/FTC) au système complexe, sujet aux défauts actionneurs et capteurs. Le caractère embarqué impose le développement de stratégies qui facilitent la prise de décision non supervisée et l'autonomie des sous-contrôleurs en cas de défaut réseau. Nos travaux reposent sur l'étude de diagnostic/commande de systèmes complexes. Il n'existe pas à proprement parlé de définition précise de la complexité des systèmes. Il s'agit d'une notion générale qui regroupe un ensemble de critères quelque peu subjectifs. Lors du dernier workshop "Direction and Brainstorming in Control Systems R &D" à Bruxelles en octobre 2009, organisé sous l'égide de l'ICT, divers travaux ont tenté de définir la complexité et les systèmes complexes. On trouve également dans la littérature l'expression grands systèmes. Pour des raisons de clarté nous utiliserons les termes de système pour décrire le système global et de sous-système pour décrire les éléments qui le constitue. Un système peut être appelé complexe si sa dimension, les non linéarités, les interconnexions entre les sous-systèmes et les informations sur le système impliquent que les méthodes de commande dites conventionnelles ne peuvent pas lui être appliquées. Dans ce cas, la complexité du système se traduit par la complexité de la commande à mettre en œuvre. En effet, ces dernières ne dépendent plus exclusivement d'informations locales fournies par les capteurs mais nécessitent également des informations provenant d'autres sous-systèmes. On peut citer parmi les travaux précurseurs dans ce domaine l'ouvrage d'André Titli ([Titli, 1975](#)) qui met en évidence l'importance des interconnexions entre les sous-systèmes ainsi que la coordination entre les algorithmes de commandes locales et le coordinateur.

Objectifs

Les travaux développés dans cette thèse consistent à développer une structure de commande tolérante aux défauts dans le cas des systèmes complexes. La stratégie proposée repose sur la capacité de communication entre les différents contrôleurs locaux associés

aux sous-systèmes interconnectés qui composent le système. Il s'agit alors d'élaborer une stratégie de commande coopérative visant à compenser les effets des défauts affectant le système. L'architecture du système s'appuie sur une structure distribuée. Ce type de structure présente un certain nombre d'avantages notamment en termes de facilité de maintenance par exemple dans le cas de test et, le cas échéant, de remplacement de modules individuels défectueux. Dans la structure proposée par [Vaccarini *et al.* \(2009\)](#), la distribution spatiale du système complexe utilise largement le réseau de communication afin d'assurer une coopération efficace entre les contrôleurs locaux. Les informations échangées sont des commandes mais également des indications sur les interactions physiques entre les sous-systèmes. En effet, suivant la décomposition choisie, il se peut que ces derniers ne soient pas totalement découplés. Il est alors possible de prendre en compte les interactions physiques par le biais du réseau de communication. Cet élément s'avère prépondérant lors de la synthèse de la loi de commande.

Dans le contexte de la tolérance aux défauts dans les systèmes complexes interconnectés, le choix de la commande revêt une importance particulière. Elle doit être capable, d'une part, d'intégrer la connaissance échangée entre les sous-contrôleurs via le réseau de communication et d'autre part, permettre aux sous-systèmes d'atteindre leurs objectifs locaux. Des travaux récents ([Venkat *et al.*, 2007](#)) ont montré que la commande prédictive (Model Predictive Control, MPC) présentait des caractéristiques lui permettant de répondre aux exigences mentionnées précédemment. [Kuwata *et al.* \(2006\)](#) ont proposé un algorithme de commande prédictive robuste dans le cas du contrôle de trajectoire d'une flotte de véhicules autonomes. Une commande prédictive distribuée basée sur la communication entre sous-contrôleurs pour améliorer les performances globales du procédé est développée.

Dans la structure distribuée que nous proposons, voir la figure [1.1](#), le système global asservi est composé d'un ensemble de boucles locales constituées individuellement d'un calculateur embarqué \mathcal{C}_i qui pilote un sous-système S_i . Chaque sous-système S_i est muni de capteurs (C) et d'actionneurs (A). Sur la figure [1.1](#), les informations locales sont constituées de mesures y_i et de commandes u_i et les interactions physiques entre les sous-systèmes sont représentées en gras. Chaque calculateur \mathcal{C}_i recueille les informations locales et des informations portant sur les interactions physiques entre les sous-systèmes transmises par le réseau de communication. Il les traite et élabore ses commandes puis diffuse le résultat de son traitement sur le réseau. Le résultat de ce traitement contient, outre les commandes locales, les informations concernant les interactions subies par le sous-système S_i . Les algorithmes de commande FTC et du filtre de diagnostic FDI locaux sont implantés sur le calculateur embarqué \mathcal{C}_i que nous désignerons aussi sous le vocable de *contrôleur*.

Le but de notre contribution est de proposer une structure de système tolérante aux

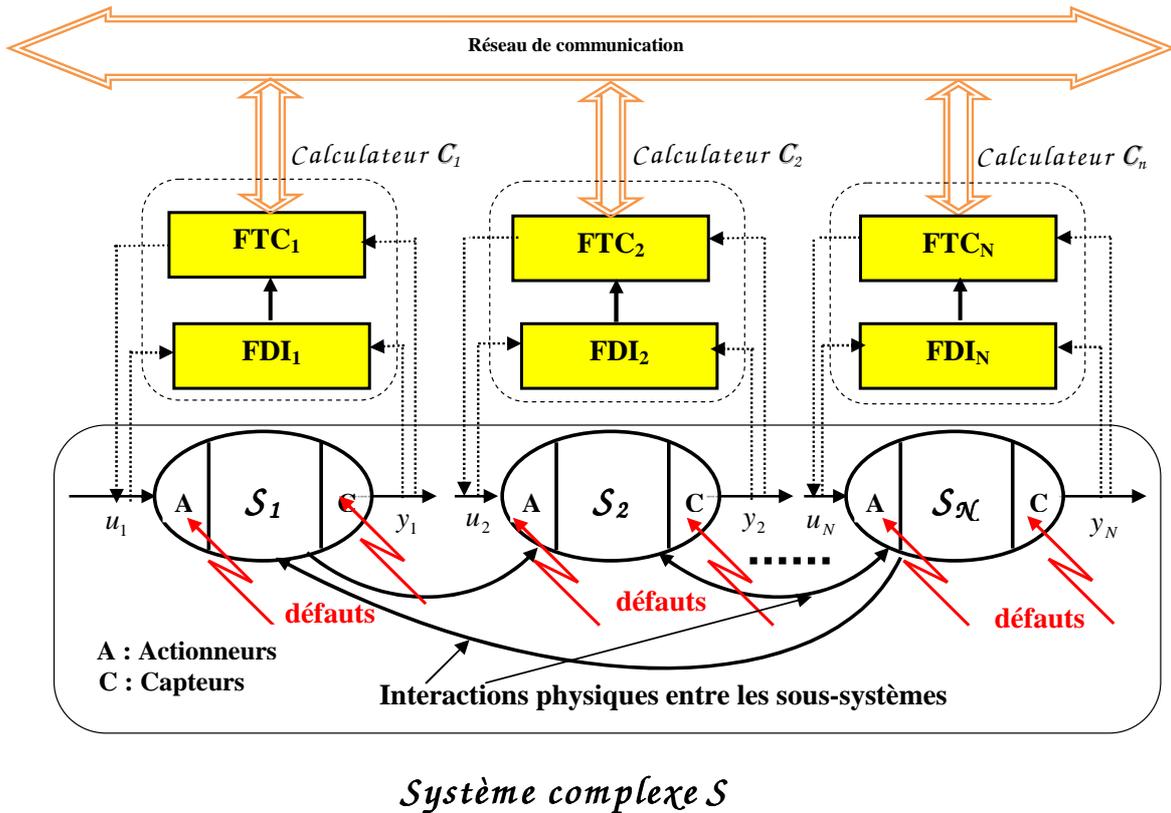


FIG. 1.1 – La structure de commande coopérative embarquée et tolérante aux défauts.

défauts à partir d'un algorithme de commande prédictive distribuée reposant sur une communication entre les contrôleurs locaux. La tolérance aux défauts dans le cas des systèmes complexes s'exprime par la capacité du système à atteindre ses objectifs en dépit de défauts affectant un ou plusieurs sous-systèmes S_i . Cette structure se fonde sur un diagnostic local dont la fonction est de détecter et estimer les composants défaillants au sein du sous-système S_i sans avoir recours à un niveau supérieur.

Plan du mémoire

Le chapitre 2 brosse un panorama des principales méthodes de commandes tolérantes aux défauts dans des systèmes dynamiques complexes. Les commandes tolérantes sont réparties suivant deux grandes catégories :

- les lois de commandes tolérantes aux défauts passives ;
- les lois de commandes tolérantes aux défauts actives.

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les méthodes actives nécessitant une étape de diagnostic pour leur mise en œuvre. La première partie du chapitre traite du diagnostic à base de modèle appliqué au cas général des systèmes dynamiques. Dans une deuxième partie, le principe de la tolérance aux défauts est présenté. L'objectif de ce chapitre est de souligner

la problématique de l'intégration des fonctions de diagnostic et de tolérance aux défauts au sein d'un système complexe. Le chapitre 3 est dédié à l'étude des systèmes complexes et en particulier aux contraintes liées à la mise en œuvre de leurs commandes. Dans une première partie, un ensemble de définitions sur la complexité est rappelé. Des procédures de décomposition des systèmes sont présentées, ainsi que les structures de commandes qui leurs sont associées. Il s'agit de dégager parmi les structures existantes, celle qui s'adapte le mieux au développement d'un système distribué tolérant aux défauts. Cette structure dite "structure distribuée" et qui sera retenue dans la suite du mémoire, est capable de prendre en compte les interactions dynamiques fortes entre les sous-systèmes pour élaborer la loi de commande. La deuxième partie de ce chapitre traite des aspects nécessaires à la synthèse d'une loi de commande MPC dans un cas général. Des indications liées au choix des paramètres de réglages sont rappelées. La commande MPC est synthétisée avec un formalisme d'une représentation d'état afin de simplifier la procédure de décomposition du modèle global représentant le système complexe. Nous proposons ensuite d'établir une structure de commande distribuée, mieux adaptée à un système complexe donné.

Le chapitre 4 est consacré à l'intégration des fonctions de diagnostic et de tolérance aux défauts au niveau de la structure introduite au chapitre 3. La stratégie de commande tolérante aux défauts, dans le cas des systèmes interconnectés, se fonde sur une étape de diagnostic local établi pour chaque sous-système. Le système de diagnostic local repose sur l'utilisation d'un ensemble d'observateurs capables de détecter et d'estimer les défauts. Les estimations en ligne des défauts sont utilisées pour la mise à jour des modèles des sous-systèmes. Les commandes locales développées à partir d'algorithmes de la commande prédictive et présentées au chapitre 3 échangent des informations entre elles au moyen du réseau de communication. Divers scénarios de défauts sont traités afin de mettre en évidence l'efficacité de l'approche proposée.

Chapitre 2

Surveillance et commande tolérante aux défauts à base de modèle

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les performances des équipements industriels ont considérablement été augmentées. Le gain en performance (dont la métrique dépend du système considéré) s'est tout naturellement accompagné d'un accroissement de la complexité des installations. L'intégration de calculateurs très performants dans les systèmes automatisés, a permis de développer des algorithmes sophistiqués tant au niveau du contrôle/commande qu'au niveau du traitement des données.

Cependant, la capacité à effectuer les tâches pour lesquelles le système a été conçu, peut être entravée par l'apparition de phénomènes anormaux qui sont les défauts. Il peut alors s'en suivre des fonctionnements non désirés, voir catastrophiques. Pour pallier aux problèmes liés à l'apparition d'un ou de plusieurs défauts, la communauté scientifique ainsi que nombre d'industriels, se sont tournés vers le développement de fonctions de surveillance et de solutions de tolérance aux défauts. Ces systèmes de commande/surveillance ayant la capacité de s'accommoder aux défauts, permettent d'assurer à la fois les performances désirées et la sûreté de fonctionnement des procédés industriels. De façon générale, le système de commande tolérant aux défauts aura pour but de maintenir des performances proches de celles désirées tout en préservant la stabilité, non seulement en l'absence de défauts mais également en présence de composants défaillants. Si les performances initiales ne peuvent plus être garanties, un système de commande tolérant aux défauts doit assurer au moins des performances dégradées acceptables.

Les systèmes tolérants aux défauts peuvent être divisés en deux classes ([Patton, 1997](#)) : les systèmes de commande tolérante active (AFTC pour Active Fault Tolerant

Control System) et les systèmes de commande tolérante passive (PFTC pour Passive Fault Tolerant Control System) aux défauts. Les PFTC sont conçus sur la base d'un ensemble de défauts probables. Ils utilisent les techniques de la commande robuste pour assurer que le système en boucle fermée demeure insensible à certains défauts avec des contrôleurs constants. Ce type d'approche ne nécessite pas d'information en ligne sur les défauts affectant le système (Steffen *et al.*, 2009), (Niemann et Stoustrup, 2005). A l'opposé, les méthodes AFTC se distinguent des méthodes PFTC par le fait qu'elles requièrent l'utilisation d'un module FDI et une synthèse en ligne du contrôleur (Patton, 1997) et (Zhang et Jiang, 2008).

Les deux principaux avantages des AFTC sont :

- la capacité à faire face à des défauts inconnus grâce à un module de détection et de localisation des défauts et de reconfiguration de la commande ;
- la possibilité d'atteindre aux mieux les performances nominales.

Pour ces deux raisons, nous choisissons de nous orienter vers la commande tolérante active (AFTC).

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différentes méthodes de surveillance à base de modèle, ensuite nous exposons brièvement la commande tolérante passive avant de nous étendre sur la commande tolérante active aux défauts. Cette dernière nécessite d'avoir en amont de la commande un système de surveillance capable de détecter et de localiser les défauts et dans certains cas d'estimer (identifier) les défauts.

2.2 Terminologie et définitions

Nous présentons dans ce paragraphe la définition des termes principaux utilisés dans dans ce manuscrit.

- *défaillance* : c'est la cessation de l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise.
- *défaut* : un défaut est défini comme une déviation des paramètres du système par rapport à ses valeurs nominales. (Blanke *et al.*, 2003).
- *défaut actionneur* : un défaut actionneur représente une perte totale ou partielle d'une action de commande agissant sur le système.
- *défaut capteur* : un défaut capteur est une altération de l'information de l'état physique du système.
- *biais* : le biais est un écart constant par rapport à la valeur nominale du signal.
- *dérive* : une dérive est une croissance lente et continue d'un signal par rapport à sa valeur nominale.

2.3 Surveillance à base de modèle

La surveillance est définie comme l'ensemble des actions mises en œuvre pour générer un résidu, détecter, localiser et identifier tout défaut. La détection concerne la mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution d'un système. De façon générale, un événement traduit un changement de situation sans préjuger du fait qu'il soit normal (dû à une action délibérée de la part d'un opérateur par exemple) ou anormal (dû à un défaut par exemple). Détecter consiste alors à comparer le fonctionnement réel du système avec ce qu'il devait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal. La tâche de localisation circonscrit le défaut à un sous-ensemble du système surveillé. Elle consiste à analyser les événements de façon à pouvoir déterminer les défauts d'instruments de mesures (défauts de type capteur), les défauts d'actionneurs ou les composants défaillants du système.

Pour répondre à cette démarche de surveillance, plusieurs approches ont été développées durant ces dernières décennies. Certaines d'entre elles font appel à une connaissance du système constituée par la formulation explicite d'un modèle analytique du système; ce sont les méthodes dites *analytiques* qui appartiennent à la famille du "diagnostic quantitatif".

La redondance analytique présente une alternative intéressante à la redondance matérielle. La redondance d'information dans ce cas est assurée par un modèle du système par opposition à la redondance matérielle qui s'appuie sur une duplication des instruments. Les premiers travaux dans ce domaine remontent au début des années 70, avec les travaux de R.V. Beard ([Beard, 1971](#)). Les modèles analytiques étant une représentation mathématique des lois d'évolution des variables physiques du système, le système y est décrit par un ensemble d'équations issues des lois de la physique. Les procédés ainsi modélisés ne suivent pas toujours une telle représentation idéale à cause de la présence d'incertitudes sur les paramètres du modèle, des modifications structurelles du système, des non-linéarités, de l'effet des perturbations et des bruits de mesure. Le modèle sert donc de référence pour la détection de défauts, et la qualité du résultat dépend directement de la qualité du modèle. La mise en œuvre de ces méthodes nécessite donc une modélisation précise.

Le principe des approches analytiques (où approches à base de modèles), repose sur la comparaison du comportement réel du procédé caractérisé par les données de sorties au comportement théorique fournies par le modèle analytique et le résultat de cette comparaison est généré par un ensemble de signaux indicateurs de défauts appelés résidus. Une stratégie permet d'évaluer ces résidus et de décider du caractère significatif ou non des défauts qui se produisent dans le système.

2.4 Conception d'un système de surveillance

La maîtrise de la surveillance des systèmes repose sur la capacité à produire des indicateurs révélateurs de leur état de fonctionnement. Ceux-ci doivent pouvoir détecter rapidement l'occurrence d'un défaut et le discriminer d'autres phénomènes : perturbations, bruits, incertitudes. En effet, l'efficacité des actions menées en présence de défauts est tributaire de la quantité et de la qualité des informations portées par ces indicateurs.

La fonction de diagnostic regroupe les tâches de détection, de localisation et de l'identification. L'acronyme anglo-saxon FDI sera utilisé pour désigner le diagnostic. La fonction de surveillance fait intervenir les techniques de génération de résidus et de diagnostic. Ce système est schématisé sur la figure 2.1. La mise en œuvre d'un système de surveillance

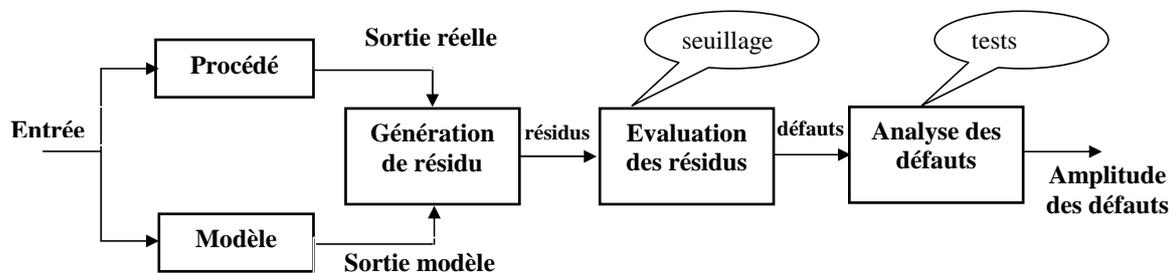


FIG. 2.1 – Les étapes de la surveillance par la redondance analytique.

basée sur l'utilisation de modèles peut être divisée en deux étapes principales :

- la génération de résidus et ;
- le diagnostic du défauts.

Lors de la première étape, les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour générer des indicateurs de défauts (le signal résidu), ces résidus sont ensuite traités par le bloc de diagnostic pour la détection, la localisation et l'identification.

2.4.1 Génération de résidu

La première étape dans la mise en œuvre d'un système de surveillance à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts c'est-à-dire, un signal mettant en évidence la présence d'un défaut. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures issues du procédé et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. La qualité de la génération de résidus est un élément essentiel pour garantir les performances d'un système de diagnostic. Pour autant, la génération de résidus est un problème crucial pour le système de diagnostic.

Dans le cas linéaire, la problématique de génération des résidus se formule par la construction d'un vecteur $r(t)$ à partir des signaux d'entrée $u(t)$ et de sortie $y(t)$ du

procédé

$$r(t) = H_u u(t) + H_y y(t) \quad (2.1)$$

de façon à satisfaire à un cahier des charges donné. Ce cahier des charges est généralement formulé en terme de spécifications de robustesse vis-à-vis des perturbations internes (telles que les incertitudes paramétriques, les dynamiques mal connues, etc.) et externes (perturbations exogènes) et de sensibilité vis-à-vis des défauts. Dans cette formulation, $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ et $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ désignent respectivement les vecteurs de mesure et de commande, et H_y et H_u sont des filtres dynamiques stables. L'analyse du comportement temporel et/ou fréquentiel du vecteur r doit alors permettre de remplir complètement la tâche de diagnostic.

Dans les années 80 et 90, des travaux de recherche méthodologique ont permis de proposer de nombreuses techniques permettant de synthétiser H_y et H_u . De très bons états de l'art de ces méthodes peuvent être trouvés dans la liste non exhaustive des références suivantes (Patton *et al.*, 2000; Patton et Chen, 1991; Isermann, 2005a; Blanke *et al.*, 2003; Frank *et al.*, 2000). Il est maintenant admis de la communauté du diagnostic à base de modèles, que ces approches peuvent être classées comme suit :

- **Identification paramétrique** (Isermann, 1984) : dans cette approche, on ne génère pas réellement un vecteur de résidus, mais on estime un vecteur de paramètres dont la variation à l'extérieur d'une plage de référence traduit l'apparition d'un défaut dans le système surveillé. Cette variation peut alors être détectée à l'aide d'un test de décision dans l'espace paramétrique. La figure 2.2 illustre l'approche proposée à base de modèle.

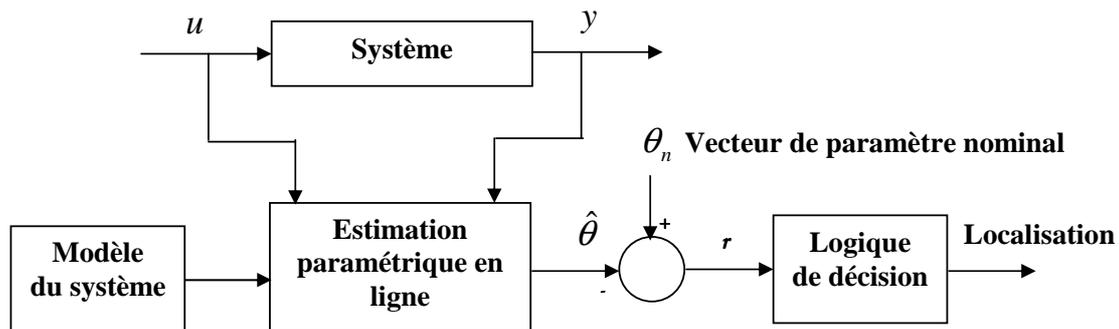


FIG. 2.2 – Principe de la génération de résidus par estimation paramétrique.

- **Espace de parité** (Patton et Chen, 1991; Chow, 1981) : les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les états inconnus à l'aide de redondances. Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une fenêtre d'estimation donnée. 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).

Considérons un système linéaire de la forme (Gertler, 1998) :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

où x, u, y sont le vecteur d'état, le vecteur des entrées de commande et le vecteur des sorties mesurées respectivement. A partir des équations (2.2) et par dérivation successive de la sortie, nous obtenons l'égalité suivante :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{Y_f(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \end{bmatrix}}_T x(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots \\ CB & 0 & 0 & \cdots \\ CAB & CB & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}}_Q \underbrace{\begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{U_f(t)} \quad (2.3)$$

que nous pouvons également noter sous la forme :

$$Y_f(t) = Tx(t) + QU_f(t) \quad (2.4)$$

Afin d'éliminer tous les états $x(t)$ non mesurables, l'équation (2.4) est multipliée par une matrice W , appelée matrice de projection telle que :

$$WT = 0 \quad (2.5)$$

Ceci nous conduit naturellement aux résidus :

$$r(t) = WY_f(t) - WQU_f(t) \quad (2.6)$$

La figure 2.3 illustre les calculs précédents sous forme de schéma bloc. Ainsi, les entrées et sorties filtrées U_f et Y_f sont obtenues en dérivant les signaux correspondants.

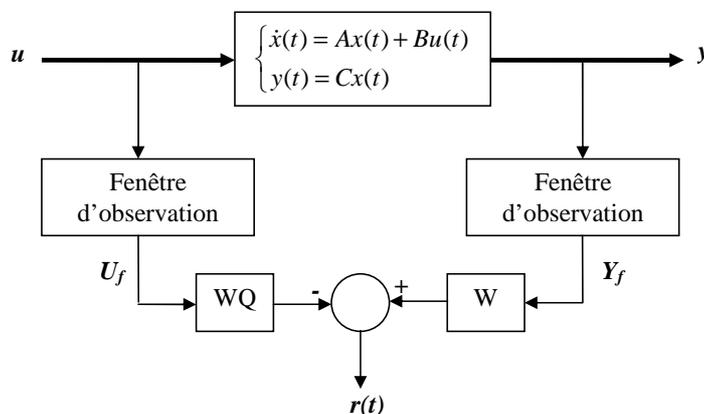


FIG. 2.3 – Principe de la génération de résidus par espace de parité.

- **Les approches à base d'observateurs ou de filtres** (Beard, 1971)(Massoumnia, 1986) : 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 dans le sens qu'elles permettent le calcul de l'erreur d'estimation de la sortie. L'observateur consiste en un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'erreur de sortie. L'estimation de l'état peut être effectuée à l'aide d'observateurs (Luenberger, 1971) dans le cas déterministe ou de filtres dans le cas stochastique (filtre de Kalman (Willsky et Jones, 1976)). Les deux méthodes présentent des analogies dans leur formulation et peuvent être synthétisées comme indiquées à la figure 2.4, la différence provenant du mode de calcul des paramètres du reconstituteur en fonction du contexte choisi (cas continu ou discret, déterministe ou stochastique).

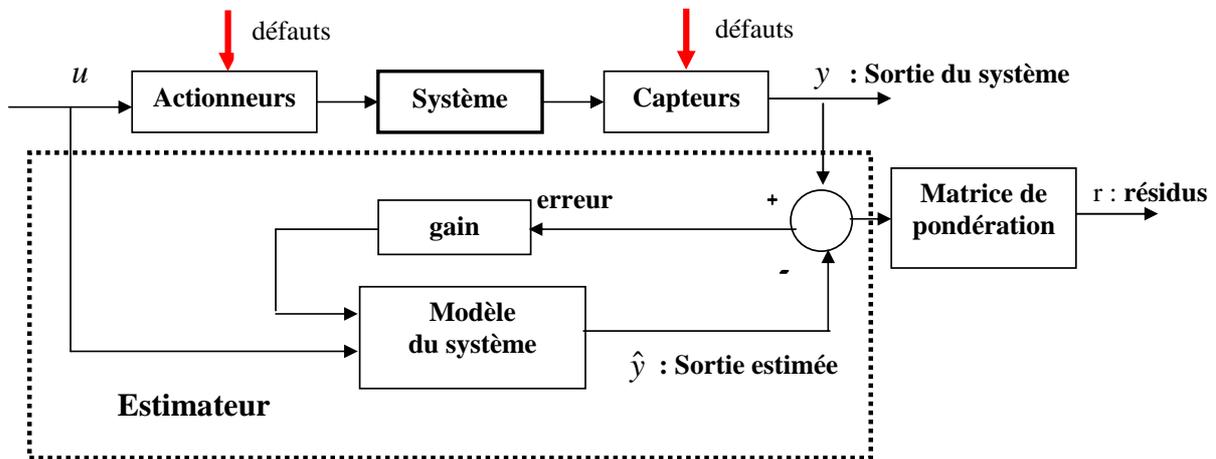


FIG. 2.4 – Principe général d'un observateur.

Un observateur de Luenberger a la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

avec le résidu donné par la formule suivante :

$$r(t) = V(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)), \quad V : \text{une matrice de pondération} \quad (2.8)$$

- **Les approches basées sur la synthèse directe de filtre de diagnostic** : dans ces approches, on cherche directement une réalisation du filtre de diagnostic $F(s) = \begin{pmatrix} H_y(s) & H_u(s) \end{pmatrix}$ (voir équation (2.1)) tel que $r(t) = F \begin{pmatrix} y(t) \\ u(t) \end{pmatrix}$ satisfait aux propriétés spécifiées (e.g. de robustesse et sensibilité). Les deux approches les plus répandues sont celles qui visent à estimer directement les défauts (dans ce cas r prend le sens d'une estimation (Henry et Zolghadri, 2006; Stoustrup et Niemann,

2002)) et celles qui visent à générer un vecteur de résidu r destiné à être traité dans la chaîne de diagnostic au sens classique du terme (Ding *et al.*, 2000; Hammelin et Sauter, 2000).

Notons que (Ding *et al.*, 2000) a montré que toutes ces approches étaient des paramétrisations particulières de la relation (2.1). Les travaux de (Gertler, 1995; Garcia et Frank, 1996; Patton et Chen, 1991) ont également fortement contribué à montrer les équivalences entre ces différentes approches.

En résumé, la génération de résidu est propre à la méthode utilisée et la qualité de la génération des résidus est un élément essentiel pour garantir les performances d'un système de surveillance.

2.4.2 Diagnostic des défauts

Durant la seconde étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a ou non présence de défaut (détection), sur quelle composante du système il est intervenu (localisation) et pour déterminer la nature du défaut et sa cause (identification).

En général, la tâche de diagnostic de défauts s'articule autour de trois activités principales :

1. la détection permet de détecter un dysfonctionnement dans le système et signale la présence d'un défaut ; l'alarme est déclenchée lorsque la valeur du résidu dépasse un seuil ;
2. la localisation des défauts consiste à cerner les éléments défaillants du système ;
3. l'identification des défauts consiste à déterminer des caractéristiques des défauts telles que leur amplitude ou leur dynamique.

En régime de fonctionnement normal, le résidu est statistiquement nul (pas d'incertitude de modèle, ni de bruits de mesure) et s'écarte notablement de zéro en présence de défaut. La principale difficulté de la détection réside dans le calcul du seuil des résidus. Un seuil trop grand risque d'engendrer une non-détection. Au contraire, un seuil trop petit entraînera de fausses alarmes. La problématique est donc de trouver un seuil optimal qui constituera le compromis idéal entre un taux de fausse alarme et un taux de non-détection minimum.

L'évaluation des résidus consiste donc à optimiser le problème de seuillage des résidus. Si l'on considère la sensibilité des résidus aux défauts, l'évaluation des résidus "r" deviendra un problème de seuillage, i.e., déterminer un vecteur de seuils ε tel que :

$$\forall i : r_i(t) \geq \varepsilon_i \quad \text{pour un système en défaut;}$$

$$\forall i : r_i(t) < \varepsilon_i \quad \text{pour un système sans défaut.}$$

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 connaissance de formes ou en utilisant des seuils adaptatifs qui évoluent en fonction du point de fonctionnement du procédé surveillé.

Lorsqu'un défaut est détecté, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer son origine. La procédure de localisation nécessite d'utiliser un ensemble (ou vecteur) de résidus. Pour permettre la localisation, le vecteur de résidus doit avoir un certain nombre de propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. Deux méthodes peuvent être utilisées :

1. la construction de résidus structurés ;
2. la construction de résidus directionnels.

Pour plus de détails le lecteur pourra se référer à [Chen et Patton \(1999\)](#).

La dernière étape du bloc de diagnostic qui vient après la localisation est l'identification. L'objectif de cette étape consiste à déterminer (identifier) les caractéristiques précises du défaut. L'obtention d'une identification (ou estimation) du défaut permet bien entendu de donner une image beaucoup plus précise de l'état du système mais aussi et surtout permet de mettre en œuvre des techniques de commande tolérante aux défauts.

2.4.3 Critères de performance pour le diagnostic

Il s'agit ici de présenter les principaux critères permettant d'évaluer les performances d'un système de diagnostic. De manière générale, on relève quatre principaux critères.

1. **La détectabilité** est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'un défaut sur le processus. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus) : le générateur de résidus doit, d'une certaine manière, être sensible au défaut que l'on souhaite détecter. Il faudra en fait se fixer un compromis entre le taux de fausses alarmes et celui de non-détection.
2. **L'isolabilité** est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Un défaut engendre souvent une cascade d'alarmes et il peut être difficile de remonter à l'organe défaillant. Le degré d'isolabilité des défauts est lié à la structure des résidus rendus disponibles et à la procédure de détection mise en œuvre.
3. **La sensibilité** caractérise l'aptitude du système de diagnostic à détecter des défauts d'une certaine amplitude, elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport entre le bruit de mesure et le défaut.
4. **La robustesse** détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations, des entrées inconnues et des bruits).

Outre les critères cités précédemment, d'autres critères sont à prendre en considération ; nous citons l'aspect temps réel qui est un facteur prépondérant pour un système de diagnostic embarqué.

2.5 Système de commande tolérante aux défauts

Une fois le défaut détecté, localisé et identifié, se pose la question de savoir quelle stratégie adopter afin de permettre au système d'assurer la tâche pour laquelle il a été conçu. Cette question conduit à la notion générale de systèmes de commande tolérante aux défauts. De toute évidence, la stratégie à employer dépend fortement de facteurs tels que la gravité des défauts, ou le degré de redondance matériel de l'installation.

Depuis plusieurs d'années, les recherches en commande tolérante aux défauts font l'objet de nombreux travaux. Les auteurs (Patton, 1997; Zhang et Jiang, 2006; Isermann, 2005b; Zhang et Jiang, 2008) et (Jiang, 2005) ont proposé des synthèses bibliographiques intéressantes. Les livres de (Blanke *et al.*, 2003) et (Mahmoud *et al.*, 2003) constituent des ouvrages de références généralistes pour le premier et spécifique pour le second. Différents cas concrets à titre d'exemple dans le domaine aéronautique rapportés dans (Zhang *et al.*, 2008b) et (Alwi et Edwards, 2006; Staroswiecki *et al.*, 2006) montrent qu'en présence de défauts, il est nécessaire pour les équipages et les systèmes de bord de disposer rapidement d'informations précises quant à l'état du système, mais aussi de solutions aux problèmes rencontrés en termes de lois de commande. Un système tolérant aux défauts a pour objectif de permettre le maintien des objectifs proches de ceux désirés non seulement en l'absence de défauts mais également en présence de composants défectueux. Il est très important de préciser que les objectifs à atteindre durant ces deux modes de fonctionnement sont différents. Dans le mode nominal, des objectifs de qualité sont à assurer, en revanche en présence de défauts, des objectifs dégradés peuvent être acceptés (Zhang *et al.*, 2005).

En général, un système tolérant aux défauts est constitué de quatre blocs essentiels :

1. un bloc diagnostic ;
2. un superviseur ;
3. un contrôleur reconfigurable ;
4. un bloc de gestion des références (Zhang et Jiang, 2003).

Le schéma général d'un système muni d'un système tolérant aux défauts est présenté sur la figure 2.5. Il montre :

1. le système commandé muni de son contrôleur, de ses actionneurs et de ses capteurs ; ainsi que les défauts pouvant affecter ces derniers ;

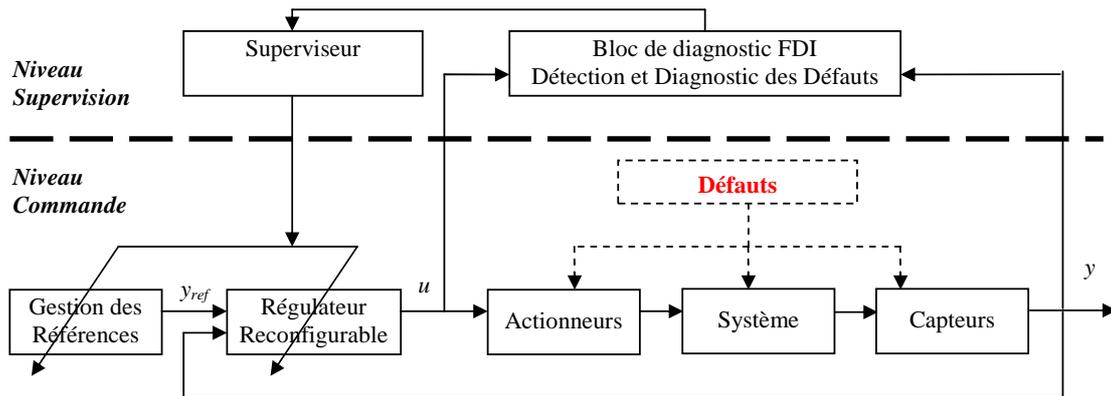


FIG. 2.5 – Structure générale du système tolérant aux défauts.

2. un système de diagnostic (FDI) qui surveille le procédé en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc diagnostic délivre des informations au superviseur sur l'état du système ;
3. un superviseur qui, en cas de défaut, exploite ces informations et redéfinit les consignes et les modifications à apporter aux lois de commande (Fault Tolerant Control ou FTC). Notons que peu de chercheurs ont intégré le bloc de gestion des références dans leurs travaux tel que présenté dans les articles ([Zhang et al., 2008b](#)) et ([De-Almeida et Leissing, 2009](#)).

2.5.1 Lois de commande tolérante aux défauts

Les lois de commande tolérante aux défauts visent à garantir au mieux, pour un système défaillant, certaines performances ou atteindre certains objectifs :

- la stabilité ;
- la poursuite d'une trajectoire de référence.

Comme mentionné dans l'introduction, la commande tolérante aux défauts est classée en deux catégories distinctes comme illustrées à la figure 2.7 : les méthodes de commande passives (PFTC) et les méthodes de commande actives (AFTC). Le choix d'une méthode dépend du niveau de performance souhaité et de la gravité des défauts considérés. Les méthodes PFTC ne requièrent pas la présence d'un module de diagnostic et utilisent les techniques de la commande robuste ([Stoustrup et Blondel, 2004](#); [Zhou, 2000](#)). Ces méthodes passives ont en conséquence une faible capacité de tolérance aux défauts. Par contre, les méthodes AFTC se distinguent des méthodes PFTC par l'utilisation d'un module FDI ([Tyler et Morari, 1994](#)) et par une synthèse en ligne du contrôleur ([Patton, 1997](#)). Les méthodes actives sont amenées à réagir aux divers défauts du système en modifiant en ligne les lois de commande afin de maintenir l'objectif global, i.e., la stabilité et les performances du système de commande. Elles tolèrent des défauts plus sévères

et la tenue de performances est supérieure à celles utilisant des méthodes passives. Les méthodes actives se déclinent en deux classes de stratégies. Pour ces deux stratégies, les lois de commande adéquates peuvent être soit sélectionnées parmi un ensemble de contrôleurs pré-calculés hors-ligne (méthodes de projection), soit calculées en ligne. La première approche requiert une charge de calcul moindre mais suppose les défauts a priori connus. La sélection du contrôleur associé au mode de fonctionnement actif (présent) est effectuée par le superviseur, qui est constitué d'un ensemble d'estimateurs permettant la reconstruction des sorties du système pour chaque mode de fonctionnement. Après avoir évalué les performances de chaque mode, le contrôleur adéquat est sélectionné comme illustré à la figure 2.6. Cette approche a fait l'objet de plusieurs travaux notamment (Moerder *et al.*, 1989) et (Zhang et Jiang, 2001). Cette approche semble peu commode

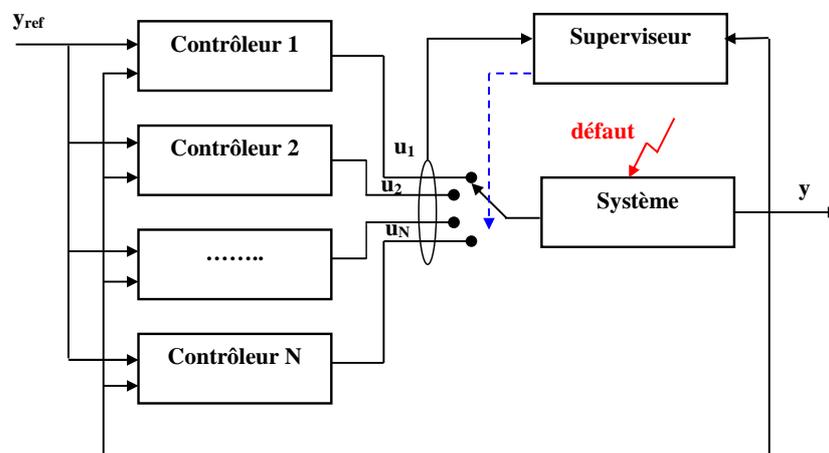


FIG. 2.6 – Le principe de la commande AFTC pré-calculée.

dans le cas d'un traitement d'un nombre important de défauts car il faut également un nombre important de contrôleurs à synthétiser. De ce fait, nous nous intéressons davantage à la seconde approche fondée sur la synthèse d'une nouvelle loi de commande en ligne.

La seconde approche permet de traiter le cas des défauts a priori non identifiés mais elle suppose une identification en ligne des paramètres du système. En fonction de l'impact du défaut sur les performances du système (perte partielle ou totale de leur capacité d'opération) et des informations qui peuvent être fournies par le bloc diagnostic, deux cas peuvent être considérés : la reconfiguration ou la restructuration. En réalité, les différents travaux qui traitent de ce sujet ne présentent pas des définitions précises et utilise indifféremment les termes "accommodation aux défauts", "tolérance aux défauts", "reconfiguration" et "restructuration". Dans (Noura, 2002), l'auteur a défini la reconfiguration et la restructuration comme suit

Reconfiguration :

Selon la gravité des défauts et de la redondance matérielle disponible, une stratégie de reconfiguration peut être mise en œuvre afin d'ajuster en ligne les paramètres

du contrôleur lorsque le défaut peut être accommodé sans trop dégrader les performances nominales du système. Les objectifs nominaux pré-définis sont conservés. Le nombre de sorties à asservir et le nombre d'entrées de commande valides restent inchangés.

Restructuration :

Lorsqu'il n'est plus possible de préserver les performances en sortie du système, une stratégie de restructuration permet de commander le procédé en mode dégradé, en utilisant le meilleur compromis possible entre tous les objectifs nominaux et assure l'arrêt du système en toute sécurité dans un futur proche. Une modification de la structure du système est nécessaire. Par exemple, dans le cas d'une perte totale d'un actionneur ou d'un composant, l'asservissement de toutes les sorties du système ne peut plus être assuré. La restructuration pourrait consister à établir une priorité entre ces sorties à réguler.

D'autres définitions fondamentales de ces termes ont été proposées par (Staroswiecki et Gehin, 2001) et (Blanke *et al.*, 2003). De manière générale, les différentes méthodes traitant le problème de la commande tolérante aux défauts peuvent être résumées par la figure 2.7.

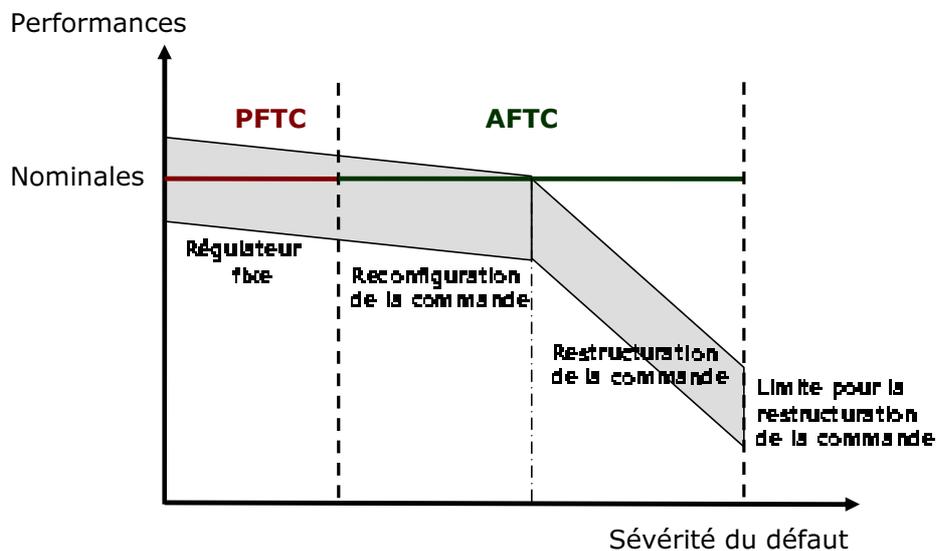


FIG. 2.7 – Types des systèmes tolérants aux défauts.

De très bons états de l'art sur l'analyse de ces méthodes peuvent être trouvés dans la liste non exhaustive des références suivantes : (Blanke *et al.*, 2003), (Zhang et Jiang, 2008), (Kanev, 2004), (Zhang et Jiang, 2006), (Cieslak, 2007). Dans ces références, on peut identifier les principales méthodologies pour la conception de stratégies d'accommodation de défauts :

- la méthode de la pseudo-inverse ;

- le placement de structure propre ;
- la commande par gain séquencé ;
- l'approche par modèle de référence ;
- l'approche multi-modèle ;
- la commande adaptative ;
- la commande prédictive à base de modèle.

La méthode pseudo-inverse (en anglais Pseudo-Inverse Method) ([Huang et Stengel, 1990](#)), ([Gao et Antsaklis, 1991](#)) consiste à modifier la loi de commande par retour d'état de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée soit approximativement égale à celle du système nominal en boucle fermée en minimisant un critère donné. Le principal inconvénient relatif à cette méthode réside dans le fait que la loi de commande optimale ne garantit pas toujours la stabilité en boucle fermée du système défaillant. Pour palier à ce problème, la méthode pseudo-inverse modifiée a été développée dans ([Gao et Antsaklis, 1992](#)) en ajoutant une contrainte supplémentaire telle que le système en boucle fermée soit stable. D'autres modifications et améliorations de cette méthode ont par la suite été proposées dans la littérature, dans ([Staroswiecki, 2005a](#)) la méthode de la pseudo-inverse a été remaniée en utilisant un ensemble de modèles admissibles plutôt qu'une recherche optimale ne garantissant pas une certaine dynamique du système lors de la présence d'un défaut. Notons que cette technique n'a pas été étendue au cas des systèmes incertains.

La méthode de placement de structure propre pour la conception de loi de commande tolérante aux défauts a été introduite initialement par ([Andry *et al.*, 1983](#)) et a fait l'objet de plusieurs publications, par exemple ([Konstantopoulos et Antsaklis, 1996](#)), ([Wang et Lin, 2000](#)), ([Zhang et Jiang, 2002a](#)). L'avantage de cette approche comparée à la méthode de la pseudo-inverse réside dans le fait que la solution fournie (si elle existe), assure la stabilité de la boucle fermée du système défaillant.

La loi de commande par séquençement de gain appartient à la classe des méthodes à base de projection ([Rugh, 1992](#)), ([Stiwell et Rugh, 1999](#)). Cette méthode a été largement appliquée au domaine de l'aéronautique où un contrôleur ne peut remplir l'ensemble des objectifs de performance et de robustesse sur la totalité du domaine de fonctionnement (situation nominale et défaillante). L'idée consiste alors, à partir d'une structure d'une loi de commande FTC fixe, à modifier la valeur des gains du contrôleur FTC en fonction de certains paramètres physiques variant avec le temps (la vitesse d'un véhicule, l'altitude, la masse, etc.) et/ou en fonction d'un résultat de diagnostic.

La méthode de poursuite de modèle est une approche FTC active séduisante qui permet de concevoir une nouvelle loi de commande telle que les performances du système défaillant commandé s'approche le plus possible de celles d'un modèle de référence, au sens d'un critère ([Zhang et Jiang, 2002b](#)), ([Staroswiecki, 2005b](#)).

La plupart des stratégies d'accommodation aux défauts ont été développées pour le cas de modèles linéaires. Certaines techniques citées précédemment, telles que les méthodes par modèle de poursuite, pourraient être appliquées à des systèmes non-linéaires en utilisant la stratégie de commande non-linéaire par linéarisation entrées/sorties. Mais la commande non-linéaire reste difficile à mettre en œuvre sur des systèmes industriels complexes parce que le modèle non-linéaire est souvent très difficile, voire impossible, à obtenir.

Une autre démarche, consistant à utiliser les techniques multi-modèles, attire l'attention de nombreux chercheurs pour résoudre le problème de l'accommodation dans les systèmes non-linéaires ([Theilliol *et al.*, 2003](#)),([Rodrigues, 2005](#)). En effet, ces techniques permettent de commander un système non-linéaire sur une large zone de fonctionnement décomposée en plusieurs zones linéarisées autour de différents points de fonctionnement. Des techniques applicables aux systèmes linéaires restent alors utilisables dans le cadre des systèmes décrits par de multiples modèles.

La commande adaptative est une commande très appropriée dans le cadre de la commande active tolérante aux défauts. En effet, ce type de commande est capable d'adapter automatiquement les paramètres du contrôleur en fonction des changements du système. Ce type de méthode ne requiert donc pas de module FDI comme dans le cas des approches AFTC. Les méthodes de commandes avec paramètres linéaires variant dans le temps ou Linear Parameter Varying (LPV) dédiées au FTC sont incluses dans la classe des commandes adaptatives comme celles développées dans la thèse de ([Kanev, 2004](#)). D'autres méthodes adaptatives sont proposées dans ([Tao et Joshi, 2005](#)),([Patton et Klinkhieo, 2009](#)).

Par ailleurs, le potentiel de la commande prédictive à résoudre le problème de l'accommodation aux défauts a été montré par Maciejowski ([Maciejowski, 1997](#)) . Les méthodes proposées permettent de réadapter le contrôleur en présence d'un défaut de manière à garantir la stabilité du système et à maintenir des performances très proches de celles du système nominal. On notera tout de même que l'utilisation de la commande MPC nécessite une optimisation en ligne, exigeant une grande puissance de calcul puisqu'elle consiste à résoudre, à chaque pas de temps, un problème de commande optimale, c'est-à-dire déterminer l'action de commande qui minimise un critère quadratique donné (souvent sujet aux contraintes).

Cependant, la plupart de ces méthodes sont valables sous certaines hypothèses : le modèle du défaut et de ses effets sur le système doit être parfaitement connu, les défauts considérés doivent être de faible amplitude de telle sorte que les objectifs puissent rester inchangés après l'apparition du défaut ([Maciejowski, 1999](#)).

Huzmezan et Maciejowski ([Huzmezan et Maciejowski, 1998](#)) ont traité le problème de l'accommodation aux défauts sévères apparaissant sur un avion. L'approche présentée utilise un modèle précis de l'avion qui est mis à jour lors de l'apparition du défaut. Ce modèle est associé à une commande prédictive et suppose connues les informations concer-

nant la présence du défaut. Kanev et Verhaegen (Kanev et Verhaegen, 2000) ont proposé une méthode de tolérance aux défauts pour les systèmes non linéaires. Cette méthode est fondée sur une combinaison entre les techniques multi-modèles et la commande prédictive généralisée. Cette méthode a été appliquée à un robot et à un pendule inverse.

A partir des travaux existants concernant la synthèse des lois de commande tolérante aux défauts, nous pouvons constater que dans la majeure partie de ces travaux, les chercheurs proposent des méthodes de synthèse des lois de commande dédiées à des systèmes de petite/moyenne dimensions (small/medium scale) utilisant une structure généralement centralisée, qui deviennent inadéquates, au sens de la complexité et de la charge de calcul, si nous les appliquons sur des systèmes complexes, qui exigent quant à eux de nouvelles stratégies et méthodologies de commande et de tolérance aux défauts. Pour cette classe de système, la structure de commande/tolérance aux défauts que nous favorisons dans ce rapport de thèse, est une structure qui se base sur une architecture décentralisée dans le sens de la collecte et de l'observation des mesures des sous-systèmes pour exercer une commande locale mais implicitement centralisée dans le sens où les interactions entre les sous-systèmes sont prises en compte dans les lois de commande.

2.6 Surveillance et tolérance aux défauts des systèmes complexes

En général, les systèmes complexes, e.g, les installations de fabrication, les navires, les avions, se décomposent en plusieurs sous-systèmes. Dans ce cas, la conception des systèmes de FDI/FTC reste une tâche très difficile en raison du grand nombre de capteurs et d'actionneurs présents dans le procédé. Malgré l'effort de recherche sur le développement de systèmes FTC pour les systèmes complexes, la plupart des développements réalisés dans la littérature conduisent à des solutions parfois insuffisantes et limitées.

2.6.1 Surveillance des systèmes complexes

L'accroissement de la puissance des calculateurs et des moyens de communication de données permet une intégration plus efficace des fonctions des surveillances. Ces fonctions doivent évidemment s'adapter aux structures ainsi engendrées. Or, le nombre de variables d'information qui caractérisent l'état des systèmes est une fonction de cette complexité. Dans ces conditions, la mise en œuvre d'outils d'aide à la surveillance se révèle être un élément important des systèmes de diagnostic. Pourtant, force est de constater que l'application à l'échelle industrielle de ces concepts reste encore marginale. Cet état de fait s'explique par la difficulté à obtenir des modèles des processus suffisamment fiables

et représentatifs du comportement du système sur lesquels reposent ses fonctions de surveillance. Dans certains cas et sous des hypothèses simplificatrices, les systèmes complexes peuvent être décomposés en un ensemble de sous-systèmes interconnectés.

La problématique de surveillance rassemble un certain nombre d'opérations permettant d'interpréter les données collectées afin de détecter et localiser les défauts susceptibles d'affecter le comportement du système. Dans le cas de procédés complexes constitués d'éléments interagissant les uns sur les autres, l'analyse systématique des données peut devenir une tâche fastidieuse pouvant conduire à de multiples interprétations. De plus, ces méthodes sont basées sur un type unique de connaissances (analytique, symbolique, logique,...) empêchant l'exploitation des connaissances de natures différentes. Pour référence, des travaux ont été menés dans ce domaine (Cordier *et al.*, 2000), au sein du projet de recherche IMALAIA (Intégration de Méthodes ALliant l'Automatique et l'Intelligence Artificielle).

De nombreuses méthodes fondamentales ont été développées pour traiter de la problématique du diagnostic des systèmes (Frank, 1990), (Gertler, 1998). Ces méthodes ont été classées par Venkatasubramanian en trois grandes familles

1. méthodes quantitatives à base du modèle (Venkatasubramanian *et al.*, 2003b) ;
2. méthodes qualitatives à base du modèle (Venkatasubramanian *et al.*, 2003c) ;
3. méthodes basées sur l'historique du procédé (Venkatasubramanian *et al.*, 2003a).

Pour le diagnostic des systèmes complexes, la solution alternative consiste à combiner différentes méthodes basées sur un ensemble de modules dont les fonctionnalités sont imposées par la structure ainsi que par la nature du procédé à surveiller (Frank, 1990). Dans ce cas, la difficulté de diagnostic réside dans la capacité à combiner des méthodes de nature différente ,i.e, qualitative, quantitative,... L'approche par décomposition permet donc de résoudre les problèmes de diagnostic. L'idée principale derrière cette décomposition est qu'il n'est pas nécessaire, pour localiser un composant défectueux dans un système complexe, de considérer celui-ci dans son entier. La décomposition en sous-systèmes permet ainsi d'appréhender le problème global à partir d'un certain nombre de problèmes séparables et indépendamment les uns des autres de dimensions moindres (Theilliol *et al.*, 1997). Le facteur important devient alors la capacité d'identifier les parties dissociables du système global dont les diagnostics sont indépendants du reste du système. Cette approche théorique est cependant souvent confrontée à la réalité des sous-systèmes réels qui restent plus ou moins fortement couplés. Il convient alors de s'adapter à chaque cas particulier dépendant de la nature de l'interaction entre les sous-systèmes.

2.6.2 Organisation du diagnostic

Dans ce paragraphe, nous allons passer en revue deux types d'organisation du diagnostic.

2.6.2.1 Structure décentralisée

La décomposition procède à une division horizontale au niveau des composants du système et des méthodes de diagnostic associées. Cette partition est généralement le fruit d'une analyse structurelle et fonctionnelle du système, avec comme point de départ le système complet et comme aboutissement les parties élémentaires. Si les interactions entre les sous-systèmes constituant le système complexe est faible, elles sont considérées comme des perturbations dont les effets doivent être minimisés ou négligés. Dans ce cas la supervision du système complexe global est alors dépendant de celui de ses sous-systèmes, chacun d'eux étant lié à l'état des sous-parties qui le composent.

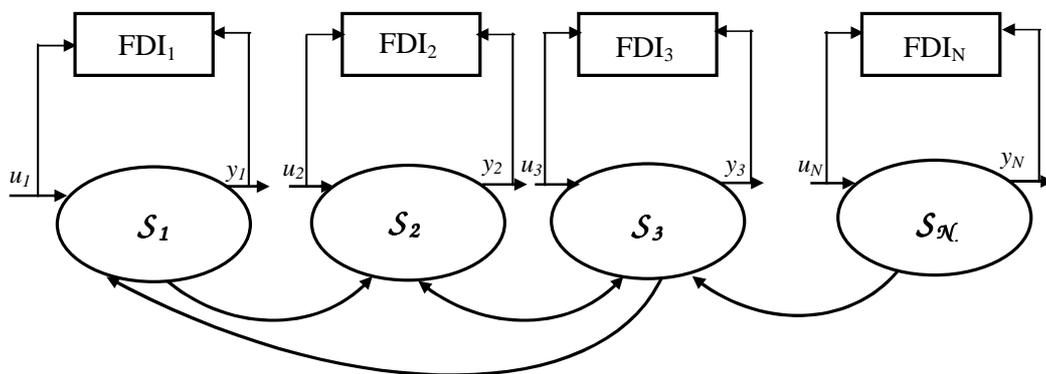


FIG. 2.8 – Décentralisation des diagnostics indépendants.

Dans (Abdullah et Ioannou, 2003), une représentation décentralisée est proposée pour réaliser la reconfiguration de commande d'un système complexe (téléscope segmenté) et la méthode des équations de parité est utilisée pour diagnostiquer les défauts capteurs. Dans (Chung et Speyer, 1998), il est proposé une structure décentralisée pour la détection et l'isolation de défaut pour surveiller un système complexe. Dans ce travail, les auteurs combinent l'estimation décentralisée et la théorie des jeux du filtre de détection de défauts. Dans (Finch et al., 1990), les auteurs décrivent une méthodologie reposant sur une décomposition fonctionnelle de l'installation. Une première étape de la procédure de diagnostic détermine le sous-système défaillant sélectionnant ainsi un ensemble de défauts possibles. Dans une deuxième étape, des règles de diagnostic propres à ce sous-système sont activées à leur tour.

2.6.2.2 Structure hiérarchique

La décomposition abordée précédemment procède à une division horizontale au niveau des composants du système et des méthodes de diagnostic associées réalisées sur un seul niveau. Pour réaliser la décomposition hiérarchique (multi-niveau), il est nécessaire d'effectuer également une division verticale, orientée de bas en haut et hiérarchisée comme le montre la figure 2.9. Une architecture de système de diagnostic basée sur la décomposition hiérarchisée du procédé a été développée par (Giraud, 1998). A chaque niveau de décomposition défini, correspond un niveau de diagnostic. Chacun d'entre eux appartient à un niveau de signification donné et est constitué par un assemblage de blocs de diagnostic appartenant à des niveaux inférieurs. L'agrégation, au sein d'un bloc, des résultats obtenus par différentes méthodes de diagnostic devient ainsi une préoccupation majeure. Ici, il s'agit en fait d'une agrégation d'informations (Leitch et Gallanti, 1992), depuis les données fournies par l'installation au travers des capteurs jusqu'à la délivrance d'indicateurs de défauts du système global.

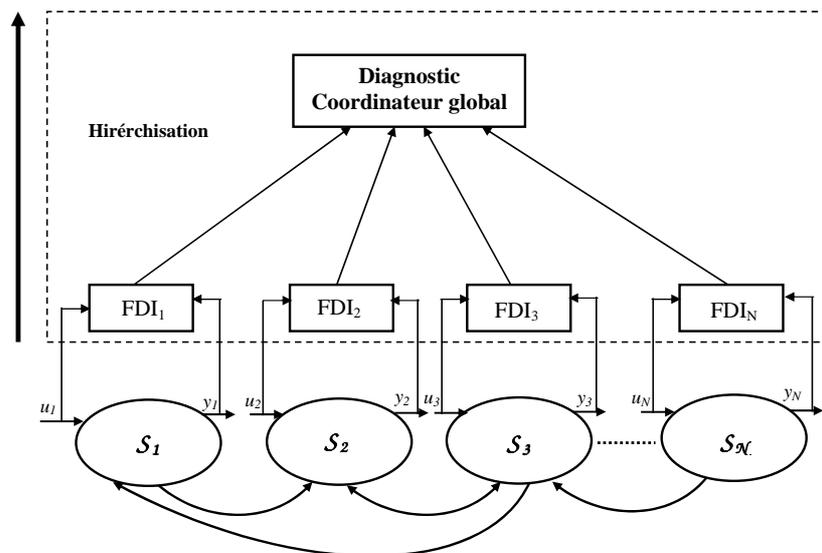


FIG. 2.9 – Hiérarchisation des diagnostics indépendants.

Chaque sous-système élabore un indicateur de son état à l'attention du sous-système hiérarchiquement supérieur en fonction de l'état de ses propres sous-systèmes. Chacun des indicateurs ainsi disponible permet de localiser un élément en défaut et la propagation de ce défaut dans le système tout entier. Les informations intermédiaires qui transitent dans ce système sont ainsi relatives à l'état des sous-systèmes.

La mise en place d'une telle démarche nécessite d'homogénéiser les résultats produits par les sous-ensembles. En effet, chacun d'eux peut être associé à une méthode de diagnostic distincte. La synchronisation des résultats fournis par chaque sous-système nécessite de dater chaque événement survenu afin de pouvoir statuer sur les causes et les conséquences

d'un défaut détecté. Une horloge centrale doit également servir de référence afin de synchroniser des sous-systèmes n'ayant pas les mêmes dynamiques, périodes d'échantillonnage ou charge de calculs. Cette approche impose une connaissance parfaite du système à surveiller en termes de fonctionnement afin d'en décomposer la structure. Sa mise en place est similaire à celle d'un puzzle où chaque diagnostic indépendant doit être intégré parfaitement afin de former avec tous les autres le diagnostic global du système. Cette approche nécessite également un support informatique adapté permettant d'intégrer cette décomposition et d'assurer la modularité du diagnostic sur chaque sous-système tout en prenant en compte la globalité du système. L'étape de génération de symptômes correspond au diagnostic des sous-systèmes et composants. L'étape d'aide à la décision prend ensuite en compte l'ensemble des symptômes afin d'émettre une opinion quant à l'état du système.

Dans (Chung *et al.*, 1994), le système de grande dimension est divisé en plusieurs sous-systèmes et les réseaux de neurones sont incorporés pour un diagnostic de défauts en ligne à base de sous-système. Dans (Sauter *et al.*, 2006), la méthode d'analyse structurale est utilisée pour le diagnostic des systèmes en réseau (NCS). De tels systèmes sont généralement composés d'un grand nombre de dispositifs interconnectés échangeant des données à travers un réseau de communication.

2.6.3 Tolérance aux défauts des systèmes complexes

Les approches présentées précédemment restent confinées à un type d'application limité (systèmes de petite/moyenne dimension, SISO,...) et pour des classes de défauts particuliers car si le concept même d'accommodation aux défauts semble être relativement simple en soi, il soulève un certain nombre de problèmes qui sont loin d'être triviaux. En effet, comment quantifier, par exemple l'impact d'un défaut sur le comportement d'un système? En observant l'évolution d'un indice de performance préalablement choisi, certes, mais alors, comment définir dans ce cas un niveau de performance acceptable pour le système? Dans la littérature, plusieurs travaux considèrent les FTC décentralisés (Huang *et al.*, 1999), (Bao *et al.*, 2003), (Abdullah et Ioannou, 2003). Dans (Bavafa-Toosi *et al.*, 2005), une transformation est proposée pour une décentralisation Entrée-Sortie des systèmes de grande dimension. En utilisant le système transformé, une condition suffisante pour une stabilisation de performance tolérante aux défauts est établie. Une introduction sur le sujet de tolérance aux défauts dans les systèmes distribués peut être trouvée dans (Lee et Anderson, 1990) et (Jalote, 1994). Bonivento *et al.* (2005) présentent un cadre unifié pour le contrôle tolérant aux défauts des systèmes distribués. En utilisant une approche fonctionnelle, une architecture de FTC modulaire et hiérarchique est présentée.

Guenab *et al.* (2005), ont développé une stratégie de commande tolérante aux défauts basée sur la fiabilité et le coût des composants d'un système complexe. Une fois le défaut détecté et isolé, l'approche proposée consiste à trouver toutes les structures possibles du système capables de préserver les performances spécifiées, à calculer la fiabilité du système et le coût pour chaque structure et finalement à déterminer la structure optimale ayant la fiabilité la plus grande et/ou le coût le plus bas. Ballé *et al.* (1997) présentent une architecture de système de diagnostic-accommodation intégrant des techniques de l'intelligence artificielle et des outils de l'automatique classique dont le but est d'automatiser la prise de décision corrective. Rauch (1994, 1995) propose les concepts de la commande supervisée autonome (autonomous supervisory control) en élaborant une structure d'un système de supervision autour de quatre fonctions principales :

- l'évaluation des performances du système ;
- la prise de décision ;
- la reconfiguration du système de commande ;
- la validation des performances du système reconfiguré.

Dans ce système, la fonction d'évaluation des performances s'apparente à un module de diagnostic donnant lieu à une prise de décision à la suite de laquelle la phase de reconfiguration est déclenchée en opérant une commutation sur un mode de repli. Blanke *et al.* (1997) proposent une architecture hiérarchisée de commande tolérante aux défauts composée de trois niveaux figure 2.10

- supervision : diagnostic-évaluation des performances ;
- accommodation ;
- commande.

Le rôle de la tâche de supervision est essentielle car c'est elle qui évalue l'état du procédé en fonction des informations qui lui sont fournies par la fonction de diagnostic et peut ensuite entreprendre une action de reconfiguration selon la nature du défaut.

On peut aboutir à une restructuration plus ou moins profonde du procédé résultant de la mise hors service d'un ou plusieurs éléments tels que des actionneurs voire des boucles de régulations complètes. Une telle éventualité exige que la fonction d'accommodation ne soit pas limitée à un rôle "d'interrupteur" d'un mode à un autre, mais qu'elle soit capable d'appréhender une situation imprévue et d'envisager une solution de repli adaptée (au défaut) permettant au système accomplir sa mission. Le rôle de l'étape de diagnostic sort du cadre de la décision binaire pour faire place à une analyse poussée du défaut en termes d'amplitude, de fréquence d'apparition, de durée d'apparition mais aussi d'impact sur les performances mesurées. Toutes ces informations sont destinées à être utilisées lors de l'élaboration de la commande tolérante.

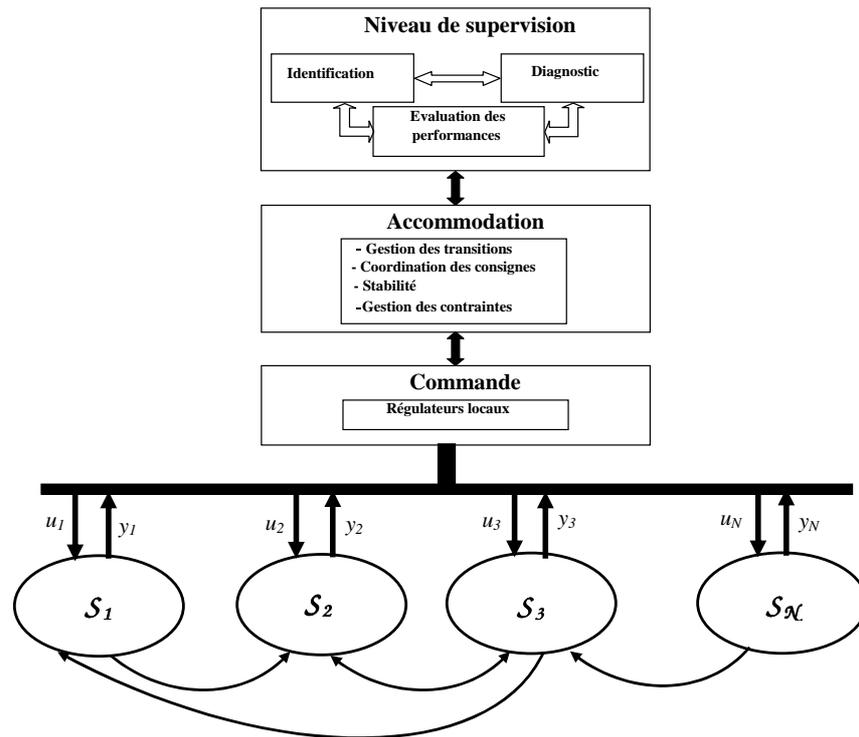


FIG. 2.10 – Hiérarchisation de système de commande tolérant aux défauts.

2.7 Réflexions sur les problématiques liées aux structures de commande tolérante aux défauts

Plutôt que de dresser un catalogue citant les méthodes existantes dans le domaine de la surveillance et la tolérance aux défauts des systèmes complexes, ce paragraphe vise à présenter les problématiques spécifiques aux structures de commande tolérante aux défauts pour les systèmes complexes.

1. l'utilisation de la structure centralisée du système de commande tolérante aux défauts (figure 2.11) engendre une charge importante de calcul. De plus la structure centralisée est peu flexible et est délicate à maintenir.

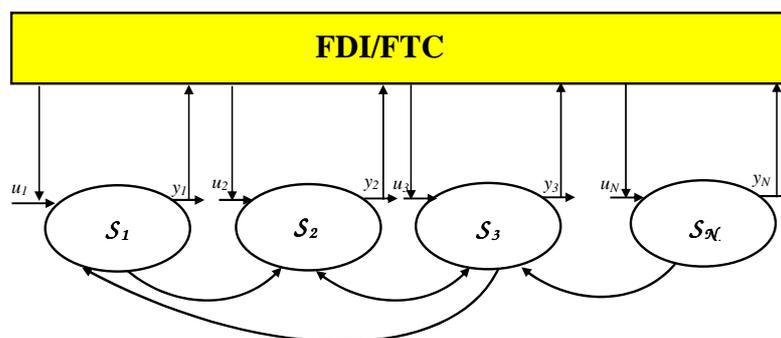


FIG. 2.11 – La structure centralisée.

2. La structure décentralisée (figure 2.12) est largement utilisée pour contrôler les systèmes complexes. Elle utilise plusieurs unités de commande afin de diminuer les charges du calcul (temps et volume) en décomposant le problème global en sous-problèmes faciles à résoudre. Cette structure est aussi composée de modules FDI/FTC locaux pour surveiller chaque sous-système associé. Il faut noter que dans cette structure, les interactions entre les sous-systèmes sont considérées comme faibles et peuvent être négligées. Les modules locaux sont simples et n'utilisent que les informations localement disponibles. Pour des interactions fortes cette structure décentralisée n'est plus adaptée car le risque de propagation de l'effet d'un défaut est important et peut engendrer une déstabilisation du système global.

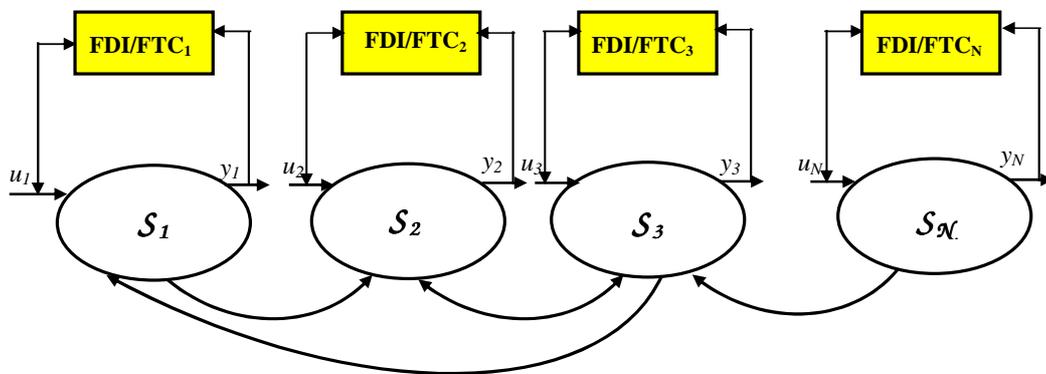


FIG. 2.12 – La structure décentralisée.

3. Afin de remédier aux problèmes liés aux interactions fortes entre les sous-systèmes interconnectés ainsi que pour une meilleure conception du système de commande tolérante aux défauts, la structure décentralisée avec une stratégie de coordination a été souvent utilisée (figure 2.13). Elle exige un contrôle et un diagnostic multi-niveau (local et global) avec un réseau de communication interposé. Cette structure est obtenue en définissant un niveau supérieur appelé "coordinateur" dont le rôle est de prendre en compte les interactions entre les sous-systèmes. Ce dispositif supervise les blocs FDI/FTC pour offrir une solution globale de contrôle. Il réalise deux tâches distinctes : une tâche de reconfiguration et une tâche de coordination de commande. La première consiste en une stratégie de reconfiguration en fonction de l'état global du système, et la seconde élabore les actions à tenir au niveau des contrôleurs locaux.

D'après les différents points soulevés précédemment, il nous semble évident que la dernière structure est celle qui convient aux mieux à la commande et la tolérance aux défauts des systèmes complexes. Il est important de noter que l'approche reposant sur l'utilisation d'un coordinateur présente l'inconvénient majeur d'une centralisation des données sous-jacente à la structure elle-même la rendant particulièrement vulnérable à certains type de défauts.

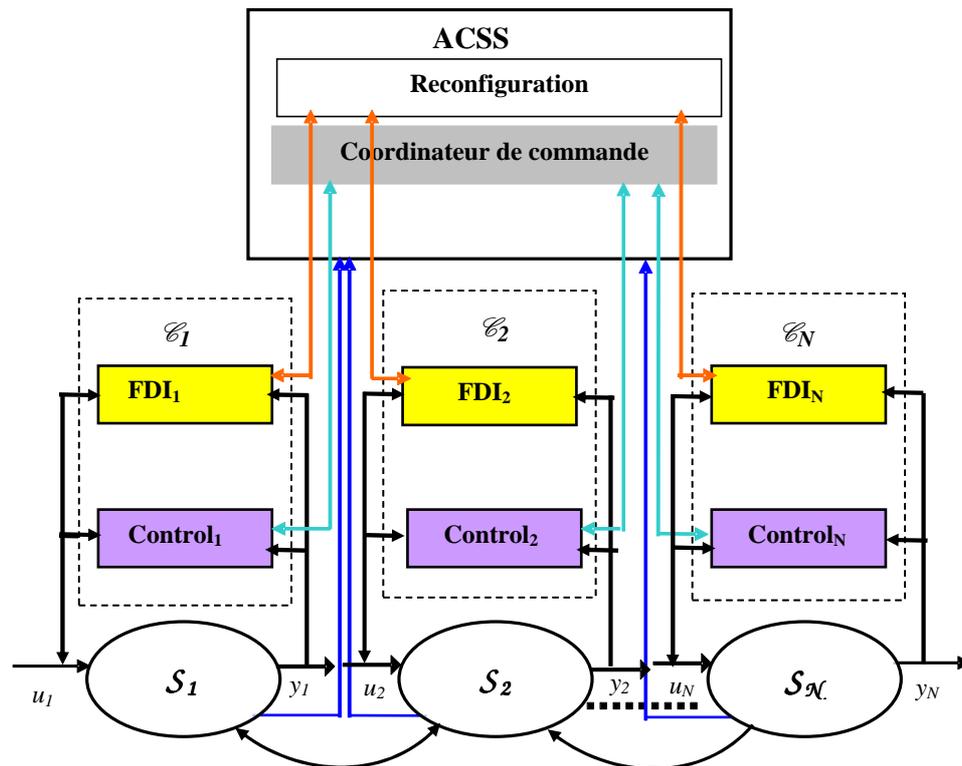


FIG. 2.13 – La structure hiérarchique du système tolérant aux défauts (Patton *et al.*, 2007) .

2.7.1 Stratégie FDI/FTC retenue pour les systèmes complexes

Après avoir présenté les principales structures de commande/surveillance (centralisé, décentralisée et hiérarchisé) dédiées à un système complexe, on propose une nouvelle structure. Les interactions dynamiques entre les sous-systèmes seront supposées être fortes et prises en compte pour l'élaboration de la loi de commande. La structure proposée est présentée à la figure 2.14, elle met en œuvre un mécanisme de commande et d'accommodation aux défauts permettant de garantir les performances acceptables en cas de fonctionnement défaillant. Les données locales (u_i, y_i) relatives à chaque sous système sont collectées et traitées au niveau du calculateur matérialisé sur le schéma par le bloc FDI/FTC puis transmises via le réseau. Nous avons focalisé notre étude sur une approche de commande FTC active qui se base sur le calcul des prédictions des interactions physiques entre les sous systèmes. De cette proposition, il apparaît de façon naturelle que l'évaluation de ces interactions conduit à une stratégie coopérative entre les sous-contrôleurs pour réaliser l'objectif global.

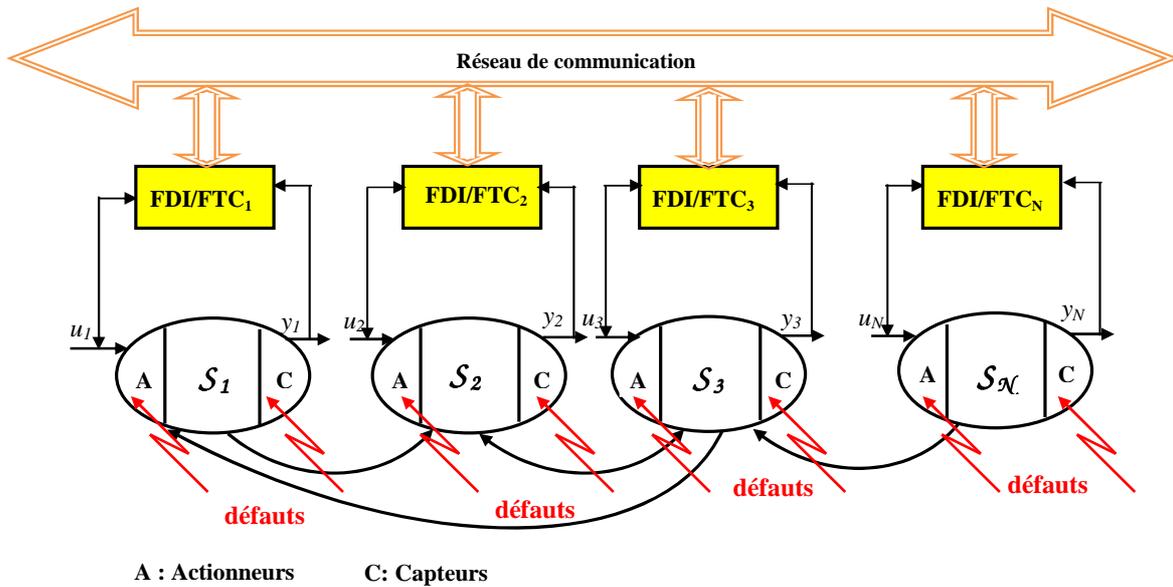


FIG. 2.14 – Le mécanisme FDI/FTC embarqué et coopératif pour le système complexe.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un tour d'horizon des différentes méthodes de synthèse de loi de commande tolérante aux défauts actives. La synthèse présentée n'est certes pas complète, mais présente les principaux courants qui nous semblent essentiels pour notre développement. Une analyse succincte a permis de mettre en évidence les limitations des approches passives de la commande FTC. Nous avons porté notre attention aux méthodes actives. Aussi, nous avons passé en revue les principales structures de la commande FTC active pour les systèmes complexes. Nous avons mis en évidence les limitations des structures centralisée, décentralisée, et hiérarchique. A notre sens, les problèmes de commande/surveillance des systèmes complexes implique la nécessité de manipuler des modèles dynamiques de grande taille, de formuler les différents objectifs de commande tolérante aux défauts, afin d'assurer le bon fonctionnement du système global en cas de défaut. Pour cette raison, nous avons posé la problématique de surveillance et de tolérance aux défauts d'un système complexe via la décomposition du système global en sous-systèmes interconnectés de tailles réduites.

Le chapitre suivant sera consacré tout d'abord à la description des systèmes complexes et leur décomposition. Nous aborderons ensuite le problème de la synthèse de la loi de commande des systèmes complexes. Enfin, nous traiterons en détail la commande prédictive qui sera mise œuvre au sein de la structure proposée au chapitre 2.

Chapitre 3

La commande coopérative pour les systèmes complexes

3.1 Introduction

Depuis une vingtaine d'années, la commande prédictive est devenue une méthode très utilisée dans plusieurs domaines d'application grâce à ses propriétés intrinsèques, sa facilité de mise en œuvre et sa simplicité d'implantation. L'intérêt est que des spécifications de fonctionnement ainsi que des contraintes d'exploitation, pour la plupart inévitables, peuvent être conjointement traitées pour l'élaboration de la commande. L'objectif de ce chapitre est de montrer que la commande prédictive se prête particulièrement bien au cadre des systèmes interconnectés qui sont obtenus après la décomposition du système global, décomposition qui a pour objectif de surmonter la complexité du problème. Nous proposons tout d'abord un rappel sur les systèmes complexes, ainsi que des éléments sur leur modélisation. Ensuite, nous revenons plus en détail sur la structure de commande distribuée introduite au chapitre 2 pour aboutir enfin à la mise en œuvre de la commande prédictive coopérative.

3.2 Qu'est ce qu'un système complexe ?

Bien que la complexité ait fait l'objet de beaucoup de travaux récents de recherche, une définition commune de la complexité est toujours absente ([Bertelsen, 2003](#)). Il n'y a pas de définition générale des systèmes complexes, il existe cependant un consensus sur leurs propriétés. Un système complexe est souvent défini comme étant un ensemble de composants agissant l'un sur l'autre d'une manière non simple ([Simon, 1962](#)). Dans un tel système, le comportement de l'ensemble ne peut pas être décrit par la somme

des comportements de ses composants : étant données les propriétés des composants et les lois régissant leurs interactions, il n'est pas trivial de conclure sur les propriétés de l'ensemble. Cependant, les interactions complexes ne sont pas une condition nécessaire à la complexité du comportement d'un système ; même des lois d'interaction très simples peuvent produire des comportements complexes (Harrison, 2006). Qualitativement, pour comprendre le comportement d'un système complexe, nous devons non seulement comprendre le comportement de ses composants mais également savoir comment ils agissent les uns sur les autres (Bar-yam, 2003).

Lorsque les systèmes étudiés sont considérés comme des *systèmes asservis*, les systèmes complexes sont *quantitativement* caractérisés par :

- une grande dimension du modèle mathématique ;
- un grand nombre de variables d'entrées et de sorties.

Les signes *qualificatifs* de la complexité se traduisent par :

- la non linéarité du système ;
- les perturbations externes ;
- les incertitudes structurelles et paramétriques ;
- les objectifs multiples et les critères de performance (Fradkov *et al.*, 1999).

3.3 Terminologie et représentations

Pour les systèmes asservis, différentes terminologies comme "système complexe" ("complex system" (Bernussou et Titli, 1982), (Šiljak, 1991) (Šiljak, 1996)), "grand système" (Cohen, 2004) ("large-scale system" (Šiljak, 1978), (Sandell *et al.*, 1978)), "système interconnecté" (Scorletti, 1997) ("interconnected system" (Geromel *et al.*, 1994)), "système structuré" (Claveau, 2005) ("structured system" (Šiljak, 1991)), sont employées dans la littérature. Elles semblent à première vue toutes désigner des systèmes présentant des dynamiques complexes (i.e., un grand nombre de variables d'état), mais aussi un grand nombre d'entrées et de sorties, et/ou des systèmes composites constitués de sous-systèmes distincts (distinction spatiale et/ou fonctionnelle) plus ou moins fortement interconnectés. Nous essaierons dans ce paragraphe de regrouper différentes définitions présentes dans la littérature, souvent différentes.

3.3.1 Définitions existantes

Définition 3.1 *Grand système* (Šiljak, 1978)

Un des premiers termes qu'on retrouve dans la littérature est la notion de "grand système" (large scale system). Selon Šiljak (Šiljak, 1978), c'est un système susceptible

d'être décomposé, pour des raisons conceptuelles ou numériques, en un certain nombre fini de sous-systèmes interconnectés.

Définition 3.2 *Grand système (Bernussou et Titli, 1982)*

Un "grand système" est un système pouvant être décrit de façon satisfaisante par le biais d'outils mathématiques classiques, menant à des modèles de grande taille, mettant en jeu un grand nombre de variables d'états. Assez souvent, ils se caractérisent par une répartition étendue dans l'espace. Ces deux éléments, leur grande dimension et leur grande étendue spatiale, créent des difficultés pour les commander.

Définition 3.3 *Système complexe*

Bernussou et Titli dans (Bernussou et Titli, 1982) qualifie un système comme complexe lorsqu'il est difficile à décrire (ou à modéliser) à l'aide d'un modèle mathématique classique. Ces systèmes sont donc fréquemment modélisés par des équations aux dérivées partielles, des équations fortement non linéaires, ou des équations qui s'appuient sur la logique floue.

Pour Šiljak dans (Šiljak, 1996), un "système complexe" est un système présentant les trois caractéristiques suivantes, qui compliquent à la fois son analyse et sa commande :

- grande dimension (nombre d'entrées / sorties / états) ;
- présence d'incertitudes ;
- contraintes sur la structure des flux d'information.

Bakule (Bakule, 2008) rajoute à la liste précédente les phénomènes de transport qui se manifestent par un retard comme une quatrième caractéristique du système complexe.

Définition 3.4 *Système interconnecté (Scorletti, 1997)*

Un "système interconnecté" est un système dynamique décomposé en un ensemble de N systèmes élémentaires isolés S_i $i = 1, 2, \dots, N$ et une matrice d'interconnexion I . Cette matrice d'interconnexion modélise les liens entre les sous-systèmes. Un tel système est représenté à la figure 3.1 suivante.

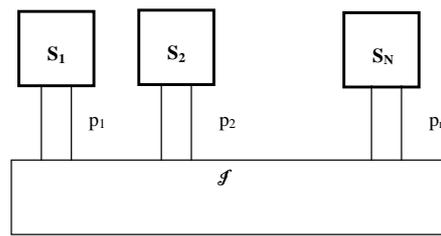


FIG. 3.1 – Interconnexion de sous-système (Scorletti, 1997) .

Définition 3.5 *Système structuré* (Claveau, 2005)(Šiljak, 1991)

Dans le cas d'une modélisation par représentation d'état, un "système structuré" est représenté par un quadruplet (A, B, C, D) dont certains coefficients sont strictement nuls (Claveau, 2005). La "structure" du système est donc définie par la disposition des coefficients invariablement nuls dans les 4 matrices de la représentation d'état. La représentation par matrices de transfert structurées, i.e, dont certains coefficients sont des zéros fixes peut également être considérée.

L'absence de définitions partagées est sans doute due à la grande variété de systèmes et de situations qu'elles tentent de couvrir. Le plus gênant est que toutes n'adoptent pas le même point de vue. Ainsi, le problème de la commande du système est d'ores et déjà sous-jacent dans les définitions du "système complexe" et du "grand système" proposées par Šiljak ou Bernussou et Titli, alors que les définitions 3.4 et 3.5 de "système interconnecté" et "système structuré" se réfèrent d'avantage aux caractéristiques intrinsèques considérées. Il est donc bien nécessaire de donner une définition si l'on veut préciser la terminologie utilisée.

Définition 3.6 *Système complexe*

Nous désignons, dans ce manuscrit, par système complexe, tout système asservi présentant les caractéristiques suivantes :

1. il est de grande dimension pouvant être décrit par le biais d'outils mathématiques, menant à des modèles linéaires de grandes tailles, mettant en jeu, un grand nombre de variables d'états, d'entrées et de sorties. A ces caractéristiques s'ajoutera potentiellement une répartition spatiale étendue ;
2. ce modèle global se décompose en plusieurs sous-systèmes de petite taille et interconnectés.

3.4 Représentation des systèmes complexes par des systèmes interconnectés

On se placera sous l'hypothèse de systèmes strictement propres et invariant dans le temps. Les représentations des systèmes complexes s'appuient principalement sur une modélisation des systèmes linéaires. Ces systèmes sont représentés par le modèle suivant :

$$S \triangleq \begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ est le vecteur des états du système, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ vecteur des entrées et $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ son vecteur de sorties. La décomposition du système complexe 3.1 en un ensemble de sous-systèmes interconnectés se caractérise par la mise en évidence d'interactions physiques entre les sous-systèmes. Ces interactions se matérialisent par des signaux internes au système global. La décomposition du vecteur d'état $x(t)$ en N composantes, $x^T \triangleq [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_N^T]$, avec $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{x_i}}$, $n_x = \sum_{i=1}^N n_{x_i}$, mène alors à la représentation suivante de chaque sous-système S_i :

$$S_i \triangleq \begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}u(t) + \sum_{j=1; j \neq i}^N (\bar{e}_{ij}^{xx} A_{ij}x_j(t) + \bar{e}_{ij}^{xu} B_{ij}u_j(t)) \\ y_i(t) = C_{ii}x_i(t) + \sum_{j=1; j \neq i}^N \bar{e}_{ij}^{yx} C_{ij}x_j(t) \quad 1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (3.2)$$

où les signaux internes au système global sont les termes apparaissant sous les sommations de (3.2). Le modèle peut être décrit sous la forme compacte suivante,

$$S \triangleq \begin{cases} \dot{x}(t) = (A_D + A_C(\bar{E}))x(t) + (B_D + B_C(\bar{E}))u(t) \\ y(t) = (C_D + C_C(\bar{E}))x(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

où $A_D = \text{diag}\{A_{11}, A_{22}, \dots, A_{NN}\}$, $B_D = \text{diag}\{B_{11}, B_{22}, \dots, B_{NN}\}$, $C_D = \text{diag}\{C_{11}, C_{22}, \dots, C_{NN}\}$ sont des matrices diagonales et $A_C(\bar{E}), B_C(\bar{E}), C_C(\bar{E})$ sont des matrices de couplage. Les éléments $\bar{e}_{ij}^{xx}, \bar{e}_{ij}^{xu}, \bar{e}_{ij}^{yx}$ sont les éléments de la matrice fondamentale d'interconnexion macroscopique (Steward, 1962).

$$\bar{E} = ((\bar{e}_{ij})) = \begin{bmatrix} \bar{e}^{xx} & \bar{e}^{xu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \bar{e}^{yx} & 0 & 0 \end{bmatrix} \in \{0, 1\}^{3N \times 3N}$$

avec $\bar{e}^{xx} = ((\bar{e}_{ij}^{xx}))_{1 \leq i, j \leq N}$, $\bar{e}^{xu} = ((\bar{e}_{ij}^{xu}))_{1 \leq i, j \leq N}$, $\bar{e}^{yx} = ((\bar{e}_{ij}^{yx}))_{1 \leq i, j \leq N}$

$$\bar{e}_{ij}^{xx} = \begin{cases} 1, x_j \text{ influe sur } \dot{x}_i \\ 0, x_j \text{ n'influe pas sur } \dot{x}_i \end{cases}$$

$$\bar{e}_{ij}^{xu} = \begin{cases} 1, u_j \text{ influe sur } \dot{x}_i \\ 0, u_j \text{ n'influe pas sur } \dot{x}_i \end{cases}$$

$$\bar{e}_{ij}^{yx} = \begin{cases} 1, x_j \text{ influe sur } y_i \\ 0, x_j \text{ n'influe pas sur } y_i \end{cases}$$

Dans ce manuscrit, le terme interconnexion sera également utilisé pour qualifier les interactions entre les sous-systèmes. Ce terme est représenté par les matrices de couplages $A_C(\bar{E}), B_C(\bar{E}), C_C(\bar{E})$. Le sous-système S_i interagit avec le sous-système S_j $i \neq j$ si il y a au moins une matrice de couplage non nulle. La décomposition de l'équation (3.2) ne reflète pas forcément une décomposition physique du système complexe mais constitue un partitionnement mathématique permettant de simplifier l'élaboration de la loi de commande.

3.5 Problématique de la commande des systèmes complexes

3.5.1 Les difficultés de la commande des systèmes complexes

D'une manière générale, l'élaboration d'une loi de commande pour un système passe par les trois étapes méthodologiques fondamentales suivantes :

1. la définition des objectifs de commande ;
2. la formulation mathématique du problème de commande à résoudre ;
3. la synthèse du contrôleur.

La synthèse d'un contrôleur pour un système complexe est connue pour être délicate car un contrôleur pour un tel système doit satisfaire non pas à un seul objectif de commande, mais à plusieurs sous-objectifs, puisqu'il nécessite par nature une décomposition en plusieurs sous-systèmes. La synthèse d'une loi de commande pour des systèmes complexes (au sens de la définition 3.6 retenue) nécessite de prendre en compte les points suivants :

- **d1.** l'impossibilité de définir un critère unique agrégeant l'ensemble des sous-objectifs de commande ;
- **d2.** limitations d'espace mémoire, de capacité de calcul et de précision ;

- **d3.** la cohabitation au sein du même système de dynamiques différentes peut induire des difficultés numériques lors des phases d'analyse (e.g. simulations) ou de la synthèse de lois de commande ;
- **d4.** des contraintes structurelles sur le contrôleur recherché.

Ces difficultés peuvent être classées en deux catégories distinctes :

- la difficulté d'ordre conceptuel, **d1**, liée à l'étape de formulation du problème de commande : formulation multi-critères du problème de commande ;
- les difficultés d'ordre numérique, **d2**, **d3** et **d4**, liées à l'étape de synthèse du contrôleur : grande dimension du modèle du système, complexité du problème d'optimisation à résoudre.

3.5.2 Les problématiques clefs de la commande des systèmes complexes

Les problématiques sous-jacentes concernent :

- la formulation et la résolution de problème de commande (optimisée) multi-critères ;
- la "simplification de modèle" qui peut être déclinée en deux points ([Claveau, 2005](#)) :
 1. la simplification dynamique, i.e, la réduction d'ordre ;
 2. la simplification structurelle, consiste à imposer au modèle une forme particulière.
- les méthodologies de synthèse de lois de commande adaptées à la manipulation de modèle de dimensions élevées et/ou aux contraintes structurelles sur le contrôleur recherché.

Généralement, l'objectif fondamental est la simplification du problème de commande, trop complexe pour être résolu par exemple en employant les résultats classiques pour la synthèse de la commande (H_2 ou H_∞). En effet, pour des raisons conceptuelles ou numériques, appréhender globalement le problème de commande d'un système complexe peut s'avérer délicat voire impossible. On peut donc en conclure, qu'un des éléments clefs d'une méthodologie de commande pour les systèmes complexes sera la décomposition du problème de commande ([Šiljak, 1991](#)) et ([Bernussou et Titli, 1982](#)). On peut distinguer alors deux décompositions :

1. *décomposition du problème conceptuel* : pour gérer au mieux les difficultés de modélisation mathématique du système et de formalisation des objectifs de commande.
2. *décomposition du problème numérique* : pour simplifier le problème de synthèse de la loi de commande.

La partie qui suit consiste en une étude bibliographique des méthodes de décomposition numérique de la commande dans le cas des systèmes complexes.

3.5.3 La décomposition du problème de commande

Cette idée semble encore d'actualité, malgré la progression exponentielle des performances des calculateurs de nos jours. Ces performances sont surtout utilisées pour prendre en compte les objectifs de manière plus rigoureuse. D'après, [Bernussou et Titli \(1982\)](#), il existe deux stratégies différentes de décomposition du problème numérique, verticale ou horizontale.

3.5.3.1 La décomposition verticale

Le problème est décomposé en plusieurs niveaux hiérarchiques. Un schéma classique de cette commande est donné par la figure 3.2 ([Titli, 1975](#)). Cette décomposition tente de surmonter les difficultés **d1**, **d2** et **d3** soulevées précédemment. Comme on peut le voir, c'est bien la commande qui est hiérarchisée dans cette stratégie. Le système de pilotage (commande) se compose de quatre niveaux hiérarchiques qui communiquent entre eux ([Titli, 1975](#)).

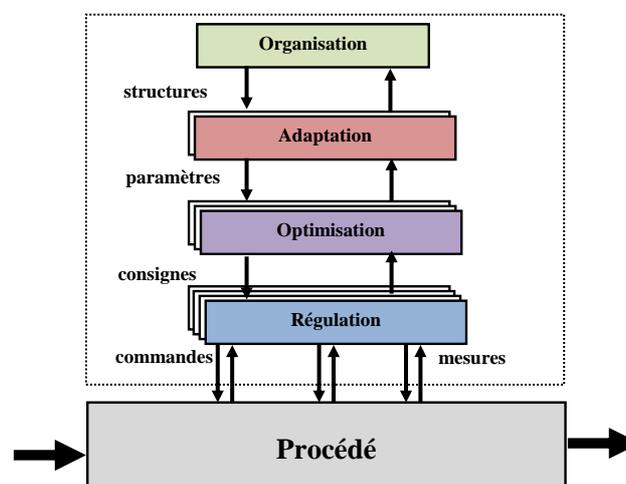


FIG. 3.2 – Hiérarchie des fonctions de commande.

1- niveau "Régulation" : ce niveau est en contact direct avec le procédé, il agit directement sur ce dernier, son rôle est de générer les commandes u pour que les sorties y suivent des trajectoires imposées ou pour qu'elles soient maintenues à des points de consigne en dépit des perturbations.

2- niveau "Optimisation" : ce niveau précise au niveau 1 les trajectoires de références, les valeurs des points de consigne. Ces points sont en général déterminés de façon à optimiser un certain critère sur la base d'un modèle dynamique ou statique du procédé.

3- niveau "Adaptation" : c'est un niveau d'adaptation au sens large du terme, dont le rôle essentiel est d'estimer et d'actualiser les paramètres intervenant dans les modèles des niveaux inférieurs, ou bien encore d'adapter directement la loi de commande tout cela en fonction de l'évolution du système réel.

4- niveau "Organisation" : c'est la couche qui consiste à choisir les différentes méthodes et à les traduire en algorithmes transmis aux niveaux inférieurs en fonction de l'environnement.

Cette démarche de décomposition de la commande dans son aspect général ne traite pas le cas des systèmes complexes. Pour l'adapter à ce cas, il faudrait rajouter une décomposition horizontale du système et de l'organe de commande (niveau 1), ce qui rend le problème beaucoup plus difficile.

3.5.3.2 La décomposition horizontale

C'est une méthode de décomposition particulièrement adaptée au cas des systèmes complexes, elle tente de répondre aux difficultés **d1**, **d2** et **d4** intrinsèques à la commande des systèmes complexes. Ici, la décomposition du problème global en sous-problèmes passe par la décomposition du système selon des considérations physiques et/ou mathématiques et la même structure de décomposition est imposée aux contrôleurs. On se trouve alors en présence d'un système décomposé en sous-systèmes et d'un contrôleur décomposé en sous-contrôleurs (contrôleurs *locaux*), associés chacun à un sous-système (voir figure 3.3).

L'idée-force est que chaque sous-système se voit associé à un sous-problème de commande, avec un critère local propre (3.3). On remarque sur la figure 3.3 que les sous-

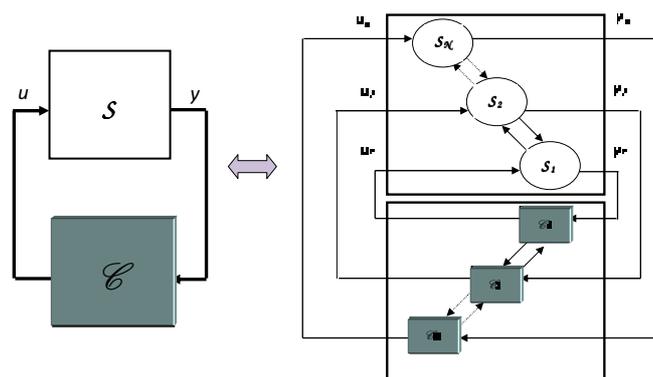


FIG. 3.3 – Décomposition horizontale du système S et du contrôleur C .

systèmes interagissent entre eux, par le biais d'interconnexions faibles ou fortes. Il est important de noter que ces interconnexions, si elles sont fortes, doivent être prises en compte dans la synthèse du contrôleur. Cette stratégie de simplification du problème est une étape méthodologique fondamentale. Nous nous y intéresserons plus en détail dans le reste de ce chapitre.

3.5.3.3 La décomposition mixte

Pour la commande des systèmes complexes, le concept de "multi-niveaux, multi-objectifs" apparaît comme une autre alternative proposée par (Mesarovic *et al.*, 1970, 1965; Coviello, 1965). Le système de commande est constitué selon une hiérarchie ou une structure pyramidale. Le procédé à commander est quant à lui composé de sous-systèmes interconnectés comme indiqué à la figure 3.4. Les unités de commande sont réparties sur plusieurs niveaux, dont certaines n'ont qu'un accès indirect au procédé à commander. Ces unités reçoivent des informations des unités supérieures et les manipulent, les traitent, pour commander ensuite d'autres unités qui leur sont inférieures dans la hiérarchie. Le système est dit à "objectifs multiples" parce que les unités de commande composant l'organisation ont des objectifs différents.

On voit donc qu'un objectif significatif pour les unités des niveaux supérieurs (unités appelées "coordinateurs") est de résoudre un problème d'optimisation, ainsi que de prendre des décisions dans le but d'influencer les actions locales afin de satisfaire un objectif global.

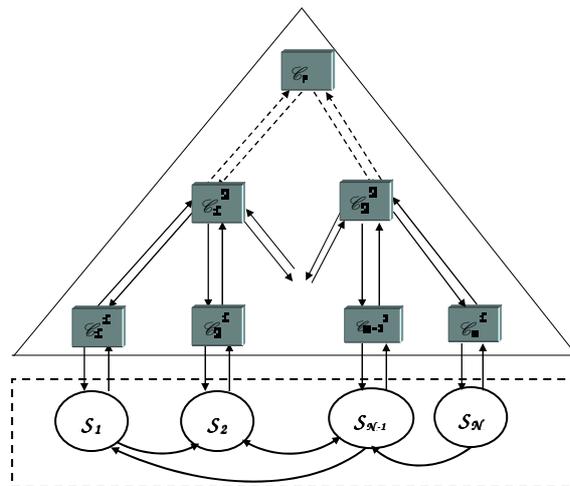
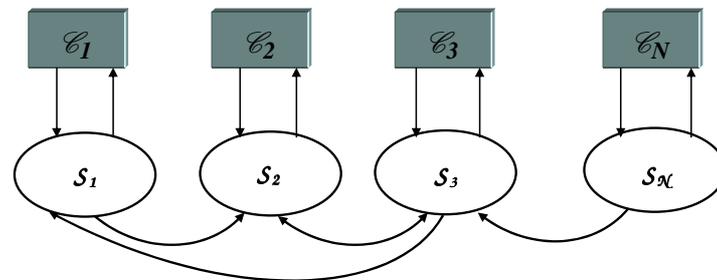


FIG. 3.4 – Structure "multi-niveaux, multi-objectifs".

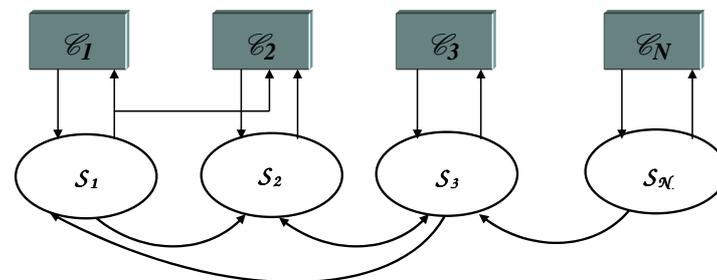
3.6 Mise en œuvre de la décomposition horizontale

Nous abordons ici le problème de mise en œuvre de la décomposition du problème de commande en se focalisant sur le cas de la décomposition horizontale (paragraphe 3.5.3.2). L'approche conventionnelle pour commander les systèmes complexes est basée sur la décomposition du système global en sous-systèmes d'ordres réduits. Cette approche facilite la conception de la loi de commande et aussi diminue les charges élevées de calcul qu'exigent les algorithmes de programmation. Traditionnellement, la structure la plus pratique est la commande décentralisée où les interactions faibles sont négligées ou

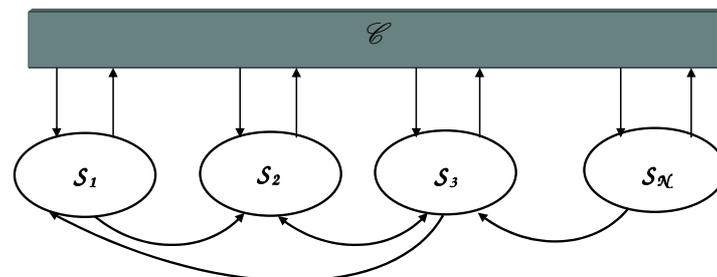
considérées comme des perturbations. Un nombre croissant de problèmes de contrôle des systèmes complexes exige l'utilisation d'une structure de commande décentralisée avec des contrôleurs physiquement distribués. Ces problèmes peuvent être trouvés dans plusieurs domaines comme par exemple les systèmes électriques, automobiles, etc.



(a) commande décentralisée



(b) commande quasi-décentralisée



(c) commande centralisé

FIG. 3.5 – Les structures de commande.

3.6.1 De la commande décentralisée à la commande quasi-décentralisée

La méconnaissance de la nature des interactions existantes entre les divers sous-systèmes pour la structure de commande décentralisée précédente, peut conduire, dans le cas d'interactions fortes, à l'instabilité du système bouclé. Pour résoudre ce problème où la commande décentralisée ne peut pas fournir la performance demandée et pour contourner

l'obstacle de la complexité liée à l'utilisation de la commande centralisée, la commande quasi-décentralisée, représentée sur la figure 3.5b a été proposée dans (Šiljak et Zečević, 2005). La commande quasi-décentralisée se réfère à une situation dans laquelle la plupart des signaux utilisés pour la commande sont collectés et traités localement, bien que quelques signaux doivent toujours être transférés entre les systèmes et/ou les contrôleurs locaux. En termes de matrice de commande, la commande quasi-décentralisée, possède une matrice presque bloc diagonale, avec quelques éléments différents de zéro hors-diagonale. Pour illustrer la mise en œuvre d'une commande quasi-décentralisée, nous proposons d'exposer un exemple d'un système d'enroulement de bandes (Stankovic *et al.*, 2000).

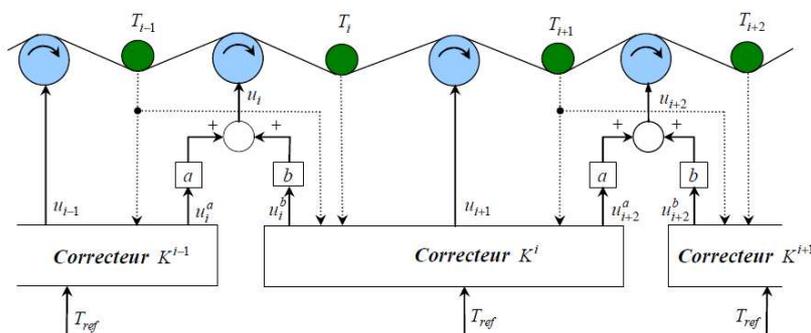


FIG. 3.6 – Stratégie de commande décentralisée avec recouvrement pondéré.

La prise en compte des interactions entre sous-systèmes adjacents a été réalisée par la méthode du recouvrement de sous-systèmes (Šiljak et Zečević, 2005) : l'idée est que deux contrôleurs consécutifs partagent quelques entrées et sorties. A titre d'exemple, les signaux d'entrée des tracteurs situés à la frontière de deux sous-systèmes proviennent de deux contrôleurs consécutifs (figure 3.6). Une telle stratégie de décentralisation avec recouvrement de commandes a déjà donné de bons résultats (Stankovic *et al.*, 2000). Mathématiquement, la stratégie de recouvrement (ou overlapping en anglais) se présente comme suit. Le modèle de départ de l'enrouleur se présente sous la forme d'un système linéaire générique :

$$S \triangleq \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ est l'état du système S , $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ le vecteur d'entrées et $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ le vecteur des sorties. Nous supposons que x , u et y est composé de trois composantes, $x = [x_1^T, x_2^T, x_3^T]^T$, $u = [u_1^T, u_2^T, u_3^T]^T$ et $y = [y_1^T, y_2^T, y_3^T]^T$ choisies par des considérations physiques ou mathématiques. Les dimensions des trois composantes vectorielles sont respectivement n_{x_1} , n_{x_2} et n_{x_3} telles que $n_x = n_{x_1} + n_{x_2} + n_{x_3}$. Cette partition du vecteur d'état

induit une partition de la matrice de système A , de dimension $n_x \times n_x$, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (3.5a)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3.5b)$$

$$\begin{aligned} S_1 \triangleq & \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \\ S_2 \triangleq & \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{22} & B_{23} \\ B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{22} & C_{23} \\ C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.6)$$

On construit ainsi deux sous-systèmes S_1 et S_2 , qui possèdent un recouvrement : ils partagent un ensemble d'états (x_2), d'entrées (u_2) et de sorties (y_2). En réalisant l'expansion des espaces d'états, par répétition des états x_2 , des entrées u_2 et des sorties y_2 , on fait apparaître distinctement les deux sous-systèmes S_1 et S_2 au niveau du modèle S . Des interconnexions apparaissent dès lors par le biais de blocs non nuls en dehors de la diagonale. Par exemple, une transformation possible de S mènera à une expansion \tilde{S} donnée par :

$$\tilde{S} \triangleq \begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}\tilde{u} \\ \tilde{y} = \tilde{C}\tilde{x} \end{cases} \quad (3.7)$$

avec $\tilde{x} = [\tilde{x}_1^T, \tilde{x}_2^T]^T$ et $\tilde{x}_1 = [x_1^T, x_2^T]^T$, $\tilde{x}_2 = [x_2^T, x_3^T]^T$,

$\tilde{y} = [\tilde{y}_1^T, \tilde{y}_2^T]^T$ et $\tilde{y}_1 = [y_1^T, y_2^T]^T$, $\tilde{y}_2 = [y_2^T, y_3^T]^T$

et $\tilde{u} = [\tilde{u}_1^T, \tilde{u}_2^T]^T$ et $\tilde{u}_1 = [u_1^T, u_2^T]^T$, $\tilde{u}_2 = [u_2^T, u_3^T]^T$

$$\tilde{S} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} \\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & 0 & B_{23} \\ B_{21} & 0 & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & 0 & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{23} \\ C_{21} & 0 & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & 0 & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.8)$$

Cette décomposition du vecteur d'état induit sur la matrice A une décomposition avec recouvrement. Cette décomposition n'est autre qu'une transformation matricielle donnée par la relation suivante :

$$\dot{\tilde{x}} = Vx$$

ou V est la matrice de dimension $\tilde{n}_x \times n_x$

$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

$\tilde{n}_x = n_{x_1} + 2n_{x_2} + n_{x_3}$ et I_1, I_2 et I_3 sont des matrices identités de dimensions correspondant aux vecteurs x_1, x_2 et x_3 contenus dans le vecteur x . Sous certaines conditions, le contrôleur obtenu avec ce modèle peut ensuite subir une transformation dite de "contraction" afin de pouvoir être implanté sur le système d'origine S . Le cadre mathématique permettant de définir correctement le processus d'expansion-contraction reliant les systèmes S et \tilde{S} est dénommé "Principe de l'Inclusion" (principe qui a été généralisé dans (Ikeda et Šiljak, 1986)).

3.6.2 De la commande quasi-décentralisée à la commande distribuée

Dans la problématique de la commande des systèmes complexes on peut considérer deux cas extrêmes. Soit la solution complètement centralisée où tous les organes de commande disposent de toute l'information collectée sur le système global, soit la solution complètement décentralisée où pour chaque sous-système les commandes locales sont simplement élaborées à partir des mesures faites sur le sous-système correspondant.

De façon générale, la structure de la commande à implanter sur des systèmes complexes devrait tenir compte des contraintes induites par la structure même du système : au niveau de chaque sous-système on dispose d'un certain nombre d'actionneurs et de capteurs. Les performances obtenues vont dépendre de la structure des échanges d'information que l'on va se permettre entre ces points de commande et ces points de mesure. Plus cette structure sera riche et complète plus les performances du système seront bonnes. Avec les nouvelles avancées dans les domaines du calcul distribué et des réseaux de communication, une structure distribuée de la commande permettant de trouver des solutions aux problèmes inhérents aux systèmes complexes est devenue une voie alternative prometteuse. Récemment, l'utilisation de cette structure pour la conception de système de commande a permis d'améliorer la performance globale d'un système complexe (Longhi *et al.*, 2005). La notion centrale de structure distribuée repose, outre les informations locales,

sur la prise en compte d'informations non locales permettant ainsi une prise de décision concertée. Une telle concertation est qualifiée de commande coopérative.

Nous nous intéressons plus particulièrement dans la suite de ce manuscrit, à la mise en œuvre d'une structure distribuée similaire à celle proposée par Vaccarini ([Vaccarini *et al.*, 2009](#)).

3.7 Commande prédictive à base de modèle

La commande prédictive à base de modèle est une technique de commande avancée largement étudiée aussi bien dans le milieu industriel que dans le milieu académique. La commande MPC repose sur un modèle explicite du procédé pour prévoir le comportement futur de la sortie. Cette technique de prédiction permet de résoudre des problèmes de commande optimale en ligne, où l'erreur de poursuite, à savoir la différence entre la sortie prévue et la référence désirée, est réduite au minimum sur un horizon futur. Les performances sont évaluées au moyen d'une fonction de coût et la technique permet de prendre en compte des contraintes imposées sur les variables du procédé. Elle diffère d'autres techniques de commande par le fait que le problème d'optimisation est résolu en ligne, tandis que les stratégies classiques sont conçues hors ligne.

3.7.1 Principes de base

La commande prédictive résulte de la résolution répétée à chaque pas de temps d'un problème de commande optimale : "comment aller de l'état actuel à un objectif de manière optimale en satisfaisant à des contraintes". Pour ce faire, l'élaboration de la commande prédictive s'articule autour de quatre points clés :

1. un modèle mathématique du procédé à commander ;
2. un critère d'optimisation traduisant l'objectif de fonctionnement souhaité du procédé ;
3. des caractéristiques de fonctionnement sur les actionneurs et les sorties qui engendrent des contraintes ;
4. une méthode de résolution du problème d'optimisation (optimiseur) qui permet d'obtenir la commande future à appliquer pour atteindre l'objectif établi.

La mise en œuvre de la technique se fait alors sur un horizon glissant. A l'instant " t ", la première valeur de la séquence de commande optimale est appliquée sur le système. Les entrées optimales restantes sont rejetées, et un nouveau problème de commande optimale est résolu à l'instant " $t+1$ " basé sur les mesures et les nouveaux états du système. C'est ce mécanisme d'horizon glissant qui confère au contrôleur les caractéristiques désirées d'une rétro-action. Cette idée est illustrée sur la figure [3.7](#).

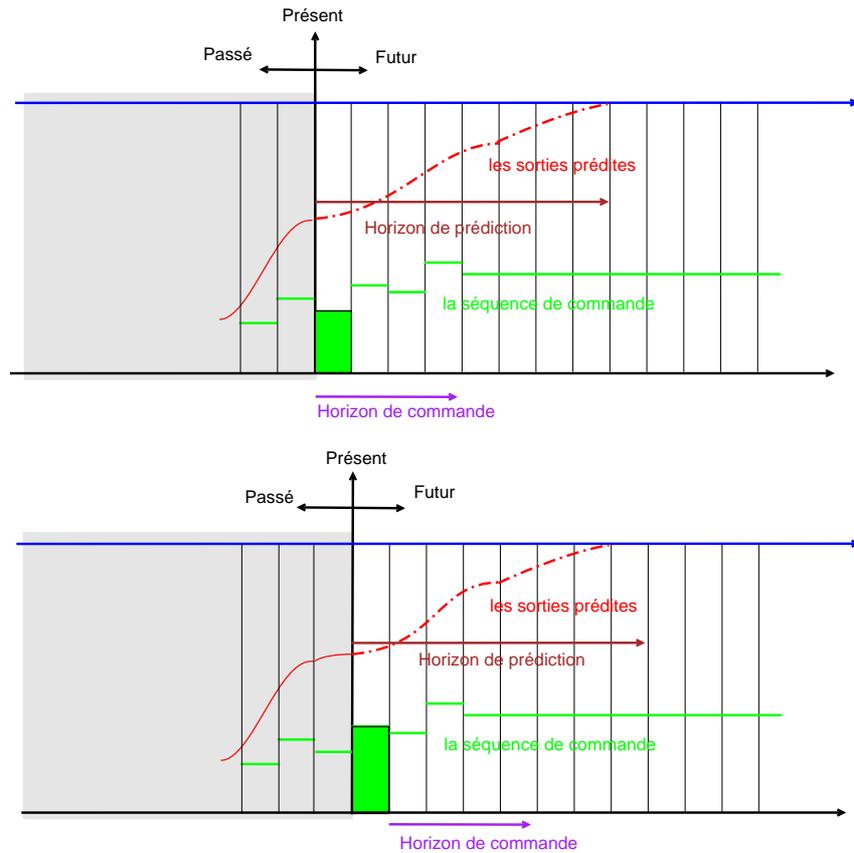


FIG. 3.7 – Le principe de l’horizon glissant.

3.7.1.1 Objectif de fonctionnement

L'utilisateur définit un objectif de fonctionnement qui constitue le point de départ de la problématique de commande. La formulation du critère d'optimisation sous-jacent à l'objectif de fonctionnement offre la possibilité de traduire mathématiquement de nombreux comportements : augmentation du rendement, maximisation de la vitesse, minimisation de la consommation en matières premières ou énergétiques, etc. Le critère peut se résumer assez souvent à une poursuite de trajectoire de référence de la sortie du procédé.

3.7.1.2 Modèle

Le modèle de prédiction du procédé occupe une place cruciale dans la stratégie de commande prédictive. Il doit être capable de décrire le comportement futur du procédé sous une certaine sollicitation connue de l'entrée. Le modèle peut être établi selon deux approches :

1. **Modèle de connaissance** : la compréhension des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques permet à partir de bilans (bilans de matière, d'énergie, de masse, etc.) d'établir un modèle dit de connaissance. Il est traditionnellement régi

par des équations dynamiques, souvent non linéaires aux dérivées ordinaires, voir des équations aux dérivées partielles dès lors que l'évolution temporelle et spatiale est prise en compte conjointement. La complexité du modèle est variable et dépend alors des exigences de description souhaitées mais surtout du niveau de finesse exigé pour le comportement désiré du système. Il est évident que plus le modèle sera fidèle au procédé, au sens physique du terme, meilleure sera la prédiction de l'évaluation du comportement du procédé.

2. **Modèle de comportement (entrée-sortie)** : à partir de données expérimentales d'entrée-sortie, il s'agit de choisir une représentation (fonction de transfert, réseaux de neurones, etc.) de la sortie en fonction de l'entrée et d'effectuer une identification des paramètres. Toutefois, pour être exploité en commande, il devra être dynamique pour représenter les variations du procédé au cours du temps. Le modèle obtenu est donc purement mathématique, les différents paramètres du modèle ne correspondent à aucune caractéristique physique du procédé. Cette solution paraît plus simple à mettre en œuvre, mais peut s'avérer très difficile voir laborieuse dans le cas de systèmes multivariables ou de fortes non-linéarité. Le domaine de validité est plus restreint que celui obtenu avec un modèle de connaissance.

Le choix de la méthode se fait bien sûr en fonction de la précision des objectifs à atteindre et des informations disponibles. Notons aussi que le modèle fait partie intégrante de la commande prédictive et doit par conséquent susciter une attention particulière lors de sa conception.

3.7.1.3 Contraintes de fonctionnement

Dans tout procédé, le fonctionnement est sujet à des contraintes qui peuvent être d'origines différentes. Les entrées doivent rester dans une zone de fonctionnement des contraintes physiques. Tout actionneur selon la technologie utilisée aura une plage d'utilisation limitée, une vitesse et une accélération caractéristiques. Les grandeurs mesurées ou estimées doivent rester dans une certaine zone de fonctionnement définie pour les contraintes d'activité. Elles peuvent être étroitement liées à la sécurité, la stabilité, l'objectif à atteindre en terme de produit final.

3.7.1.4 Problème d'optimisation

Le problème d'optimisation est la traduction mathématique des objectifs de commande du procédé sous les contraintes de fonctionnement. En toute généralité, il s'agit d'optimiser une fonction de coût, appelé aussi critère de performance, donnée par une certaine fonctionnelle J dépendant :

- des variables réglantes représentées par le vecteur $u(t)$;
- des grandeurs réglées, i.e, le vecteur d'état $x(t)$ et le vecteur de sortie $y(t)$.

Ce critère est en général défini comme la somme pondérée d'un terme portant sur les carrés des erreurs de prédiction et d'un terme portant sur les carrés des incréments de commande :

$$J = \sum_{l=N_1}^p \|\hat{y}(k+l|k) - y^d(k+l|k)\|_Q^2 + \sum_{l=1}^m \|\Delta u(k+l-1|k)\|_R^2 \quad (3.9)$$

avec $m < p$ et $\Delta u(k+l|k) = 0, \forall l \geq m$.

Cette fonction de coût (3.9) contient les éléments de réglage spécifiques à la commande MPC : l'horizon inférieur de prédiction sur les sorties $N_1 \in \mathbb{N}^*$, l'horizon supérieur de prédiction sur les sorties $p \in \mathbb{N}^*$, l'horizon de prédiction sur les commandes $m \in \mathbb{N}^*$, les matrices diagonales définies positives de pondération sur les erreurs de poursuite, i.e, Q et de pondération sur l'incrément du vecteur de commandes, i.e, R . La notation $y^d(k)$ représente le vecteur des consignes futures supposées connues. L'expression (3.9) considère les mêmes horizons de prédiction sur toutes les sorties et les mêmes horizons de commande sur toutes les entrées. L'utilisation des incréments du vecteur de commandes futures Δu est nécessaire dans la fonction de coût. Considérer seulement u dans le critère conduit à un problème mal conditionné, car il n'est alors pas possible de satisfaire $y(k+l) = y^d(k+l)$ et $u(k+l) = 0$ (erreur de poursuite nulle) pour le minimum du critère quadratique ($J = 0$). Dans ce cas, le meilleur résultat est obtenu par un compromis entre les deux termes, conduisant nécessairement à $y(k+l) - y^d(k+l) \neq 0$ (Rossiter, 2003).

La structure du critère de performance est importante pour la satisfaction des performances visées, elle influe également très fortement sur le nombre de paramètres de réglage nécessaires. Dans la suite, nous utilisons uniquement un critère de type (3.9).

3.7.2 Principe de fonctionnement

La figure 3.8 illustre une formulation générale de l'approche utilisée par la commande prédictive dans le cas d'une poursuite de trajectoire :

1. **Premier étape : prédiction de sortie** : le contrôleur calcule la sortie prédite \hat{y} du procédé sur l'horizon de prédiction p en se basant sur le modèle du procédé.
2. **Deuxième étape : projet de commande** : les signaux de commandes futures $u(k+l|k)$, $l = 0, 1, 2, \dots, m$ sont déterminés en minimisant la fonction de coût et en respectant les contraintes qui portent sur les commandes et sorties du procédé.
3. **Troisième étape : envoi de la première composante du projet de commande** : le premier élément de la séquence de commande, i.e, $u(k|k)$ est appliquée

au procédé, par contre les autres valeurs de la séquence de commande sont abandonnées. L'étape 1 est répétée avec des nouvelles mesures connues $y(k+1)$, une nouvelle séquence de commande $u(k+1+l|k+1)$, $l = 0, 1, 2, \dots, m-1$ est élaborée. Les imperfections du modèle sont corrigées avec la réactualisation des erreurs entre les objectifs et les mesures. Le projet de commande est amélioré à chaque échantillon de temps et par conséquent la séquence $u(k+1+l|k+1)$, $l = 0, 1, \dots, m-1$ différera très certainement de $u(k+l|k)$, $l = 1, 2, \dots, m$.

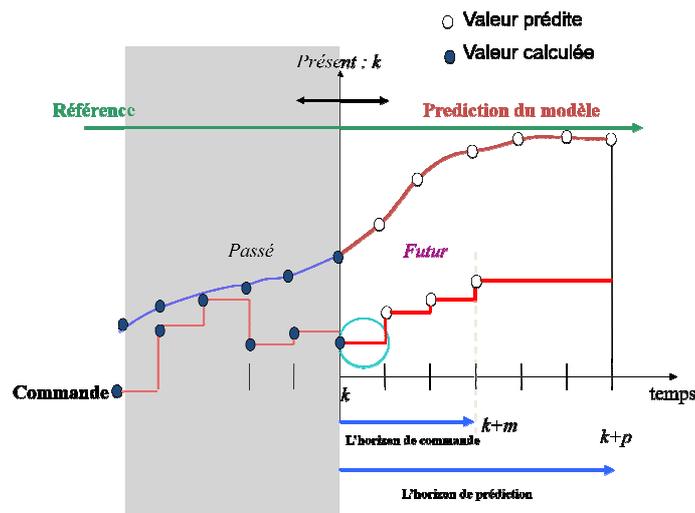


FIG. 3.8 – Poursuite de trajectoire de référence par stratégie de l'horizon fuyant.

On comprend que la tâche d'optimisation occupe une place primordiale dans la stratégie de commande et sa résolution va grandement dépendre de la complexité du modèle. Dans le cas d'un modèle linéaire et d'une fonction de coût quadratique, la solution du problème d'optimisation est simplement une fonction explicite des entrées futures et des sorties prédites. La complexité du problème d'optimisation dépend du nombre de variables, de la valeur des différents horizons mais également de la présence de contraintes sur les commandes et/ou sur les sorties. Pour ces raisons, la résolution en ligne à l'aide d'algorithmes coûteux en temps de calcul s'avère parfois compliquée et ce malgré la constante évolution de la puissance des calculateurs.

3.7.3 Problématiques liées à la stratégie de commande prédictive

La stratégie de commande prédictive, telle qu'elle vient d'être exposée, semble bien séduisante. Mais en revanche certains problèmes d'analyse peuvent surgir. Cela peut se résumer à deux points : la faisabilité et la stabilité. Généralement, la faisabilité est un terme spécifique associé aux problèmes d'optimisation, désignant l'existence d'une solution qui respecte toutes les conditions imposées. Si l'on transpose ce concept au cas de la

commande MPC avec contraintes (dans la plupart des cas), un problème (avec contraintes sur la sortie, la commande,...) est faisable si, en utilisant tous les degrés de liberté disponibles, il existe une solution qui satisfait à toutes les contraintes imposées. Parmi les éléments induisant un fort risque d'infaisabilité, on peut citer

- les incertitudes de modèle ;
- les perturbations qui agissent sur le procédé ;
- les demandes de performances trop strictes ;
- les contraintes sur les commandes, les états, les sorties ;
- les changements trop importants de consigne ou trop brusques ;
- les procédés instables en boucle ouverte.

Quant à la stabilité, quelle que soit la stratégie de commande utilisée, une étude de cette propriété est toujours nécessaire. Dans le cadre de la stratégie de commande prédictive, elle dépend fortement des comportements futurs souhaités du procédé, c'est-à-dire du critère de performance et des contraintes. Il s'agit alors de vérifier que la commande permet d'assurer la stabilité du procédé en boucle fermée. Cette étude dépend notamment de la valeur prise par l'horizon de prédiction p et l'horizon de commande m . Les résultats les plus simples à obtenir en théorie sont obtenus avec $p = m = \infty$ (Agachi *et al.*, 2006). Cependant, ce cas n'étant pas réalisable pratiquement, la troncature des horizons amène à différentes approches (Bemporad et Morari, 1999), (Camille et Maciejowski, 2000).

3.7.4 Paramètres de réglage de la commande prédictive

Choisir le bon modèle du système et un contrôleur MPC comme stratégie de commande ne résout pas encore le problème. Il reste à déterminer les paramètres de réglage spécifiques à la commande prédictive, qui interviennent généralement dans le critère de minimisation. Ces paramètres sont en fait assez semblables d'une structure prédictive à une autre, se composant d'horizons de prédiction et de pondérations. Si l'on se base sur une stratégie prédictive de type GPC (Generalized Predictive Control), ces paramètres de réglage sont les suivants :

- les horizons inférieur (N_1) et supérieur (p) de prédiction sur la sortie ;
- l'horizon de prédiction sur la commande (m) ;
- les matrices de pondérations sur l'erreur de poursuite (Q) et sur la commande (R).

Le critère d'optimisation peut englober aussi des coûts terminaux qui doivent être bien choisis surtout pour la stabilité du procédé. Il faut noter que non seulement ces paramètres de réglage, mais aussi la structure du critère quadratique, jouent un rôle fondamental sur les performances de la commande résultante. Dans la pratique, la période d'échantillonnage a aussi un rôle essentiel.

Choix des horizons

Comme décrit précédemment, la difficulté du temps continu a été contournée par une discrétisation du temps et de l'argument commande sur un temps fini. Cela a introduit les horizons de prédiction (p) et de commande (m).

Dans le cas général, cela reste un problème ouvert puisqu'un horizon optimal dépend de la dynamique de la consigne à poursuivre par exemple, mais aussi de la dureté des contraintes par rapport aux possibilités du procédé.

- **Choix de l'horizon de prédiction p**

Le choix de l'horizon de prédiction p joue un rôle important tant par la quantité d'informations fournies à l'algorithme, que du point de vue de la faisabilité numérique du problème d'optimisation. Sa détermination est basée sur des considérations physiques ayant trait au comportement du modèle en boucle ouverte, à l'objectif à atteindre ainsi que dans la prise en compte des contraintes. Cependant, s'il n'existe pas encore de méthode permettant de choisir l'horizon de prédiction optimal vis-à-vis du problème posé. Dans ce cas, le choix d'un horizon de prédiction variable dans le temps peut être judicieux car il permet a priori une meilleure poursuite par rapport au choix d'un horizon p constant (Dufour, 2000). Plusieurs stratégies de choix de ces paramètres existent, voir par exemple (Boucher et Dumur, 1996), (Richalet *et al.*, 2005). Ainsi, si l'on se réfère au cas GPC, on notera que pour un système à retard, l'horizon inférieur de prédiction sur la sortie peut être choisi égal à la valeur du retard pur divisé par la période d'échantillonnage ; pour les autres systèmes il peut être égal à 1. L'horizon supérieur de prédiction sur la sortie peut être choisi approximativement égal au temps de réponse du procédé divisé par la période d'échantillonnage.

- **Choix de l'horizon de commande m**

Si p augmente, les performances nominales sont améliorées si toutefois m est suffisamment grand. Pourtant dans la pratique, pour beaucoup de systèmes, on constate qu'une valeur de m supérieure à 3 n'apporte pas de différences significatives. Une autre règle générale est de choisir $p - m$ supérieur au temps de réponse. L'horizon de prédiction sur la commande doit être augmenté en fonction de la complexité du système à commander.

- **Choix des matrices de pondérations Q et R**

Généralement la pondération sur l'erreur de poursuite Q est considérée comme unitaire, dans ce cas seule la pondération sur l'effort de commande R intervient et est choisie conformément au critère suivant : une valeur élevée dans les éléments de la matrice R conduit à une réponse plus lente du système bouclé.

3.8 Sur les formalismes de représentation des systèmes en commande MPC

Plusieurs représentations linéaires d'un système physique sont utilisées pour la modélisation : formulation entrée/sortie par fonction de transfert (équivalent à une implantation par équations aux différences ou encore représentation par convolution discrète), approche par représentation d'état discrète. La représentation polynomiale entrée/sortie possède l'avantage de pouvoir utiliser directement des fonctions de transfert issues de techniques d'identification « boîte noire », ce qui est mieux adapté au milieu industriel. Cependant, elle devient très fastidieuse à manipuler dans un contexte de commande multivariable. De fait, la représentation d'état discrète est le formalisme privilégié dans le cadre multivariable.

Partant de ce constat, la commande MPC s'avère être une loi de commande très intéressante offrant la possibilité d'analyser de manière relativement simple la stabilité du système. Par rapport aux représentations dites « polynomiales » (comme la formulation de la commande GPC ([Boucher et Dumur, 1996](#))), la commande MPC utilisant le formalisme d'état permet de traiter naturellement sous une forme unifiée le cas des systèmes monovariables et multivariables. Il est clair que l'interaction entre les différentes voies entrée/sortie des systèmes multivariables suggère l'utilisation de la technique MPC dans le formalisme de représentation d'état qui considère explicitement le système avec ses couplages, plutôt qu'une loi de commande prédictive conçue pour système scalaire obtenu en découplant le système initial. En effet, dans ce dernier cas, les performances obtenues peuvent être médiocres ou peu satisfaisantes, le système couplé risquant même de devenir instable. Un autre avantage de la commande MPC dans le formalisme de la représentation de l'état réside dans le fait que cette technique peut s'appliquer aussi à des systèmes non carrés (possédant un nombre d'entrées différent du nombre de sorties). On retiendra le formalisme de la représentation d'état dans ce mémoire.

Dans les sections qui suivent, on y expose les techniques MPC centralisée puis une approche MPC distribuée appliquée aux systèmes interconnectés suggérée récemment par [Vaccarini et al. \(2009\)](#).

3.9 La commande MPC centralisée

Le point de départ de la synthèse consiste à définir le modèle du système à étudier. Considérons pour cela un modèle discret multivariable linéaire invariant dans le temps sous forme d'équation d'état de dimension n_x , avec n_u entrées et n_y sorties :

$$S \triangleq \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (3.10)$$

où les matrices à coefficients réels A, B, C sont respectivement les matrices d'état, de commande et d'observation représentant le système multivariable, le vecteur $x(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ contient les états du modèle, le vecteur $u(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$, $y(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ représentent le vecteur des entrées et des sorties et $k \in \mathbb{N}$ caractérise le temps discret (par conversion, si T_e est la période d'échantillonnage, on notera $r(k)$ la valeur prise par un signal r à l'instant d'échantillonnage kT_e , i.e. $r(t) = r(k) |_{t=kT_e}$).

Selon la stratégie prédictive, le modèle précédemment défini est utilisé pour élaborer la prédiction du comportement futur du système. En supposant que l'état du système est mesurable, les prédictions des sorties futures peuvent être mises sous la forme :

$$\hat{y}(k+l|k) = CA^l \hat{x}(k|k) + \sum_{s=1}^l CA^{s-1} Bu(k+l-s|k) \quad (3.11)$$

où $\hat{y}(k+l|k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ représente le vecteur des sorties prédites. Dans le cas où l'état n'est pas mesurable, un observateur serait nécessaire pour l'estimer (Menighed *et al.*, 2009a,b)

3.9.1 Critère de performance

Le critère est défini comme la somme pondérée d'un terme portant sur les carrés des erreurs de prédiction et d'un terme portant sur les carrés des incréments de commande :

$$J = \sum_{l=N_1}^p \|\hat{y}(k+l|k) - y^d(k+l|k)\|_Q^2 + \sum_{l=1}^m \|\Delta u(k+l-1|k)\|_R^2 \quad (3.12)$$

Cette fonction de coût (3.12) contient les éléments de réglage spécifiques à la commande MPC : l'horizon inférieur de prédiction sur les sorties $N_1 \in \mathbb{N}^*$, l'horizon supérieur de prédiction sur les sorties $p \in \mathbb{N}^*$, l'horizon de prédiction sur les commandes $m \in \mathbb{N}^*$, la matrice diagonale de pondération, définie semi positive, sur les erreurs de poursuite $Q \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y}$ ($Q \succeq 0$) et la matrice diagonale de pondération, définie positive, sur l'incrément du vecteur de commandes $R \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$ ($R \succ 0$). Le vecteur $y^d(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ caractérise le vecteur des consignes futures supposées connues. Dans la définition de ce critère quadratique, les incréments du vecteur de commandes futures $\Delta u(k+l)$ sont considérés comme nuls pour $l > m$. L'incrément de commande à l'instant k est donnée par $\Delta u(k) \triangleq u(k) - u(k-1)$. Le critère de performance dépend très fortement du nombre de paramètres de réglage nécessaires. Par la suite, le critère (3.12) est utilisé pour $N_1 = 1$.

Remarque 3.1 :

les matrices R et Q ne peuvent pas être nulles simultanément. Une interprétation de ce

résultat est que toutes les entrées et toutes les sorties ne peuvent pas être non pénalisées simultanément.

3.9.2 Formulation du problème

Le problème de la commande MPC centralisée sans contrainte avec l'horizon de prédiction p et l'horizon de commande m consiste à trouver, à l'instant k , un contrôleur centralisé, en minimisant la fonction de coût globale

$$J = \sum_{l=1}^p \|\hat{y}(k+l|k) - y^d(k+l|k)\|_Q^2 + \sum_{l=1}^m \|\Delta u(k+l-1|k)\|_R^2 \quad (3.13)$$

$$\text{sujet } \begin{cases} \text{au modèle prédictif donné par (3.11)} \\ \text{à la condition initiale : } \hat{x}(k|k) = \hat{x}(k) \end{cases}$$

Le contrôleur centralisé, calcule la séquence de la commande optimale $\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+m-1|k)$, qui minimise la fonction de coût (3.13) et, à l'instant k , il applique $\Delta u(k) \triangleq u(k) - u(k-1)$ comme signal de commande à l'entrée du système S .

3.9.3 Calcul de la loi de commande

Définissons les matrices et les vecteurs suivants à partir des matrices A, B, C du système et des données temporelles \hat{y}, \hat{y}^d, u et Δu . Les équations (3.11) pour les valeurs de $l = 0, 1, 2, \dots, p-1$ s'écrivent sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k|k) \\ \hat{y}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+p-1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CA^1 \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix} \hat{x}(k|k) + \begin{bmatrix} CB \\ CAB \\ \vdots \\ \sum_{s=1}^l CA^{s-1}B \end{bmatrix} u(k-1) + \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^m B & CA^{m-1}B & \dots & CB \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^p B & CA^{p-1}B & \dots & CA^{p-m+1}B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1|k) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Pour simplifier les notations et exprimer d'une façon compacte le problème d'optimisation, on introduit les vecteurs et les matrices blocs suivants :

$$\hat{Y}_C(k, p|k) \triangleq \begin{bmatrix} \hat{y}(k|k) \\ \hat{y}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+p-1|k) \end{bmatrix}, \quad Y_C^d(k, p|k) \triangleq \begin{bmatrix} y^d(k|k) \\ y^d(k+1|k) \\ \vdots \\ y^d(k+p-1|k) \end{bmatrix} \quad (3.15a)$$

où les signaux $y^d(j|k)$ $j = k, \dots, k+p-1$ sont les signaux de références intervenant dans la fonction de coût (3.11)

$$\Delta U_C(k, m|k) \triangleq \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1|k) \end{bmatrix}, \quad U_C(k, m|k) \triangleq \begin{matrix} (m \text{ blocs}) \\ \begin{bmatrix} u(k-1) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.15b)$$

$$L_C \triangleq \begin{bmatrix} CA^1 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix}, \quad (3.15c)$$

$$\bar{Q} \triangleq \text{diag}_p\{Q\}, \quad \bar{R} \triangleq \text{diag}_p\{R\} \quad (3.15d)$$

En définissant les grandeurs \mathcal{H}^l par

$$\mathcal{H}^l \triangleq \begin{cases} \sum_{s=1}^l CA^{s-1}B, & l \geq 1 \\ 0, & l < 1 \end{cases} \quad (3.15e)$$

on introduit les matrices suivantes

$$M_C \triangleq \begin{bmatrix} \mathcal{H}^1 \\ \vdots \\ \mathcal{H}^p \end{bmatrix}, \quad N_C \triangleq \begin{bmatrix} \mathcal{H}^1 & 0 & \dots & 0 \\ \mathcal{H}^2 & \mathcal{H}^1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{H}^m & \mathcal{H}^{m-1} & \dots & \mathcal{H}^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathcal{H}^p & \mathcal{H}^{p-1} & \dots & \mathcal{H}^{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (3.15f)$$

A partir des vecteurs et des matrices introduits précédemment, on construit les grandeurs suivantes pour pouvoir exprimer la loi de commande de manière aisée :

$$\Psi \triangleq L_C \hat{x}(k|k) + M_C u(k-1), \quad (3.15g)$$

$$H \triangleq N_C^T \bar{Q} N_C + \bar{R}, \quad (3.15h)$$

$$G \triangleq 2N_C^T \bar{Q} [Y_C^d(k+1, p|k) - \Psi], \quad (3.15i)$$

$$\bar{K}_C \triangleq [N_C^T \bar{Q} N_C + \bar{R}]^{-1} N_C^T \bar{Q} \quad (3.15j)$$

On construit les matrices blocs suivantes

$$\Gamma_C^0 \triangleq [I_{n_u} \quad 0_{n_u \times (m-1)n_u}], \quad \bar{\Gamma}_C \underset{(m \times m \text{ blocs})}{\triangleq} \begin{bmatrix} I_{n_u} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n_u} & \dots & I_{n_u} \end{bmatrix} \quad (3.15k)$$

$$\Gamma'_C \underset{(m \text{ blocs})}{\triangleq} \begin{bmatrix} I_{n_u} \\ \vdots \\ I_{n_u} \end{bmatrix} \quad (3.15l)$$

qui nous permettent de définir les grandeurs suivantes

$$K_C \triangleq \Gamma_C^0 \bar{K}_C \quad (3.15m)$$

$$\theta_C \triangleq \bar{\Gamma}_C \bar{K}_C L_C, \quad \rho_C \triangleq (\Gamma'_C - \bar{\Gamma}_C \bar{K}_C M_C) \Gamma_C^0, \quad \kappa_C = \bar{\Gamma}_C \bar{K}_C \quad (3.15n)$$

Le calcul du vecteur de commande issu de la minimisation du critère s'effectue de façon plus simple à partir de la mise sous forme matricielle du critère de performance (3.12) :

$$J = \| \hat{Y}_C(k+l, p|k) - Y_C^d(k+l, p|k) \|_{\bar{Q}}^2 + \| \Delta U_C(k, m|k) \|_{\bar{R}}^2 \quad (3.16)$$

où le vecteur des sorties prédites est exprimé sous la forme

$$\hat{Y}_C(k+1, p|k) = L_C \hat{x}(k|k) + M_C u(k-1|k-1) + N_C \Delta U_C(k, m|k) \quad (3.17)$$

En substituant la relation (3.17) dans (3.16), le critère de performance peut être réécrit sous la forme (3.18), dans laquelle on fait apparaître explicitement tous les termes contenant le vecteur à optimiser $\Delta U_C(k)$:

$$J = \Delta U_C^T(k, m|k) H \Delta U_C(k, m|k) - G^T \Delta U_C(k, m|k) \quad (3.18)$$

Le critère de performance est une fonction quadratique convexe (sa matrice Hessienne est donnée par $2(N_C^T \bar{Q} N_C + \bar{R}) \succ 0$) de sorte que son minimum est obtenu en annulant son gradient par rapport à $\Delta U_C(k)$:

$$\partial J / \partial \Delta U_C(k, m|k) = 0$$

Il résulte

$$H\Delta U_C(k, m|k) + H^T \Delta U_C(k, m|k) - G = 0 \quad (3.19)$$

Sachant que la matrice H est une matrice symétrique définie positive, le vecteur des incréments de commandes futures $\Delta U_C(k)$ est donné par :

$$\Delta U_C(k, m|k) = (1/2)H^{-1}G \quad (3.20)$$

A partir des expressions (3.15j), (3.15i) et (3.20), le vecteur des incréments de commandes futures $\Delta U_C(k)$ peut être réécrit comme suit :

$$\Delta U_C(k, m|k) = \bar{K}_C \left[Y_C^d(k+1, p|k) - M_C u(k-1) - L_C \hat{x}(k|k) \right] \quad (3.21)$$

Comme la commande prédictive est basée sur le principe de l'horizon fuyant, seule la première composante $\Delta u(k)$ de chaque séquence de commandes futures est appliquée à l'entrée du système. Ainsi, seul le premier élément de l'ensemble des m éléments de $\Delta U_C(k)$ est appliqué :

$$\Delta u(k) = \Gamma_C^0 \Delta U_C(k, m|k) \quad (3.22)$$

A partir du résultat (3.22), l'effort de commande $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ peut être exprimé comme suit :

$$u(k) = u(k-1) + K_C \left[Y_C^d(k+1, p|k) - M_C u(k-1) - L_C \hat{x}(k|k) \right] \quad (3.23)$$

Considérons l'effort de commande appliqué à l'instant $k-1$

$$u(k-1) = \Gamma_C^0 U_C(k-1, m|k-1)$$

La séquence optimale à l'instant k sera donnée par la forme suivante :

$$U_C(k, m|k) = \Gamma_C' \Gamma_C^0 U_C(k-1, m|k-1) + \bar{\Gamma}_C \Delta U_C(k, m|k) \quad (3.24)$$

L'étape finale consiste à insérer l'expression (3.21) dans (3.24). Il en résulte l'expression de la séquence globale de la commande optimale $U_C(k, m|k)$, donnée par :

$$U_C(k, m|k) = \Gamma_C' \Gamma_C^0 U_C(k-1, m|k-1) + \bar{\Gamma}_C \bar{K}_C \left[(Y_C^d(k+1, p|k) - M_C \Gamma_C^0 U_C(k-1, m|k-1) - L_C \hat{x}(k|k)) \right] \quad (3.25)$$

D'une façon plus compacte, la séquence $U_C(k, m|k)$ précédente, peut être représentée par :

$$U_C(k, m|k) = \theta_C \hat{x}(k|k) + \rho_C U_C(k-1, m|k-1) + \kappa_C Y_C^d(k+1, p|k) \quad (3.26)$$

3.9.4 Implantation de l'algorithme de commande

En résumé, le contrôleur \mathcal{C} , solution du problème de MPC est donné par l'algorithme décrit selon les étapes suivantes :

1. initialisation k , i.e, $k = 1$;
2. acquérir tous les états, supposés tous mesurables, i.e, $x(k|k)$;
3. calculer les séquences de la commande optimale

$$U_C(k, m|k) = \Gamma'_C u(k-1) + \bar{\Gamma}_C \bar{K}_C [Y_C^d(k+1, p|k) - M_C u(k-1) - L_C \hat{x}(k)] ;$$

4. appliquer le premier élément $u(k|k)$ de la séquence globale de la commande optimale $U_C(k, m|k)$ sur l'entrée du système S :

$$u(k) = u(k|k) = \Gamma_C^0 U_C(k, m|k)$$

5. incrémenter l'instant d'échantillonnage en posant $k \leftarrow k + 1$, puis aller à l'étape 2.

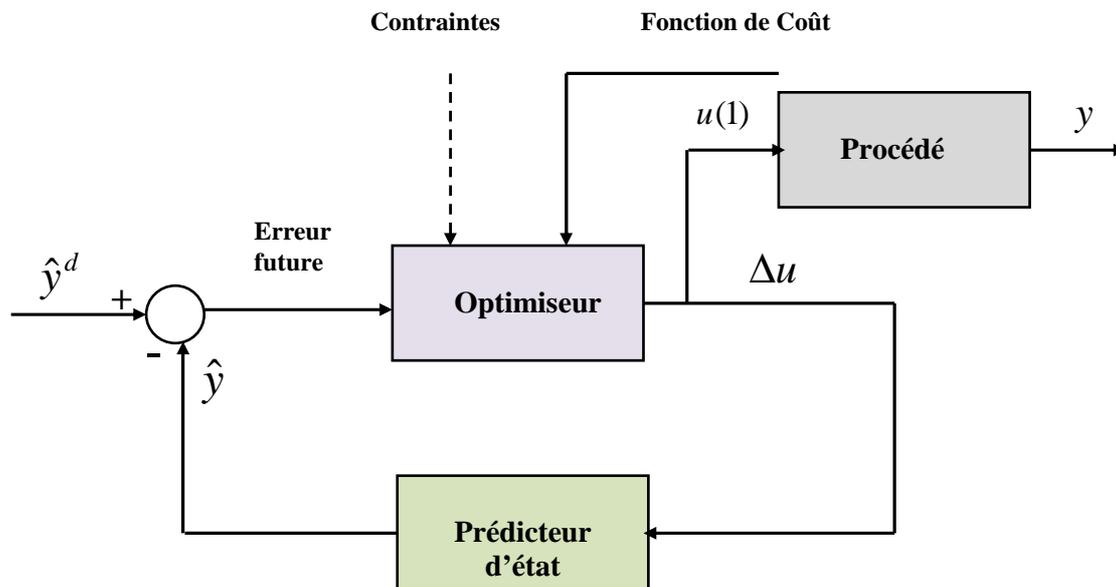


FIG. 3.9 – Diagramme de MPC.

3.10 Analyse de stabilité de la commande MPC Centralisée : MPC-C

En raison de l'horizon fini, la technique MPC ne garantit pas en général la stabilité. En outre, l'optimalité n'implique pas la stabilité (Kalman, 1960). On mentionne ici une

condition nécessaire et suffisante de stabilité (Vaccarini *et al.*, 2009) facile à vérifier à partir du modèle du procédé et des paramètres de la loi de commande établie au paragraphe 3.9.3

Theorème 3.1 *La stabilité centralisée* (Vaccarini *et al.*, 2009)

Le système en boucle fermée obtenu par le bouclage du procédé S et le contrôleur \mathcal{C} , est asymptotiquement stable si et seulement si :

$$\left| \lambda_j \left\{ \left[\begin{array}{cc} A & B \\ -K_C L_C A & I - K_C (M_C + L_C B) \end{array} \right] \right\} \right| < 1, \forall j \in [1, \dots, n_C], \quad n_C = n_x + n_u \quad (3.27)$$

où n_C la dimension du système en boucle fermée et les λ_j sont les valeurs propres du système.

Démonstration 3.1 Grâce aux résultats présentés dans la section 3.9.3, l'élaboration de la loi de commande centralisée pour le procédé donné par les équations d'états (3.10) et qui minimise la fonction de coût (3.12) est exprimée par (3.23). A partir de ces résultats, le système global en boucle fermée est décrit comme suit :

$$x(k) = Ax(k-1) + Bu(k-1), \quad (3.28a)$$

$$u(k) = -K_C L_C x(k) + (I - K_C M_C)u(k-1) + K_C Y_C^d(k+1, p|k), \quad (3.28b)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3.28c)$$

Après avoir combiné le vecteur d'état $x(k)$ et le vecteur de commande $u(k)$, l'état étendu est obtenu sous la forme :

$$x_C(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Ainsi, l'état prédit étendu s'exprime par la relation suivante :

$$\begin{aligned} x_C(k) &= A_C x_C(k-1) + B_C Y_C^d(k+1, p|k) \\ y_C(k) &= C_C x_C(k-1) \end{aligned} \quad (3.30)$$

avec les matrices suivantes

$$A_C \triangleq \begin{bmatrix} A & B \\ -K_C L_C A & I - K_C (M_C + L_C B) \end{bmatrix}, \quad B_C \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ K_C \end{bmatrix}, \quad C_C \triangleq [C \quad 0]$$

Par conséquent la stabilité du système global est déterminée par les valeurs propres de la matrice dynamique A_C .

3.11 La commande MPC distribuée

L'application directe de la structure de commande centralisée aux systèmes complexes est en général difficile à réaliser. En se focalisant sur une structure de type "systèmes interconnectés", on se propose de présenter une méthodologie de commande MPC (Vaccarini *et al.*, 2009). Cette méthodologie a pour objectif d'assurer une performance nominale globale semblable à celle de la commande MPC centralisée. Elle repose essentiellement sur un échange d'information entre différents contrôleurs locaux via un réseau de communication numérique. Les lois de commande sont implantées par un ensemble de sous contrôleurs indépendants capables d'échanger dynamiquement un ensemble restreint d'informations. En effet, ces contrôleurs locaux collectent l'information locale et agissent sur une partie du système contrôlé. On qualifie cette structure de commande comme étant une structure coopérative regroupant différents sites, ayant chacun une tâche à réaliser et communiquant entre eux afin de réaliser un objectif global, en dépit de l'absence de coordinateur.

Dans l'architecture proposée et la stratégie de coopération envisagée, on associe à chaque sous-système S_i , un sous-contrôleur C_i . Un algorithme MPC est implanté dans chaque C_i en utilisant l'information locale acquise sur le sous-système S_i et en évaluant les interactions entre S_i et les autres sous-systèmes S_j , $j = 1, 2, \dots, N$ avec $j \neq i$. Le calcul de la séquence de commande optimale et les états prédits sur un horizon glissant, sont échangées entre les sous contrôleurs via le réseau de communication.

Hypothèse de travail :

Tout au long de ce mémoire, les hypothèses suivantes seront utilisées (Vaccarini *et al.*, 2009) :

Hypothèse 3.1 *les horizons de prévisions et de commandes sont les mêmes pour chaque sous contrôleur, i.e., $m_i = m_j = m$ et $p_i = p_j = p, \forall i, j = 1, 2, \dots, N, j \neq i$.*

Hypothèse 3.2 *les sous-contrôleurs fonctionnent en mode synchrone.*

Hypothèse 3.3 *les sous contrôleurs communiquent une seule fois dans un intervalle d'échantillonnage.*

Hypothèse 3.4 *le réseau de communication présente un retard unitaire.*

Cet ensemble d'hypothèses est utilisé afin de réaliser la commande MPC distribuée. L'hypothèse 3.1 est motivée par la technique MPC utilisée où les horizons de prévision et de commande sont dictés par la constante de temps la plus longue du procédé qui domine tous les sous-systèmes. L'hypothèse 3.2 sur les sous-contrôleurs synchrones se justifie par

le fait que dans la commande de procédé, l'intervalle d'échantillonnage est beaucoup plus long que le temps de calcul. L'hypothèse 3.3 concernant l'échange d'une seule information dans un intervalle d'échantillonnage est liée à la nécessité de réduire la quantité de données échangées qui transitent sur le réseau de communication. En situation réelle, un transfert instantané des données n'est pas possible, donc l'hypothèse 3.4 du retard unitaire est assez naturelle.

3.12 Décomposition du système

Le modèle global représenté par (3.10) peut être décomposé en N sous-systèmes S_i avec $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{x_i}}$, $u_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{u_i}}$ et $y_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{y_i}}$ comme vecteurs d'états, d'entrées et de sorties respectivement. La représentation dans l'espace d'état devient :

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ \vdots \\ x_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N1} & \cdots & B_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_N(k) \end{bmatrix} \quad (3.31a)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k+1) \\ \vdots \\ y_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1} & \cdots & C_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} \quad (3.31b)$$

Par conséquent, chaque sous-système S_i peut être décrit par un modèle d'état, où $x_j(k)$ et $u_j(k)$ pour $j = 1, 2, \dots, N$, $j \neq i$ sont considérés comme des entrées de perturbations mesurables.

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N B_{ij}u_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N C_{ij}x_j(k) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.32)$$

ou encore sous forme compacte

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + w_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) + v_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.33)$$

On définit les vecteurs d'interaction par les grandeurs

$$\begin{aligned} w_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N B_{ij}u_j(k) \\ v_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N C_{ij}x_j(k) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Pour le système S_i ces grandeurs d'interaction regroupent tous les termes produits par les autres sous-système S_j ($j \neq i$).

3.12.1 Décomposition du problème de commande

Sur la base de la commande MPC décrite précédemment au paragraphe 3.9, chaque contrôleur \mathcal{C}_i sera construit à l'aide de trois blocs fonctionnels : les blocs standards *optimiseur* et *prédicteur d'état* et, un bloc *prédicteur d'interaction*. Ce bloc, *prédicteur d'interaction*, a pour fonction de prédire les interactions sur un horizon fini en se basant sur les vecteurs d'interaction, i.e, $w_i(k)$ et $v_i(k)$. Le principe de prédiction des interactions utilisé ici est similaire au principe de prédiction des interactions de Takahara (Kambhampati *et al.*, 2007), (Patton *et al.*, 2007), (Hurteau, 1977). Dans le principe de Takaraha, utilisé notamment par la méthode de décomposition-coordination, la prédiction se fait au niveau du coordinateur. Il faut noter aussi que, la différence entre les deux principes réside principalement dans la manière de résoudre le problème d'optimisation. Dans notre cas, la résolution du problème d'optimisation est réalisée en ligne pour chaque contrôleur local. Alors que dans la méthode décomposition-coordination la résolution est réalisée hors ligne, grâce à un échange des variables entre le coordinateur et les différents contrôleurs locaux. Selon la stratégie prédictive, le modèle défini par (3.32),(3.33) est utilisé pour calculer la prédiction du comportement futur du système. On supposera que l'état du système est mesurable, les prédictions des états et sorties futurs peuvent être mises sous la forme :

$$\hat{x}_i(k+l|k) = A_{ii}^l \hat{x}_i(k|k) + \sum_{s=1}^l A_{ii}^{s-1} [B_{ii} u_i(k+l-s|k) + \hat{w}_i(k+l-s|k-1)] \quad (3.35a)$$

$$\hat{y}_i(k+l|k) = C_{ii} \hat{x}_i(k+l|k) + v_i(k+l|k-1) \quad (3.35b)$$

où $\hat{x}_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{x_i}}$ et $\hat{y}_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{y_i}}$ représentent le vecteur des états prédits et le vecteur des sorties prédites.

3.12.2 Formulation du problème local

Le problème de la commande MPC distribuée sans contraintes avec l'horizon de prédiction p et l'horizon de commande m consiste à trouver, à chaque instant k , pour un ensemble des contrôleurs locaux \mathcal{C}_i , $i = 1, 2, \dots, N$, une commande optimale locale appliquée à l'entrée de chaque sous-système S_i en minimisant la fonction de coût locale suivante :

$$J_i = \sum_{l=1}^p \|\hat{y}_i(k+l|k) - y_i^d(k+l|k)\|_{Q_i}^2 + \sum_{l=1}^m \|\Delta u_i(k+l-1|k)\|_{R_i}^2 \quad (3.36)$$

avec $R_i \succ 0$ $Q_i \succeq 0$ pour $i = 1, 2, \dots, N$

$$\text{sujet } \begin{cases} \text{au modèle prédictif donné par (3.35)} \\ \text{à la condition initiale : } \hat{x}_i(k|k) = \hat{x}_i(k) \end{cases}$$

A l'instant k , basé sur l'information échangée provenant des autres sous-contrôleur \mathcal{C}_J , les prédictions d'interactions calculées par le bloc *prédicteur d'interaction* ainsi que l'acquisition de tous les états, sont exploitées par l'*optimiseur* pour résoudre le problème d'optimisation local MPC. Le bloc *prédicteur d'état* calcule l'estimation de la trajectoire d'état futur. Le premier élément de la séquence de commande optimale $\{u_i(k|k), u_i(k+1|k), \dots, u_i(k+m-1|k)\}$ est appliqué au sous-système S_i . Au même instant, la séquence de commande optimale calculée sur un horizon de commande (m) ainsi que les prédictions d'états calculées sur l'horizon de prédiction (p) sont transmises aux autres sous-contrôleurs via le réseau de communication.

3.12.3 Calcul de la loi de commande locale

3.12.3.1 Prédicteur d'interaction

A partir des équations de prédictions (3.35), on introduit les vecteurs suivants :

$$\begin{aligned}
 \hat{X}_i(k, p|k) &\triangleq \begin{bmatrix} \hat{x}_i(k|k) \\ \hat{x}_i(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}_i(k+p-1|k) \end{bmatrix}, & \hat{X}(k, p|k) &\triangleq \begin{bmatrix} \hat{X}_1(k, p|k) \\ \hat{X}_2(k, p|k) \\ \vdots \\ \hat{X}_N(k, p|k) \end{bmatrix} \\
 U_i(k, m|k) &\triangleq \begin{bmatrix} u_i(k|k) \\ u_i(k+1|k) \\ \vdots \\ u_i(k+m-1|k) \end{bmatrix}, & U(k, m|k) &\triangleq \begin{bmatrix} U_1(k, m|k) \\ U_2(k, m|k) \\ \vdots \\ U_N(k, m|k) \end{bmatrix} \\
 \hat{V}(k, p|k) &\triangleq \begin{bmatrix} \hat{V}_1(k, p|k) \\ \hat{V}_2(k, p|k) \\ \vdots \\ \hat{V}_N(k, p|k) \end{bmatrix}, & \hat{W}(k, p|k) &\triangleq \begin{bmatrix} \hat{W}_1(k, p|k) \\ \hat{W}_2(k, p|k) \\ \vdots \\ \hat{W}_N(k, p|k) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

où les vecteurs $\hat{V}_i(k, p|k)$ et $\hat{W}_i(k, p|k)$ sont des vecteurs d'interactions prédites à l'instant k , basées sur l'information disponible à l'instant k , données par

$$\begin{aligned}
 \hat{W}_i(k, p|k) &= \tilde{A}_i \hat{X}(k, p|k) + \tilde{B}_i U(k, p|k) \\
 \hat{V}_i(k, p|k) &= \tilde{C}_i \hat{X}(k, p|k)
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

On introduit les matrices suivantes

$$\begin{aligned}
 \tilde{A}_i &\triangleq [\text{diag}_p\{A_{i,1}\} \dots \text{diag}_p\{A_{i,i-1}\} \quad 0_{n_{x_i}} \quad \text{diag}_p\{A_{i,i+1}\} \dots \text{diag}_p\{A_{i,N}\}] \\
 \tilde{B}_i &\triangleq [\text{diag}_p\{B_{i,1}\} \dots \text{diag}_p\{B_{i,i-1}\} \quad 0_{n_{x_i}} \quad \text{diag}_p\{B_{i,i+1}\} \dots \text{diag}_p\{B_{i,N}\}] \\
 \tilde{C}_i &\triangleq [\text{diag}_p\{C_{i,1}\} \dots \text{diag}_p\{C_{i,i-1}\} \quad 0_{n_{x_i}} \quad \text{diag}_p\{C_{i,i+1}\} \dots \text{diag}_p\{C_{i,N}\}] \\
 \tilde{A} &\triangleq [\tilde{A}_1^T \quad \tilde{A}_2^T \quad \dots \quad \tilde{A}_N^T]^T \quad \tilde{B} \triangleq [\tilde{B}_1^T \quad \tilde{B}_2^T \quad \dots \quad \tilde{B}_N^T]^T \quad \tilde{C} \triangleq [\tilde{C}_1^T \quad \tilde{C}_2^T \quad \dots \quad \tilde{C}_N^T]^T
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

$$\Gamma_i^* \triangleq \left[\begin{array}{c|c} I_{mn_{u_i}} & I_{n_{u_i}} \\ \hline 0_{(p-m)n_{u_i} \times (m-1)n_{u_i}} & \vdots \\ & I_{n_{u_i}} \end{array} \right], \Gamma^* \triangleq \text{diag}\{\Gamma_1^*, \dots, \Gamma_N^*\} \quad (3.40a)$$

$$\hat{\Gamma}_i \triangleq \left[\begin{array}{c|c} 0_{mn_{u_i} \times n_{u_i}} & I_{mn_{u_i}} \\ \hline 0_{n_{u_i} \times (m-2)n_{u_i}} & I_{n_{u_i}} \end{array} \right] \quad \hat{\Gamma} \triangleq \text{diag}\{\hat{\Gamma}_1, \dots, \hat{\Gamma}_N\} \quad (3.40b)$$

Dans la stratégie de commande proposée, les derniers $(p - m)$ prélèvements de $U_i(k, p|k)$ sont supposés égaux aux derniers éléments de $U_i(k, m|k)$,

$$U_i(k, p|k) = \Gamma_i^* U_i(k, m|k) \quad (3.41a)$$

$$U(k, p|k) = \Gamma^* U(k, m|k) \quad (3.41b)$$

D'autre part, à cause du retard introduit par le réseau de communication, (voir hypothèse 3.4), les prédictions d'interactions sont disponibles uniquement après un seul intervalle d'échantillonnage. Dans ce cas, on réécrit les expressions de $U_i(k, m|k)$ et $U(k, m|k)$ comme suit :

$$U_i(k, m|k) = \hat{\Gamma}_i U_i(k - 1, m|k) \quad (3.42a)$$

$$U(k, m|k) = \hat{\Gamma} U(k - 1, m|k) \quad (3.42b)$$

A partir des expressions (3.41a) et (3.42a), l'équation (3.38) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} \hat{W}_i(k, p|k - 1) &= \tilde{A}_i \hat{X}(k, p|k - 1) + \tilde{B}_i \Gamma_i^* \hat{\Gamma}_i U(k - 1, m|k - 1) \\ \hat{V}_i(k, p|k - 1) &= \tilde{C}_i \hat{X}(k, p|k - 1) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Il faut noter que les vecteurs $\hat{X}(k, p|k)$ et $U(k - 1, m|k)$ sont composés à partir des estimations locales ainsi que des informations collectées par le contrôleur local \mathcal{C}_i venant d'autres sites. D'une façon plus compacte, les prédictions globales sont données par :

$$\begin{aligned} \hat{W}(k, p|k - 1) &= \tilde{A} \hat{X}(k, p|k - 1) + \tilde{B} \Gamma^* \hat{\Gamma} U(k - 1, m|k - 1) \\ \hat{V}(k, p|k - 1) &= \tilde{C} \hat{X}(k, p|k - 1) \end{aligned} \quad (3.44)$$

3.12.3.2 Prédicteur d'état

Le rôle de ce bloc est de fournir les prédictions d'états à l'instant k . Pour écrire l'expression de $\hat{X}(k, p|k)$ nous allons utiliser les vecteurs et les matrices suivantes :

$$\bar{S}_i \triangleq \begin{bmatrix} A_{ii}^0 & \cdots & 0_{n_{x_i}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{ii}^{p-1} & \cdots & A_{ii}^0 \end{bmatrix}, \bar{L}_i \triangleq \bar{S}_i \begin{bmatrix} A_{ii} \\ 0_{(p-1)n_{x_i} \times n_{x_i}} \end{bmatrix}, \bar{M}_i \triangleq \bar{S}_i \begin{bmatrix} \frac{\text{diag}_m\{B_{ii}\}}{0_{n_{u_i}} \quad \cdots \quad 0_{n_{u_i}} \quad B_{ii}} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \vdots \\ 0_{n_{u_i}} \quad \cdots \quad 0_{n_{u_i}} \quad B_{ii} \end{bmatrix} \quad (3.45a)$$

$$\bar{S} \triangleq \text{diag}\{\bar{S}_1, \dots, \bar{S}_N\}, \quad \bar{L} \triangleq \text{diag}\{\bar{L}_1, \dots, \bar{L}_N\}, \quad \bar{M} \triangleq \text{diag}\{\bar{M}_1, \dots, \bar{M}_N\} \quad (3.45b)$$

$$\bar{A}_i \triangleq \bar{S}_i \tilde{A}_i, \quad \bar{B}_i \triangleq \bar{S}_i \tilde{B}_i \Gamma^* \hat{\Gamma}, \quad \bar{A} \triangleq [\bar{A}_1^T \bar{A}_2^T \dots \bar{A}_N^T]^T, \quad \bar{B} \triangleq [\bar{B}_1^T \bar{B}_2^T \dots \bar{B}_N^T]^T \quad (3.45c)$$

Utilisant la définition précédente de la prédiction d'état donnée par (3.35a), la prédiction d'état à l'instant k peut être formulée comme suit :

$$\hat{X}_i(k+1, p|k) = \bar{L}_i \hat{x}_i(k|k) + \bar{M}_i U_i(k, m|k) + \bar{S}_i \hat{W}_i(k, p|k-1) \quad (3.46)$$

On peut reformuler l'équation (3.46) en substituant $W_i(k, p|k-1)$ avec son expression implicite (3.43) et on obtient :

$$\hat{X}_i(k+1, p|k) = \bar{L}_i \hat{x}_i(k|k) + \bar{M}_i U_i(k, m|k) + \bar{A}_i \hat{X}(k, p|k-1) + \bar{B}_i U(k-1, m|k-1) \quad (3.47)$$

3.12.3.3 Optimiseur

Une formulation plus simple du problème d'optimisation est obtenue en adoptant les notations similaires à celles utilisées précédemment au paragraphe 3.9.3

$$\hat{Y}_i(k, p|k) \triangleq \begin{bmatrix} \hat{y}_i(k|k) \\ \hat{y}_i(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_i(k+p-1|k) \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_i^d(k, p|k) \triangleq \begin{bmatrix} \hat{y}_i^d(k|k) \\ \hat{y}_i^d(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_i^d(k+p-1|k) \end{bmatrix} \quad (3.48a)$$

$$\Delta U_i(k, m|k) \triangleq \begin{bmatrix} \Delta u_i(k|k) \\ \Delta u_i(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u_i(k+m-1|k) \end{bmatrix}, \quad U_i(k, m|k) \triangleq \underset{(m \text{ blocs})}{\begin{bmatrix} u_i(k-1) \\ u_i(k-1) \\ \vdots \\ u_i(k-1) \end{bmatrix}} \quad (3.48b)$$

$$\bar{Q}_i \triangleq \text{diag}_p\{Q_i\}, \quad \bar{R}_i \triangleq \text{diag}_p\{R_i\} \quad (3.48c)$$

$$\mathcal{H}_i^l \triangleq \begin{cases} \sum_{s=1}^l C_{ii} A_{ii}^{s-1} B_{ii}, & l \geq 1 \\ 0, & l < 1 \end{cases} \quad (3.48d)$$

$$M_i \triangleq \begin{bmatrix} \mathcal{H}_i^1 \\ \vdots \\ \mathcal{H}_i^p \end{bmatrix}, L_i \triangleq \begin{bmatrix} C_{ii} A_{ii}^1 \\ \vdots \\ C_{ii} A_{ii}^p \end{bmatrix}, N_i \triangleq \begin{bmatrix} \mathcal{H}_i^1 & 0 & \dots & 0 \\ \mathcal{H}_i^2 & \mathcal{H}_i^1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{H}_i^m & \mathcal{H}_i^{m-1} & \dots & \mathcal{H}_i^1 \\ \mathcal{H}_i^p & \mathcal{H}_i^{p-1} & \dots & \mathcal{H}_i^{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (3.48e)$$

$$\bar{C}_i \triangleq \text{diag}_p\{C_{ii}\}, \quad S_i \triangleq \bar{C}_i \bar{S}_i, \quad L_i \triangleq \bar{C}_i \bar{L}_i, \quad T_i \triangleq \begin{bmatrix} 0_{(p-1)n_{y_i} \times n_{y_i}} & I_{(p-1)n_{y_i}} \\ 0_{n_{y_i} \times (p-1)n_{y_i}} & I_{n_{y_i}} \end{bmatrix} \quad (3.48f)$$

$$\Psi_i \triangleq L_i \hat{x}_{ii}(k|k) + M_i u_i(k-1) + S_i \hat{W}_i(k, p|k-1) + T_i \hat{V}_i(k, p|k-1), \quad (3.48g)$$

$$H_i \triangleq N_i^T \bar{Q}_i N_i + \bar{R}_i, \quad (3.48h)$$

$$G_i \triangleq 2N_i^T \bar{Q}_i [Y_i^T(k+1, p|k) - \Psi_i], \quad (3.48i)$$

$$\Gamma_i^0 \triangleq [I_{n_{u_i}} \quad 0_{n_{u_i} \times (m-1)n_{u_i}}], \quad \bar{\Gamma}_i \triangleq \begin{matrix} \begin{bmatrix} I_{n_{u_i}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n_{u_i}} & \dots & I_{n_{u_i}} \end{bmatrix} \\ (m \times m \text{ blocs}) \end{matrix} \quad (3.48j)$$

$$\bar{K}_i \triangleq [N_i^T \bar{Q}_i N_i + \bar{R}_i]^{-1} N_i^T \bar{Q}_i \quad (3.48k)$$

$$K_i \triangleq \Gamma_C^0 \bar{K}_i \quad (3.48l)$$

$$\Gamma_i' \triangleq \begin{matrix} \begin{bmatrix} I_{n_{u_i}} \\ \vdots \\ I_{n_{u_i}} \end{bmatrix} \\ (m \text{ blocs}) \end{matrix} \quad (3.48m)$$

$$\theta_i \triangleq \bar{\Gamma}_i \bar{K}_i L_i, \quad \rho_i \triangleq (\Gamma_i' - \bar{\Gamma}_i \bar{K}_i M_i) \Gamma_i^0, \quad \kappa_i \triangleq \bar{\Gamma}_i \bar{K}_i \quad (3.48n)$$

$$\Gamma' \triangleq \text{diag}_p\{\Gamma_1', \dots, \Gamma_N'\}, \quad \Gamma^0 \triangleq \text{diag}_p\{\Gamma_1^0, \dots, \Gamma_N^0\}, \quad \bar{\Gamma} \triangleq \text{diag}_p\{\bar{\Gamma}_1, \dots, \bar{\Gamma}_N\} \quad (3.48o)$$

$$L \triangleq \text{diag}_p\{L_1, \dots, L_N\}, \quad M \triangleq \text{diag}_p\{M_1, \dots, M_N\}, \quad S \triangleq \text{diag}_p\{S_1, \dots, S_N\} \quad (3.48p)$$

$$T \triangleq \text{diag}_p\{T_1, \dots, T_N\}, \quad \bar{K} \triangleq \text{diag}_p\{\bar{K}_1, \dots, \bar{K}_N\}, \quad \theta \triangleq -\bar{\Gamma} \bar{K} L, \quad (3.48q)$$

$$\phi \triangleq -\bar{\Gamma} \bar{K} (S \tilde{A} + T \tilde{C}), \quad \rho \triangleq \Gamma' \Gamma^0 - \bar{\Gamma} \bar{K} (M \Gamma^0 + S \tilde{B} \Gamma^* \hat{\Gamma}) \quad (3.48r)$$

Afin d'éliminer le terme de la sortie dans la fonction de coût (3.36), une expression explicite de la sortie prédite est nécessaire. A partir de (3.35a) et (3.35b), les sorties prédites futures sur un horizon fini sont formulées comme suit :

$$\hat{y}_i(k+l|k) = C_{ii}A_{ii}^l\hat{x}_i(k|k) + v_i(k+l|k-1) + \sum_{s=1}^l C_{ii}A_{ii}^{s-1}[B_{ii}u_i(k+l-s|k) + \hat{w}_i(k+l-s|k-1)] \quad (3.49)$$

où l'index l parcourt toute la longueur de l'horizon donnée a priori. De la même manière, la commande future $u(k)$, calculée sur un horizon h est donnée par l'expression suivante :

$$u_i(k+h|k) = u_i(k-1|k-1) + \sum_{r=1}^h \Delta u_i(k+r|k) \quad (3.50)$$

Sous forme matricielle, les sorties prédites peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{aligned} \hat{Y}_i(k+1, p|k) &= \bar{L}_i\hat{x}_i(k|k) + M_i u_i(k-1|k-1) + N_i \Delta U_i(k, m|k) + S_i \hat{W}_i(k, p|k-1) \\ &+ T_i \hat{V}_i(k, p|k-1) \end{aligned} \quad (3.51)$$

la fonction de coût donnée par (3.36) devient alors ;

$$J_i = \sum_{l=1}^p \|\hat{Y}_i(k+l|k) - Y_i^d(k+l|k)\|_{Q_i}^2 + \sum_{l=1}^m \|\Delta U_i(k+l-1|k)\|_{R_i}^2 \quad i = 1, \dots, N \quad (3.52)$$

Maintenant en substituant (3.51) dans (3.52), la fonction de coût sous forme matricielle est formulée comme suit :

$$J_i = \Delta U_i^T(k, m|k) H_i \Delta U_i(k, m|k) - G_i^T \Delta U_i(k, m|k) \quad (3.53)$$

Le critère de performance est une fonction quadratique convexe (sa matrice Hessienne est donnée par $2(N_i^T \bar{Q} N_i + \bar{R}_i) \succ 0$) de sorte que son minimum soit obtenu en annulant son gradient par rapport à $\Delta U_i(k, m|k)$:

$$\partial J_i / \partial \Delta U_i(k, m|k) = 0$$

Il résulte

$$H_i \Delta U_i(k, m|k) + H_i^T \Delta U_i(k, m|k) - G_i = 0 \quad (3.54)$$

Sachant que la matrice H_i est une matrice symétrique, Il résulte de la formulation précédente, le vecteur des increments de commandes futures $\Delta U_i(k)$:

$$\Delta U_i(k, m|k) = (1/2) H_i^{-1} G_i \quad (3.55)$$

A partir des expressions (3.48k), (3.48i) et (3.55), le vecteur des incréments de commandes futures $\Delta U_i(k, m|k)$ peut être réécrit comme suit :

$$\Delta U_i(k, m|k) = \bar{K}_i \left[Y_i^d(k+1, p|k) - M_i u_i(k-1) - L_i \hat{x}_i(k|k) - S_i \hat{W}_i(k, p|k-1) - T_i \hat{V}_i(k, p|k-1) \right] \quad (3.56)$$

Comme la commande prédictive est basée sur le principe de l'horizon fuyant, seule la première composante $\Delta u_i(k)$ de chaque séquence de commandes futures est appliquée à l'entrée du système. Ainsi, seul le premier élément de l'ensemble des m éléments de $\Delta U_i(k)$ est retenu :

$$\Delta u_i(k) = \Gamma_i^0 \Delta U_i(k, m|k) \quad (3.57)$$

A partir du résultat (3.57), l'effort de commande $u_i(k) = u_i(k-1) + \Delta u_i(k)$ peut être exprimé comme suit :

$$u_i(k) = (I - K_i M_i) u_i(k-1) + K_i \left[(Y_i^d(k+1, p|k) - L_i \hat{x}_i(k|k)) \right] - K_i S_i \hat{W}_i(k, p|k-1) - K_i T_i \hat{V}_i(k, p|k-1) \quad (3.58)$$

En exprimant l'effort de commande appliqué à l'instant $k-1$ par

$$u_i(k-1) = \Gamma_i^0 U_i(k-1, m|k-1)$$

La séquence optimale à l'instant k sera donnée par la forme suivante :

$$U_i(k, m|k) = \Gamma_i' \Gamma_i^0 U_i(k-1, m|k-1) + \bar{\Gamma}_i \Delta U_i(k, m|k) \quad (3.59)$$

L'étape finale consiste à insérer l'expression (3.56) dans (3.59). Il en résulte l'expression de la séquence globale de la commande optimale $U(k, m|k)$, donnée par :

$$U(k, m|k) = \Gamma' \Gamma^0 U(k-1, m|k-1) + \bar{\Gamma} \bar{K} \left[(Y^d(k+1, p|k) - M \Gamma^0 U(k-1, m|k-1) - L \hat{x}(k|k) - S \hat{W}(k, p|k-1) - T \hat{V}(k, p|k-1)) \right] \quad (3.60)$$

D'une façon plus compacte, la séquence $U(k, m|k)$ précédente, peut être représentée par :

$$U(k, m|k) = \theta \hat{x}(k|k) + \phi \hat{X}(k, p|k-1) + \rho U(k-1, m|k-1) + \kappa Y^d(k+1, p|k) \quad (3.61)$$

3.12.4 Implantation de l'algorithme

L'algorithme de l'élaboration de loi de commande pour le sous contrôleur \mathcal{C}_i est donné par les étapes suivantes :

1. initialisation de k , i.e, $k = 1$;
2. acquérir le vecteur des états prédits $\hat{X}_j(k, p|k-1)$ et le vecteur de la séquence de commande optimale $U_j(k-1, m|k-1)$ envoyés par les sous contrôleurs \mathcal{C}_j via le réseau de communication ;
3. construire $\hat{X}(k, p|k-1)$ et $U(k-1, m|k-1)$ en combinant le vecteur local des états prédits $\hat{X}_i(k, p|k-1)$ et le vecteur local de la commande $U_i(k-1, m|k-1)$ avec ceux qui ont été acquis précédemment ;

4. calculer l'interaction de prédiction correspondante donné par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\hat{W}_i(k, p|k-1) &= \tilde{A}_i \hat{X}(k, p|k-1) + \tilde{B}_i \Gamma^* \hat{\Gamma} U(k-1, m|k-1) \\ \hat{V}_i(k, p|k-1) &= \tilde{C}_i \hat{X}(k, p|k-1);\end{aligned}$$

5. acquérir les états $x(k|k)$ et le vecteur des sorties désirées $Y^d(k+1, l|k)$ sur un horizon de prédiction p ;
6. calculer la séquence de la commande optimale, et ensuite envoyer cette séquence aux sous contrôleurs \mathcal{C}_j via le réseau de communication :

$$\begin{aligned}U_i(k, m|k) &= \Gamma'_i u_i(k-1) + \bar{\Gamma}_i \bar{K}_i [(Y_i^d(k+1, p|k) - M_i u_i(k-1) - L_i \hat{x}_i(k|k) - S_i \hat{W}_i(k, p|k-1)) \\ &\quad - T_i \hat{V}_i(k, p|k-1)]\end{aligned}$$

7. appliquer le premier élément de la séquence optimale $U_i(k, m|k)$, i.e., $u_i(k) = u_i(k|k) = \Gamma_i U_i(k, m|k)$ sur le sous-système local S_i ;
8. calculer le vecteur des états prédits sur un horizon fini p à l'aide de l'équation

$$\hat{X}_i(k+1, p|k) = \bar{L}_i \hat{x}_i(k|k) + \bar{M}_i U_i(k, m|k) + \bar{S}_i \hat{W}_i(k, p|k-1)$$

et puis émettre via le réseau pour les autres sous contrôleurs \mathcal{C}_j ;

9. incrémenter l'instant de temps $k \leftarrow k+1$ et aller à l'étape 2.

La structure interne du contrôleur local \mathcal{C}_i est représenté à la figure 3.10

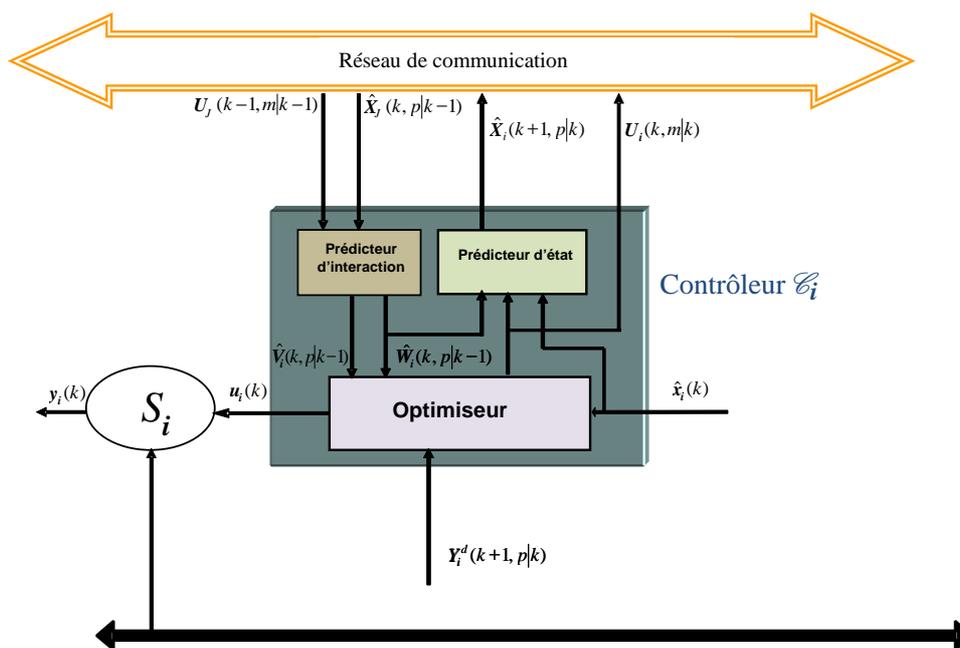


FIG. 3.10 – Structure interne de i -ième sous-contrôleur.

3.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en première partie, un ensemble de définitions sur la complexité, des procédures de décomposition des systèmes ainsi que les commandes qui leur sont associées et nous avons également mis en évidence les contraintes liées à la mise en œuvre de leurs commandes. Il s'agit principalement de dégager parmi les structures existantes, celle qui s'adapte au mieux au développement d'un système distribué tolérant aux défauts.

En deuxième partie, on a présenté d'une manière succincte la technique de la commande MPC associée au principe de prédiction, en mettant en évidence les motivations conduisant à son utilisation. Il a été montré que, pour pouvoir prédire le comportement futur du système, un modèle du comportement du procédé est exigé. En se basant sur ces prédictions, un critère de performance est choisi, et ensuite minimisé afin d'obtenir la séquence de commandes futures. Conformément au principe de l'horizon glissant, seule la première valeur de cette séquence est appliquée au système, toute cette démarche prédictive est répétée à chaque période d'échantillonnage.

On a montré qu'en plus de ses propriétés intrinsèques et sa facilité de mise en œuvre, la commande MPC permet de réaliser aisément la stratégie de coopération dans une structure distribuée. La procédure d'élaboration d'une loi de commande MPC distribuée (sans contrainte) selon une représentation d'état a été établie. Les principales étapes sont les suivantes :

- la décomposition du système en ensemble de sous-systèmes interconnectés ;
- le choix d'une fonction de coût ;
- la synthèse de la loi de commande obtenue par minimisation de fonction de coût, de sorte que les contrôleurs locaux puissent recevoir et échanger un nombre d'informations restreint.

Il résulte de cette stratégie MPC, une loi de commande pour un système multivariable sain, procurant de bonnes performances. Cependant, cette approche ne prend pas en compte la possibilité de dysfonctionnement du système qui s'avère pourtant nécessaire dans la pratique. Le chapitre suivant répondra à la question de la commande tolérante aux défauts en proposant une technique de détection et d'identification des défauts.

Chapitre 4

La commande FTC coopérative pour les systèmes complexes

4.1 Introduction

Les techniques classiques de commande permettent d'assurer la stabilité d'un système en boucle fermée et d'atteindre des performances prédéfinies dans le cas où tous les éléments constituant la boucle de régulation, e.g. capteurs, actionneurs, composants du procédé, fonctionnent correctement. Malheureusement, ces éléments de la chaîne de régulation sont susceptibles de présenter des dysfonctionnements. Une commande, performante en l'absence d'anomalies, peut rendre le système instable en présence d'un défaut de l'un de ces composants. Il importe dans ce cas d'assurer la sûreté de fonctionnement du système par la conception de commandes automatiques capables de garantir la stabilité du système lors d'un défaut et de maintenir si possible les performances nominales du système. L'objet de ce chapitre porte sur le développement de ces lois de commande, dites tolérantes aux défauts, dans le cadre des systèmes interconnectés. Dans ce cadre, nous exploitons plus particulièrement l'architecture distribuée retenue au chapitre 3 pour réaliser localement des contrôleurs tolérants aux défauts (FTC) dont la structure interne se compose d'un module de détection et d'identification de défauts (FDI) et d'un module de commande. Grâce au réseau de communication numérique sous-jacent à l'architecture distribuée, ces contrôleurs locaux peuvent échanger des informations pour réaliser de manière coopérative les objectifs de commande aussi bien au niveau local qu'au niveau global. Le module FDI des contrôleurs locaux FTC joue un rôle fondamental dans la détection des défauts affectant le système en fonctionnement. Un soin particulier a donc été apporté à la conception de ce module compte tenu de l'environnement incertain (interactions dynamiques, perturbations) dans lequel le système évolue. Une méthode originale basée sur des techniques d'observation adaptative a été développée pour détecter

et estimer directement les défauts locaux. Cette méthode permet d'assurer une robustesse de l'estimation des défauts en dépit de la présence des interactions entre sous-systèmes et permet également de réaliser un temps de réponse relativement court du processus d'estimation suite à l'occurrence d'un défaut. La méthode s'applique à des défauts de type actionneur et nous montrons qu'elle s'applique également à des défauts de type capteur moyennant une transformation élémentaire. Le module de commande automatique des contrôleurs FTC locaux est basé sur l'algorithme de commande prédictive (MPC) renseigné en ligne par un module FDI associé. L'évaluation des interactions entre sous-systèmes grâce à la diffusion des grandeurs non-locales sur le réseau de communication, comme décrit au chapitre 3, permet à l'algorithme de commande prédictive de disposer alors de toutes les informations nécessaires pour la mise à jour continue du modèle de prédiction sur lequel il se base pour élaborer les commandes locales.

Le chapitre est organisé comme suit. Dans le premier paragraphe, nous présentons brièvement les propriétés de tolérance passive aux défauts inhérentes à l'algorithme de commande prédictive. Nous montrons comment cet algorithme permet de réaliser une commande tolérante active par renseignement d'une information de défaut. Nous abordons ensuite le problème de la détection et de l'estimation des défauts dans un système interconnecté. La technique originale utilisée est une approche locale permettant de découpler la détection des défauts d'un sous-système de toute autre entrée inconnue à ce sous-système (interactions, perturbations, etc). La technique est appliquée à des défauts de type actionneur où nous montrons qu'elle permet d'*estimer* avec précision l'amplitude d'un défaut représenté sous forme d'une perte de puissance d'un actionneur. Au paragraphe 4.5, nous montrons comment l'information sur un défaut local permet une mise à jour du modèle de prédiction de l'algorithme de commande prédictive. La commande tolérante ainsi obtenue est appliquée à des défauts de types actionneur et capteur et illustrée par des exemples en simulations numériques. Finalement, quelques résultats de stabilité sont donnés et nous indiquons sous quelles conditions le système interconnecté reste stable en cas d'une défaillance du réseau de communication.

4.1.1 Capacité implicite à la tolérance aux défauts

La robustesse des systèmes de régulation donne lieu à une tolérance implicite aux défauts. En effet, les défauts ayant un impact limité sur les performances du système qui peuvent être assimilés à des perturbations ou à des incertitudes dynamiques de modèle, sont souvent compensées par l'action de la commande. Il s'agit de l'effet de rétro-action du contrôleur et le procédé. En particulier la commande MPC réagit assez bien à ce type de défauts. Il a été montré que, même lorsque la connaissance du défaut n'est pas disponible, le contrôleur MPC tire profit automatiquement de la redondance des actionneurs si elle existe (Sun *et al.*, 2008), (Maciejowski, 1998).

L'exemple suivant illustre la tolérance implicite aux défauts de la commande MPC. Considérons le système linéaire suivant de trois entrées et deux sorties (Sun *et al.*, 2008) :

$$S \triangleq \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (4.1)$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} -0.0151 & -60.5651 & 0 & -0.32174 \\ -0.0001 & -1.3411 & 0.9929 & 0 \\ -0.00018 & 42.2541 & -0.86939 & 0 \\ -0.4 & 0 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -2.516 & -13.136 & -3.136 \\ -0.1689 & -0.2514 & -1.004 \\ -17.251 & -1.5766 & -0.7822 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les entrées sont contraintes par $|\Delta u_i| \leq 25$, $i = 1, 2, 3$. $T_s = 0.05s$ représente le temps d'échantillonnage. L'objectif de commande, est d'asservir les sorties du système à des entrées de références données par $y_1^{ref} = 2$ et $y_2^{ref} = 10$. Dans cet exemple, les auteurs considèrent que l'actionneur u_3 n'est plus opérationnel à l'instant $t = 5s$. Les résultats de simulation sont montrés aux figures 4.1 et 4.2 (reprises de l'article (Sun *et al.*, 2008)).

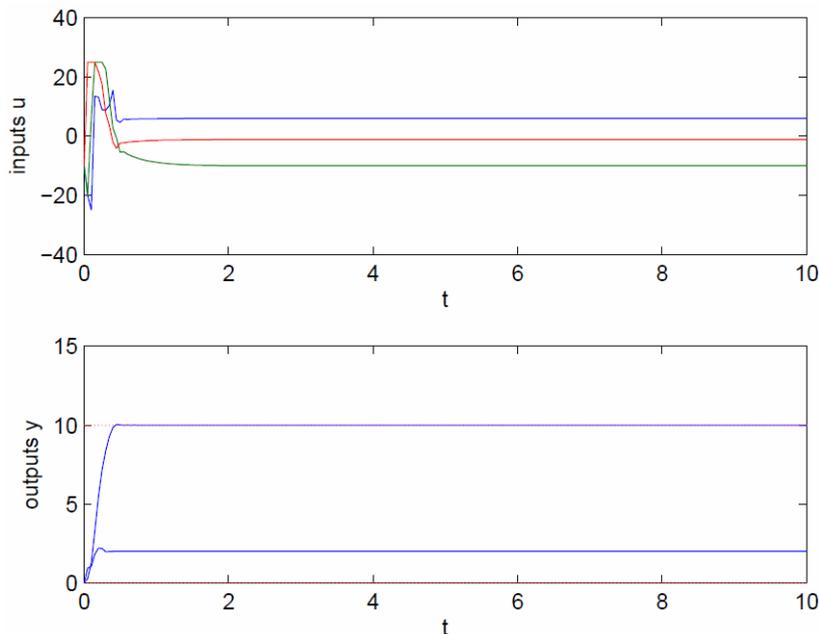


FIG. 4.1 – Système en situation nominale.

A partir de ces résultats, nous pouvons constater que la commande MPC tolère ce défaut actionneur automatiquement. En réalité, le procédé présente une redondance d'actionneurs qui se traduit par le fait que leur nombre est supérieur au nombre de sorties

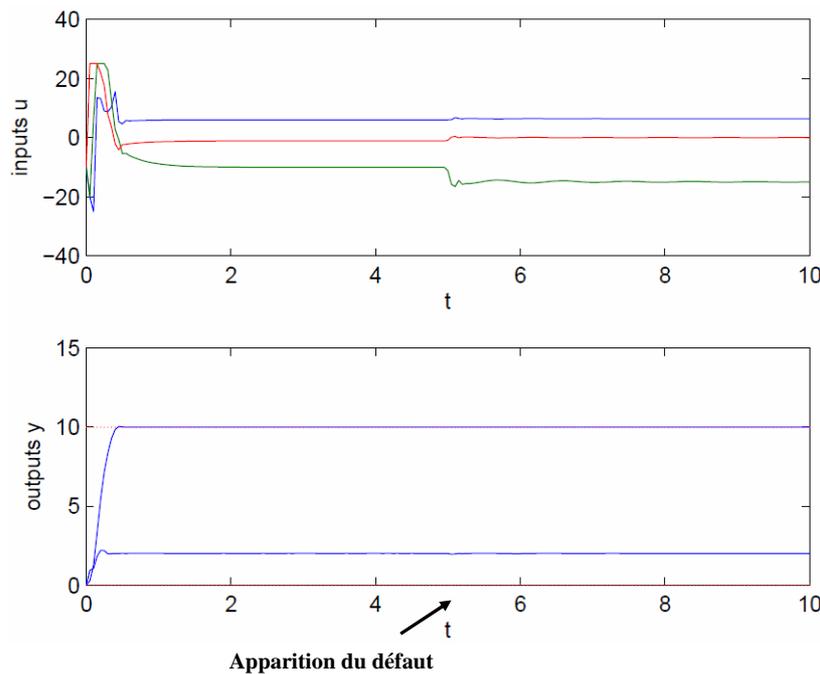


FIG. 4.2 – Système en situation défaillante-défaut sur u_3 .

contrôlées. Dans ce cas, la commande MPC redistribue systématiquement l'effort de commande entre les actionneurs pour éliminer ou masquer l'effet de ce défaut.

En l'absence de redondance des actionneurs, la commande MPC ne peut pas réaliser l'objectif de commande et peut même devenir instable, lors d'une apparition de défaut partiel d'actionneur par exemple. En conséquence, il est nécessaire de concevoir un module FDI pour diagnostiquer les défauts actionneurs, mettre à jour le modèle du procédé et modifier en ligne la formulation MPC en y intégrant cette information.

4.1.2 Capacité explicite à la tolérance aux défauts

Si l'information concernant le défaut est disponible en ligne, il est possible d'utiliser le formalisme MPC pour améliorer la tolérance aux défauts à chaque instant d'échantillonnage. Les défauts qui affectent le système peuvent ainsi être pris en compte dans le contrôleur MPC d'une manière naturelle (Maciejowski, 1999) :

- modifier le modèle interne du procédé employé par le MPC afin de refléter l'influence du défaut sur le procédé ;
- changer les contraintes afin de représenter certains types de défauts, notamment quand il s'agit des défauts sévères (blocage d'actionneur, défaillance du capteur,...) ;
- relaxer les objectifs initiaux de la commande en vue de refléter les limites du système en cas de défaut.

Toutefois, ces moyens reposent sur plusieurs hypothèses :

- la nature du défaut peut être localisée et ses effets sont modélisés ;
- le modèle interne du procédé peut être actualisé d'une manière automatique.

Ces hypothèses peuvent être traitées en employant un bloc FDI adéquat et fiable (au sens de l'exactitude des informations délivrées). Par exemple, si le bloc FDI détecte une défaillance totale sur un capteur d'une sortie mesurée, il est possible d'abandonner la commande de cette sortie en supprimant la sortie correspondante dans la fonction de coût. Pour ce faire, on met l'élément correspondant dans la matrice de pondération Q à zéro. Lorsque le bloc FDI signale un actionneur bloqué, le défaut dans ce cas sera pris en compte par une contrainte de type $|\Delta u_i| = 0$. Dans le cas d'un défaut sur le procédé lui-même, il est possible de changer/relaxer les objectifs ou/et les contraintes (Maciejowski, 1999). Pour les défauts partiels, un changement de modèle permet à la commande MPC de tolérer ce type de défaut. Il faut noter tout de même, que pour un défaut sévère, les paramètres utilisés dans l'algorithme MPC, i.e, l'horizon de prédiction et de commande ou les matrices de pondérations peuvent être changées (Kale et Chipperfield, 2005).

4.2 Diagnostic des systèmes complexes

La modularité peut être l'outil adéquat pour surveiller le fonctionnement du système complexe car elle repose sur la décomposition de la tâche globale de diagnostic en tâches locales relativement plus petites, implantées en plusieurs blocs fonctionnant en parallèle. Les résultats des diagnostics locaux peuvent être considérés comme un résultat global qui décrit l'état de santé de l'ensemble du système. Grâce à la modularité, nous mettons en place une stratégie pour répondre au problème du diagnostic de systèmes complexes. Nous pensons que cette stratégie est plus simple à utiliser que celle présentée dans (Patton *et al.*, 2007), (Klinkhieo *et al.*, 2008) et (Kambhampati *et al.*, 2007) (voir paragraphe 2.7), qui nécessite deux niveaux : niveau inférieur (niveau local) et niveau supérieur (coordinateur). La présence du coordinateur nous renvoie à la notion de centralisation contrairement à notre stratégie de diagnostic basée sur la structure retenue (paragraphe 2.7.1). Il s'agit, dans ce cas, de concevoir sur le même niveau des modules FDI associés à chaque sous-système. Le diagnostic local est alors réalisé au moyen d'observateurs décrits au chapitre 2. La démarche entreprise vise à répondre à deux questions

- Quelle est la raison du choix d'un module FDI approprié à la structure distribuée ?
- Comment détecter et estimer les défauts locaux à l'aide de ce module FDI conçu ?

4.2.1 Modèle du système

Considérons le modèle linéaire, en absence de bruits et de perturbations, du système complexe donné comme suit :

$$S \triangleq \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (4.2)$$

La mise en œuvre de l'algorithme de diagnostic passe par la décomposition du système global. Pour ce faire, il faut tout d'abord décomposer ce système global en plusieurs sous-systèmes afin de réduire la complexité du problème et ensuite déterminer l'approche adéquate pour concevoir ces différents blocs de diagnostics locaux.

4.2.2 Décomposition du système

La décomposition du système global S en N sous-systèmes S_i pour $i = 1, 2, \dots, N$, donne les sous-modèles suivants :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + w_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) + v_i(k) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.3)$$

Les vecteurs d'interaction sont définis comme les vecteurs contenant l'état et les interactions d'entrées produits sur le sous-système S_i par les autres sous-systèmes S_j , $j \neq i$ et $j = 1, 2, \dots, N$:

$$\begin{aligned} w_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N B_{ij}u_j(k) \\ v_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N C_{ij}x_j(k) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dans ce que suit, nous nous intéressons uniquement à la structure des vecteurs d'interactions suivante :

$$\begin{aligned} w_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) \\ v_i(k) &\triangleq 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ces variables représentent l'influence de S_j sur S_i . Chaque sous-système S_i considéré individuellement est directement soumis à deux entrées :

1. sa propre entrée de commande u_i et ;
2. son interaction avec les sous-systèmes.

L'objectif est de concevoir un module FDI associé à chaque sous-système pour estimer les défauts locaux.

4.2.3 Problème de propagation de défauts

Chaque sous-système S_i est en interconnexion avec les autres sous-systèmes S_j . Ces interconnexions entre les sous-systèmes peuvent être affectés par des défauts. L'exemple

suisant est étudié pour illustrer cette idée. Pour la simplification nous allons subdiviser un système global en deux sous-systèmes, les matrices du système A, B, C sont données par :

$$A \triangleq \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}; \quad B \triangleq \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \end{bmatrix} \quad C \triangleq \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

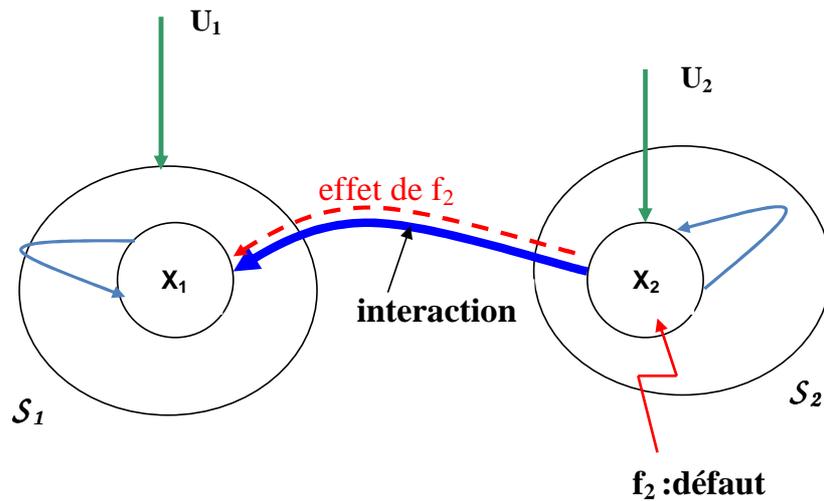


FIG. 4.3 – Propagation de défaut entre les deux sous-systèmes.

Le sous-système S_1 est représenté par les matrices du modèle local (A_{11}, B_{11}, C_{11}) et la matrice de l'interconnexion A_{12} . Le sous-système S_2 est représenté par les matrices du modèle local (A_{22}, B_{22}, C_{22}) . En plus de sa propre entrée de commande, le sous-système S_1 est influencé par son interconnexion avec le sous-système S_2 . Sur la figure 4.3, le graphe illustre comment le défaut f_2 affectant le sous-système S_2 se propage au sous-système S_1 . Cette propagation a lieu parce que le sous-système S_2 agit sur S_1 via une variable d'interconnexion. Nous en déduisons que la propagation d'autres défauts affectant un sous-système en interaction avec S_2 peut avoir lieu. Pour effectuer un bon diagnostic, un bloc FDI local devra faire face à ce problème de propagation.

4.2.4 Stratégie de conception du module FDI local

Pour le diagnostic de défauts dans les systèmes complexes, nous procédons comme pour les systèmes soumis à des entrées externes. Un système complexe est constitué de N sous-systèmes interconnectés. L'interconnexion de chaque sous-système avec les autres peut être considérée comme étant des *entrées inconnues*. Un défaut dans un sous-système se propage aux autres à travers les interconnexions. Un bloc FDI adéquat est alors conçu pour chaque sous-système afin d'estimer les défauts d'actionneurs ou capteurs locaux tout en découplant l'effet de propagation de défauts. Cette idée sera clarifiée dans la section suivante.

4.3 Diagnostic de défauts actionneurs

Cette partie décrit un système de diagnostic local permettant d'estimer les défauts susceptibles d'affecter les commandes des actionneurs d'un sous-système. Ces défauts peuvent se traduire par une perte de puissance totale ou partielle, voire un blocage d'un ou plusieurs de ces actionneurs. Leur criticité impose que ceux-ci soient traités dans les plus brefs délais. A cet égard, il serait souhaitable de mesurer les sorties des actionneurs puis de comparer celles-ci aux signaux de commande élaborés par les contrôleurs ; un écart supérieur à un seuil pouvant signifier l'apparition d'un défaut. En conséquence, concevoir un observateur local adéquat à base du modèle est une tâche très importante. Compte tenu du problème de propagation de défauts due aux interactions entre les sous-systèmes, les interconnexions seront vues comme des entrées inconnues dans le modèle mathématique. A partir de ce point de vue concernant les interconnexions, nous allons utiliser des observateurs robustes à entrées inconnues pour estimer les défauts actionneurs. Nous commençons par donner un aperçu rapide de deux catégories d'observateurs afin de justifier le choix de celui que nous utiliserons dans la suite.

Observateurs pour la détection

a) Observateur à entrée inconnue pour un FDI robuste

A des fins de robustesse, l'observateur à entrée inconnue (UIO) a été développé dans de nombreux travaux pour estimer l'état d'un système afin que l'erreur d'estimation converge vers zéro en présence de perturbations (entrées inconnues). Aussi, il a été utilisé pour le diagnostic des défauts, l'idée principale est d'éviter le déclenchement de fausses alarmes, pour ceci il est impératif que les résidus soient découplés des perturbations non mesurables mais par contre il faut qu'ils soient sensibles aux éventuels défauts. Soit un système représenté par l'équation d'état suivante :

$$S \triangleq \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gd(k) + Ef_a(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (4.7)$$

où $x \in \mathbb{R}^{n_x}$ le vecteur d'états, $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ le vecteur des commandes, $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ le vecteur des sorties, $f_a \in \mathbb{R}^{n_{f_a}}$ le vecteur des défauts actionneurs et $d \in \mathbb{R}^{n_d}$ le vecteur regroupant les entrées inconnues (de perturbation et les erreurs de modélisation, etc). Les matrices de distribution des entrées inconnues et de défauts sont notées respectivement G et E supposées toutes les deux de rang plein colonne et la paire (A, C) est observable. De plus, toute technique de diagnostic basée sur la génération de résidus, est tributaire du nombre de sorties du système nécessaire pour détecter et isoler les défauts. Une condition

nécessaire de détection des défauts est que le nombre de sorties du système soit strictement supérieur au nombre de défauts à détecter (Chen et Patton, 1999). Le défaut $f_a(k) = e(k - k_f)f(k)$ est considéré comme un défaut additif, la fonction indicatrice $e(k - k_f)$ est donnée par :

$$e(k - k_f) = \begin{cases} 0, & k \leq k_f \\ 1. & k > k_f \end{cases}$$

où k_f est l'instant de l'occurrence du défaut et $f(k)$ est un défaut à estimer. La structure de l'observateur UIO d'ordre plein est décrite par :

$$\begin{cases} z(k+1) = Mz(k) + Nu(k) + Ky(k) \\ \hat{x} = z(k) + Hy(k) \end{cases} \quad (4.8)$$

où $\hat{x} \in \mathbb{R}$ est l'estimation du vecteur d'état et $z \in \mathbb{R}^{n_x}$ un vecteur d'états de l'observateur, M, N, K, H sont des matrices de dimensions compatibles avec celles des signaux x, u et y . La dynamique de l'erreur d'estimation entre le système (4.7) et l'UIO (4.8) s'exprime par

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= x(k+1) - z(k+1) + Hy(k+1) \\ &= Ax(k) + Bu(k) + Gd(k) + Ef_a(k) - \left(Mz(k) + Nu(k) + Ky(k) + Hy(k+1) \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

En remplaçant :

- $Hy(k+1) = HCAx(k) + HCBu(k) + HCGd(k) + HCEf_a(k)$
- $z(k) = \hat{x} - Hy(k)$
- $K = K_1 + K_2$

l'équation (4.9) devient :

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = (A - HCA - K_1C)\tilde{x}(k) - \left(M - (A - HCA - K_1C) \right) \hat{x}(k) - (K_2 - MH)y(k) \\ \quad + (I - HC)Gd(k) + (I - HC)Ef_a(k) \\ r(k+1) = C\tilde{x}(k+1) \end{cases} \quad (4.10)$$

Les matrices M, N, K, H doivent être synthétisées dans le but d'assurer la convergence et la stabilité de l'erreur d'estimation $\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ et du résidu $r(k)$ en l'absence de défaut ($f_a(k) = 0$). En posant $T = I - HC$, si les conditions suivantes sont vérifiées :

$$\begin{cases} M & = TA - K_1C \quad \text{est stable} \\ TB - N & = 0 \\ K_2 - MH & = 0 \\ TG & = 0 \\ TE & \neq 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Alors la dynamique de l'erreur d'estimation d'état et le résidu s'écrivent :

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= M\tilde{x}(k) + TEf_a(k) \\ r(k+1) &= C\tilde{x}(k+1)\end{aligned}\tag{4.12}$$

L'erreur d'estimation d'état $\tilde{x} = x - \hat{x}$ dépend uniquement des défauts, par conséquent le résidu associé dépend aussi des défauts.

Les conditions d'existences de UIO :

Les conditions nécessaires et suffisantes d'existence d'un UIO sont :

- 1) $\text{rang}(CG) = \text{rang}(G) = n_d$, i.e, qu'il y ait au moins autant de mesures que d'entrées inconnues ;
- 2) (A_1, C) est détectable

$$A_1 = A - E[(CE)^T CE]^{-1}(CE)^T CA$$

Si les conditions 1) et 2) sont vérifiées alors :

1. si (C, A_1) est observable, le gain K_1 est calculé par un placement de pôle ;
2. la matrice H est calculé par

$$H = -G\left((CG)^T(CG)\right)^{-1}(CG)^T$$

et alors la stabilité de l'observateur UIO est garantie. On calcule les autres matrices à partir des relations données par (4.11) (Chen et Patton, 1999).

Remarque 4.1

Dans le cas où la paire (A_1, C) n'est pas observable, la solution générale présentée précédemment ne peut être employée. Une alternative proposée dans (Chen et Patton, 1999) consiste alors à utiliser un changement de base P tel que :

$$PAP^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, CP^{-1} = [\bar{C} \quad 0]$$

où (\bar{C}, A_{11}) est observable. Sous réserve que A_{22} soit Hurwitz.

b) Observateurs par placement de structures propres pour un FDI robuste-EAO

Dans le cas de l'observateur à entrées inconnues, l'erreur d'estimation d'état et le résidu sont indépendants des entrées inconnues. Une autre alternative consiste à rendre le résidu indépendant des entrées inconnues mais pas l'erreur d'estimation de l'état. Ici on ne s'attache pas à estimer l'état du système mais par contre à générer un résidu robuste, i.e, robuste dans le sens de découplage des entrées inconnues. Le système à surveiller est décrit par l'équation (4.7) et la structure de l'observateur d'ordre plein est la suivante :

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \end{cases} \quad (4.13)$$

L'erreur d'estimation d'état est donnée par $\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ et le résidu $r(k) \in \mathbb{R}^q$ par :

$$r(k) = W(y(k) - \hat{y}(k)) \quad (4.14)$$

où W est une matrice qui vise à rendre le résidu indépendant des entrées inconnues. La dynamique de l'erreur d'estimation d'état s'écrit :

$$\tilde{x}(k+1) = (A - LC)\tilde{x}(k) + Gd(k) + Ef_a(k) \quad (4.15)$$

la transformée en z du résidu est déduite de ces équations :

$$r(z) = WC(zI - A + LC)^{-1}[Gd(z) + Ef_a(z)] \quad (4.16)$$

Il est clair que d'après les expressions du résidu "r" et de l'erreur d'estimation d'état "x̃" ces grandeurs ne sont pas nulles, même en l'absence de défauts. Cependant, il est difficile de distinguer les effets des défauts de ceux des entrées inconnues. Pour minimiser les fausses alarmes, il faut rendre le résidu indépendant de ces entrées inconnues (perturbations), la condition de découplage suivante doit être satisfaite :

$$WC(zI - A + LC)^{-1}G = 0 \quad (4.17)$$

Si la matrice de distribution G est connue, le problème revient à trouver les matrices W et L qui satisfont à la relation donnée par (4.17). Des conditions suffisantes de découplage sont (Patton et Chen, 2000) :

$$\begin{cases} 1) WCG = 0; \\ 2) \text{toutes les lignes de } WC \text{ sont des vecteurs propres à gauche de } A - LC \\ \quad \text{qui correspondent à chaque valeur propre de } A - LC. \end{cases} \quad (4.18)$$

Avec ces conditions, la relation (4.16) ne dépendra plus que des défauts :

$$r(z) = WC(zI - A + LC)^{-1}Ef_a(z) \quad (4.19)$$

Une synthèse bibliographique relative à la mise en œuvre de techniques à base d'observateur à entrées inconnues et de techniques de placement de structures propres pour un FDI robuste sont présentées dans (Chen et Patton, 1999), (Frank et Ding, 1997) et (Patton et Chen, 2000).

Observateurs pour l'estimation

Peu de travaux envisagent le cas d'observateurs capables d'estimer les entrées inconnues d'un système. Le problème d'estimation des entrées inconnues est motivé en partie par certaines applications comme dans (Batman *et al.*, 2007) où les entrées du système sont difficiles à mesurer.

Dans (Hou et Patton, 1998), les auteurs fournissent une analyse complète du problème de l'observabilité et de la reconstruction des entrées, cette reconstruction est réalisée par différentiation des mesures pour les systèmes linéaires, ce qui s'avère délicat dès lors que les mesures sont bruitées. Corless et Tu (1998) proposent un observateur combiné d'état/entrée d'ordre plein qui ne nécessite pas de dériver les mesures pour estimer les entrées inconnues variant lentement dans le temps, bien que dans cet article, l'estimation asymptotique ne soit pas atteinte. Cependant, cet observateur existe sous des conditions restrictives. Xiong et Saif dans (Xiong et Saif, 2003) s'inspirent des travaux de (Corless et Tu, 1998) pour concevoir un observateur d'ordre réduit tout en s'affranchissant des limites de conception rencontrées dans (Corless et Tu, 1998). Wang et Daley (Wang et Daley, 1996) proposent un observateur adaptatif d'ordre plein pour estimer directement un défaut d'actionneur qui affecte un système linéaire, ici seules les mesures de sorties sont utilisées.

Soit un système représenté par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (4.20)$$

Dans (Corless et Tu, 1998), les auteurs traitent le problème d'estimation simultanée des entrées et des états, sans utiliser la différentiation des mesures. L'observateur utilisé dans ce cas est décrit comme suit :

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + G\hat{d}(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ \hat{d}(k) = \gamma K(y(k) - C\hat{x}(k)) \end{cases} \quad (4.21)$$

où γ est un scalaire positif.

Theorème 4.1 (Corless et Tu, 1998)

S'il existe des matrices L , K et deux matrices symétriques définies positives P et Q telles que

$$\begin{aligned} (A - LC)^T P (A - LC) - P &= -Q. \\ G^T P &= KC \end{aligned} \quad (4.22)$$

alors l'état et l'entrée du système (4.20) peuvent être asymptotiquement estimés avec une précision arbitraire, si l'entrée inconnue et sa dérivée sont bornées.

Dans (Wang et Daley, 1996), le problème traité est mathématiquement équivalent à l'estimation des entrées inconnues. Considérons quelques modifications sur l'observateur adaptatif proposé par Wang et Daley, la nouvelle structure de l'estimateur à entrées inconnues est donnée par (Xiong et Saif, 2003) :

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + Gd(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ \hat{d}(k+1) = \rho K((y(k) - C\hat{x}(k))) \end{cases} \quad (4.23)$$

où ρ est un scalaire positif, il représente un "facteur à régler à priori". Si les conditions dans le Théorème 4.1 sont satisfaites l'estimation asymptotique exacte peut être réalisée pour les entrées ainsi que pour les états.

Remarque 4.2 :

L'observateur (4.23), ne permet d'estimer en réalité que les entrées inconnues constantes ou lentement variables (Xiong et Saif, 2003).

Après avoir effectué un aperçu rapide sur les deux catégories d'observateurs, nous pouvons constater qu'avec la première catégorie, utilisée à des fins de robustesse, les observateurs UIO génèrent un résidu sensible uniquement aux défauts en présence des entrées inconnues. Ces derniers détectent seulement le défaut (pas d'estimation de défaut). Contrairement à cette catégorie, les observateurs de la deuxième catégorie sont utilisés pour estimer les états et les entrées inconnues qui peuvent être des défauts. Cependant, les deux catégories évoquées ne traitent pas à la fois la détection et l'estimation de défauts.

En s'appuyant sur l'idée de (Xiong et Saif, 2000), nous proposons une méthode adaptative qui permet d'estimer les défauts en dépit des entrées inconnues.

4.3.1 Synthèse d'un observateur adaptatif robuste RAFFE

Considérons le sous-système S_i en présence d'entrées inconnues et de défauts actionneurs :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + E_i f_{i_a}(k) + G_i d_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \end{cases} \quad (4.24)$$

où $x_i \in \mathbb{R}^{n_{x_i}}$ représente le vecteur d'états, $u_i \in \mathbb{R}^{n_{u_i}}$ est le vecteur d'entrées et $y_i \in \mathbb{R}^{n_{y_i}}$ est le vecteur de sorties. Les matrices à coefficients réels du système local S_i avec les dimensions correspondantes sont respectivement : A_{ii} la matrice d'état, B_{ii} la matrice de commande et C_{ii} la matrice de sortie. Le terme $f_{i_a} \in \mathbb{R}^{n_{f_{i_a}}}$ représente le vecteur des défauts et $E_i \in \mathbb{R}^{n_{x_i} \times n_{f_{i_a}}}$ représente sa matrice de distribution. Le vecteur $d_i \in \mathbb{R}^{n_{d_i}}$ représente les entrées inconnues et $G \in \mathbb{R}^{n_{x_i} \times n_{d_i}}$ représente sa matrice de distribution. Afin d'estimer

les défauts, une condition nécessaire est que le nombre de sorties soit supérieur au nombre des entrées inconnues du système. De même, pour l'estimation de f_{i_a} on supposera que la matrice E_i est de rang plein colonne et la paire (A_{ii}, C_{ii}) est observable. Il faut noter que le terme des entrées inconnues $G_i d_i$ peut représenter soit une perturbation, un bruit, un terme de non-linéarité dans les systèmes dynamiques où une incertitude de modélisation, un terme d'interconnexion dans les systèmes complexes, etc.

En supposant que le modèle soit parfait en l'absence de bruit et de perturbation, le terme $G_i d_i$ représente ici les termes d'interconnexions, i.e.,

$$G_i d_i(k) \triangleq \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij} x_j(k)$$

avec $G_i \triangleq [A_{i,1} \dots A_{i,i-1} \quad 0_{n_{x_i}} \quad A_{i,i+1} \dots A_{i,N}]$ et $d_i(k) \triangleq [\dots x_{i-1}^T(k) \quad 0_{n_{x_i}} \quad x_{i+1}^T(k) \dots x_N^T(k)]^T$ où la matrice G_i est parfaitement connue. Sur la base de cette représentation, on se propose de concevoir un FDI local robuste à ces interconnexions qui peuvent être affectées par des défauts apparaissant sur d'autres sous-systèmes (problème de propagation de défaut, paragraphe 4.2.3), afin de pouvoir estimer les défauts locaux avec précision.

Remarque 4.3 :

La matrice G_i n'est pas de rang plein colonne, une décomposition de rang sera appliquée sur la matrice G_i de telle sorte :

$$G_i d_i(k) = G_i^1 G_i^2 d_i(k)$$

où G_i^1 est de rang plein colonne et le terme $G_i^2 d_i(k)$ peut être considéré comme des nouvelles entrées inconnues (*Chen et Patton, 1999*).

L'observateur RAFFE-O (Robust Adaptive Fast Fault Estimation-Observer) proposé par (*Menighed et al., 2010b,c,a*) est capable d'estimer les défauts locaux, par ailleurs le résidu est découplé des entrées inconnues. Cet observateur d'ordre plein est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{x}_i(k+1) = A_{ii} \hat{x}_i(k) + B_{ii} u_i(k) + E_i \hat{f}_{i_a} + K_i (y_i(k) - C_{ii} \hat{x}_i(k)) \\ y_i(k) = C_{ii} \hat{x}_i(k) \\ r_i(k) = W_i (y_i(k) - \hat{y}_i(k)) \\ \hat{f}_{i_a}(k) = g(r_i(k)) \end{cases} \quad (4.25)$$

où \hat{x}_i est l'estimation d'état, \hat{f}_{i_a} est l'estimation de défaut réel f_{i_a} et $g(r_i(k))$ est une fonction dépendant de $r_i(k)$.

Notons

$$\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i, \quad \tilde{y}_i = y_i - \hat{y}_i \quad \tilde{f}_{i_a} = f_{i_a} - \hat{f}_{i_a} \quad (4.26)$$

La dynamique de l'erreur d'état est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \tilde{x}_i(k+1) = (A_{ii} - K_i C_{ii}) \tilde{x}_i(k) + E_i \tilde{f}_{i_a}(k) + G_i d_i(k) \\ \tilde{y}_i(k) = C_{ii} \tilde{x}_i(k) \end{cases} \quad (4.27)$$

L'expression générale du résidu est donnée par :

$$r_i(k) = W_i \tilde{y}_i(k) = W_i C_{ii} \tilde{x}_i(k) \quad (4.28)$$

La relation entre le résidu, les défauts actionneurs et les entrées inconnues peut être exprimée sous forme de fonction de transfert donnée par :

$$r_i(z) = H_{r_i d_i}(z) d_i(z) + H_{r_i \tilde{f}_{i_a}}(z) \tilde{f}_{i_a}(z) \quad (4.29)$$

où

$H_{r_i d_i}(z) = W_i C_{ii} (zI - A_{ii} + K_i C_{ii})^{-1} G_i$ représente la fonction de transfert entre les entrées inconnues et le résidu et,

$H_{r_i \tilde{f}_{i_a}}(z) = W_i C_{ii} (zI - A_{ii} + K_i C_{ii})^{-1} E_i$ représente la fonction de transfert entre les défauts actionneurs et le résidu.

La tâche de conception d'un observateur de diagnostic robuste est de calculer les matrices K_i et W_i de telle sorte que la matrice $A_{ii} - K_i C_{ii}$ soit stable et le résidu r_i est nul où proche de zéro en absence de défauts actionneurs, i.e, $H_{r_i d_i}(z) = 0$. Pour estimer les défauts actionneurs, une loi adaptative modifiée est élaborée pour assurer la rapidité d'estimation même pour des défauts rapidement variable.

La condition d'existence de l'observateur RAFFE et le calcul de ses matrices K_i et W_i sont établis après que le système (4.24) ait été transformé en Base Spéciale de Coordonnées (en anglais Special Coordinate Basis (SCB)) (Liu *et al.*, 2005). Ce changement de coordonnées met en évidence les propriétés structurelles du système, i.e., les structures des zéros finis et zéros à l'infinis, l'inversibilité à droite et à gauche du système (Chen, 1998). L'algorithme de calcul de l'observateur proposé dans (Menighed *et al.*, 2010b,c,a) est présenté en annexe A. Pour mettre en exergue l'avantage de cet observateur, nous allons reprendre l'exemple dans (Menighed *et al.*, 2010b,c,a). Dans cet exemple, le système est décrit en temps continu, la méthode de la conception de RAFFE est valable dans le continu.

- Cas Nominal :

$$S \triangleq \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.30)$$

où les matrices A, B, G, C sont

$$A = \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2632 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ 5.52 & 4.49 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ 0.0620 & -0.1320 \\ 0 & -7.1890 \\ 0.1000 & 0.3000 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

À l'aide de la transformation Base Spéciale de Coordonnées (SCB), nous pouvons constater facilement que le système $n_b = 2 > 0$ et la paire (A, C) est observable. Par conséquent, ce système satisfait donc aux conditions d'existence de l'observateur RAFFE. Suivant les étapes de l'algorithme (annexe A), nous obtenons A_b, C_b :

$$A_b = \begin{bmatrix} -2.3054 & 16.9099 \\ -8.0918 & 36.8087 \end{bmatrix}, C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La dimension de ligne de $C_d = 2$, donc la dimension maximale du vecteur de résidus est $m_r = n_y - m_d = 4 - 2 = 2$. Les matrices K et W , après le calcul, sont données par :

$$K = \begin{bmatrix} -3.2580 & 7.3713 & 0 & 0 \\ -0.2822 & -27.6453 & 0 & 0 \\ -21.5684 & -55.7305 & -2.2454 & 16.9099 \\ -81.2088 & -44.9979 & -8.0918 & 36.8987 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 7.1890 & -0.0000 & 1 & 0 \\ -0.5129 & -1.6129 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Cas défaillant :

Ici, l'objectif est d'estimer le défaut actionneur en dépit de la présence des entrées inconnues. Dans cette situation, le défaut actionneur apparaît sur le deuxième canal de la commande et sa matrice de distribution est donnée par :

$$E = \begin{bmatrix} 0.1761 \\ -7.5922 \\ 4.4900 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Avec la valeur de K calculée dans la première étape, nous pouvons vérifier que la matrice $A - KC$ est Hurwitz. Maintenant, nous calculons les matrices P et F :

$$P = 10^5 \times \begin{bmatrix} 1.0417 & 0.7267 & 0.1133 & -0.4500 \\ 0.7267 & 0.6072 & 0.0749 & -0.3761 \\ 0.1133 & 0.0749 & 0.0126 & -0.0464 \\ -0.4500 & -0.3761 & -0.0464 & 0.2330 \end{bmatrix}$$

$$F = 10^5 \times \begin{bmatrix} -4.8255 & -4.1461 & -0.4922 & 2.5682 \end{bmatrix}$$

Nous procédons à une simulation, en prenant pour entrée inconnue le signal

$$d(t) = \begin{bmatrix} 2\sin(0.3\pi t) \\ 3\cos(0.25\pi t) \end{bmatrix}$$

Lorsque, le système fonctionne sans défaut, la figure 4.4 montre le signal résidu pour l'entrée inconnue $d(t)$. On constate avec la simulation que l'observateur RAFFE est robuste par rapport à cette entrée inconnue.

Nous supposons à présent que le défaut actionneur apparaît après un temps donné. Deux

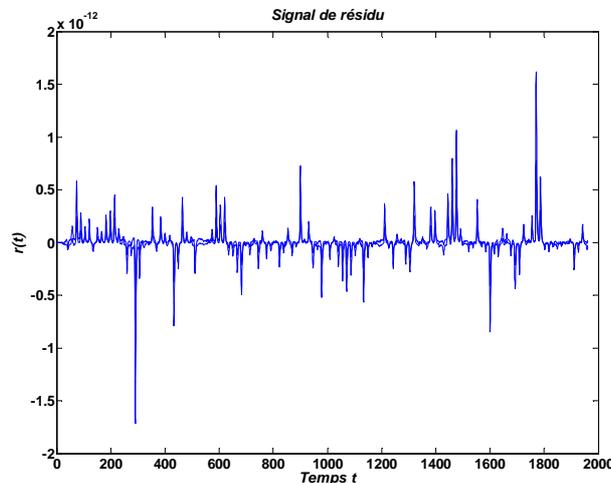


FIG. 4.4 – Le signal résidu.

défauts sont considérés, constant (un échelon) et variable dans le temps (forme dent de scie).

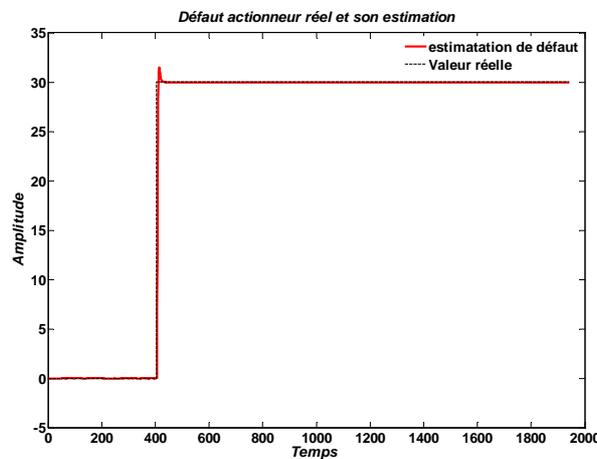


FIG. 4.5 – Estimation d'un défaut constant.

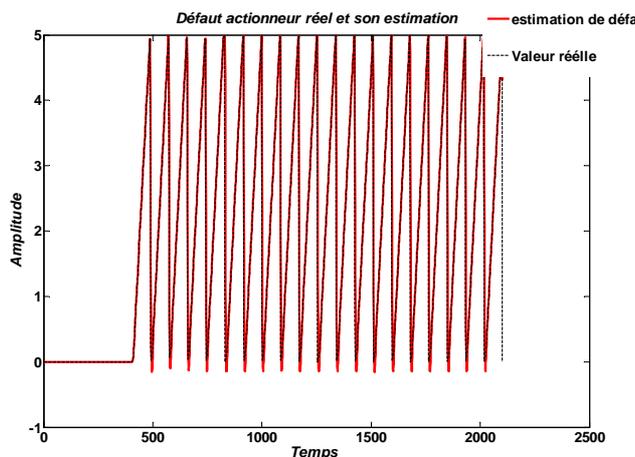


FIG. 4.6 – Estimation d'un défaut variable.

Les figures 4.5 et 4.6, représentent les résultats d'estimation des défauts, constant et variable, calculés par l'observateur RAFFE. On remarque que l'estimée du défaut est identique au défaut réel.

4.4 Système de diagnostic utilisant RAFFE-O

Le problème de diagnostic local consiste à détecter, isoler et estimer les défauts actionneurs d'un sous-système S_i pour $i = 1, 2, \dots, N$. Ces défauts peuvent se traduire par une perte de puissance partielle ou totale des actionneurs. La modélisation de la perte de puissance des actionneurs s'écrit simplement si l'on considère le signal $u_i^f(k)$ issu de l'actionneur défaillant est donné par :

$$u_i^f(k) = \left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k) \right) u_i(k) \quad (4.31)$$

où $u_i(k)$ est la sortie du contrôleur et $\Omega_i(k)$ est une matrice diagonale dont les éléments diagonaux vérifient les inégalités

$$\begin{aligned} -1 \leq \gamma_i^s(k) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ s = 1, 2, \dots, n_{u_i} \end{aligned}$$

où s désigne l'indice associé à un actionneur de sous-système S_i . Pour tout i les deux extrêmes $\gamma_i^s(k) = 0$ et $\gamma_i^s(k) = -1$ représentent respectivement des actionneurs sains et des actionneurs totalement défaillants. On supposera que le sous-système reste toujours commandable lorsqu'il est sujet aux défauts actionneurs, ce qui exclut le cas où $\gamma_i^s(k) = -1$. L'équation d'état avec une perte de puissance partielle est donnée par :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii} \left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k) \right) u_i(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_{ij}x_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.32)$$

Si un défaut actionneur apparaît sur le s -ième élément du vecteur de commande $u_i(k)$, et si b_s représente le s -ième vecteur colonne de la matrice B_{ii} du sous-système S_i $i = 1, 2, \dots, N$, on décompose la matrice B_{ii} comme suit

$$B_{ii} = [b_1|b_2|\dots|b_s|\dots|b_{n_{u_i}}]$$

et le vecteur de commande

$$u_i(k) = [u_i^1(k) \ u_i^2(k) \ \dots \ u_i^s(k) \ \dots \ u_i^{n_{u_i}}(k)]^T$$

En écrivant

$$\begin{aligned} B_{ii} \left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k) \right) u_i(k) &= B_{ii} \left(I_{n_{u_i}} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \gamma_i^s & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \right) u_i(k) \\ &= [b_1|b_2|\dots|b_s|\dots|b_{n_{u_i}}] \left(I_{n_{u_i}} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \gamma_i^s & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} u_i^1 \\ u_i^2 \\ \vdots \\ u_i^s \\ \vdots \\ u_i^{n_{u_i}} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Pour faciliter l'écriture, on désigne par \tilde{B}_{ii} la matrice qui contient tous les vecteurs colonnes de B_{ii} sauf le s -ième vecteur, i.e.,

$$\tilde{B}_{ii} = [b_1|b_2|\dots|b_{s-1}|b_{s+1}|\dots|b_{n_{u_i}}]$$

et $\tilde{u}_i(k)$ comme le vecteur qui contient tous les signaux de commande de u_i sauf le s -ième signal de commande, i.e.,

$$\tilde{u}_i(k) = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{s-1} \ u_{s+1} \ \dots \ u_{n_{u_i}}]^T$$

$$\begin{aligned} B_{ii} \left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k) \right) u_i(k) &= \tilde{B}_{ii} \tilde{u}_i(k) + b_s (1 + \gamma_i^s(k)) u_i^s(k) \\ &= \tilde{B}_{ii} \tilde{u}_i(k) + b_s f_{i_a}(k) \\ &= \tilde{B}_{ii} \tilde{u}_i(k) + E_i f_{i_a}(k) \end{aligned}$$

$$G_i d_i(k) \triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij} x_j(k)$$

$$\text{avec } G_i \triangleq [A_{i,1} \dots A_{i,i-1} \ 0_{n_{x_i}} \ A_{i,i+1} \dots A_{i,N}]$$

$$\text{et } d_i(k) \triangleq [x_1^T(k) \dots x_{i-1}^T(k) \ 0 \ x_{i+1}^T(k) \dots x_N^T(k)]^T$$

On ramène l'expression (4.32) sous la forme donnée par (4.24)

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + \tilde{B}_{ii}\tilde{u}_i(k) + E_i f_{i_a}(k) + G_i d_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.33)$$

On pose $f_{i_a} = (1 + \gamma_i^s(k))u_i^s(k) = \bar{u}_i^s(k)$ qui représente la sortie de l'actionneur d'indice s du sous-système S_i et $E_i \triangleq b_s$ sa matrice de distribution. Le modèle du système avec le défaut actionneur est réécrit sous la forme :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + \tilde{B}_{ii}\tilde{u}_i(k) + b_s \bar{u}_i^s(k) + G_i d_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.34)$$

où $\bar{u}_i^s(k)$ un signal inconnu à estimer

L'expression de l'observateur (4.25) pour le sous-système S_i donnée par (4.34) devient :

$$\begin{cases} \hat{x}_i(k+1) = A_{ii}\hat{x}_i(k) + \tilde{B}_{ii}\tilde{u}_i(k) + b_s \hat{u}_i^s(k) + K_i(y_i(k) - C_{ii}\hat{x}_i(k)) \\ \hat{y}_i(k) = C_{ii}\hat{x}_i(k) \\ r_i(k) = W_i(y_i(k) - \hat{y}_i(k)) \\ \hat{u}_i^s(k) = g(r_i(k)) \end{cases} \quad (4.35)$$

Il est donc possible d'utiliser l'observateur RAFFE donné par (4.35) à des fins d'estimation des sorties actionneurs inconnues et de robustesse vis-à-vis les entrées inconnues. Pour ce faire, il suffit d'estimer la sortie d'actionneur $\bar{u}_i^s(k)$ puis de comparer celles-ci au signal de commande élaboré par le contrôleur, i.e, $u_i^s(k)$; un écart supérieur à la valeur zéro signifie l'apparition d'un défaut.

Par ailleurs, la nécessité de localiser les défauts nous a conduit à utiliser un ensemble de RAFFE-O pour un diagnostic global, i.e, détection, estimation. Sans perte de généralité et pour ne pas alourdir les notations, nous considérons un sous-système multivariable composé de deux actionneurs. La généralisation à un nombre d'actionneurs supérieur à deux ne pose aucune difficulté. Nous allons subdiviser l'expression dans (4.34) en deux blocs en fonction des deux éventuels défauts actionneurs. Cela nous amène à considérer les deux cas :

- Cas 1 : défaut sur le deuxième actionneur

on pose $B_{ii} = [b_1 \quad b_2]$ et $u_i(k) = [u_i^1(k) \quad u_i^2(k)]^T$

$$[b_1 \quad b_2] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 + \gamma_i^2(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^1 \\ u_i^2 \end{bmatrix} = b_1 u_i^1(k) + b_2 (1 + \gamma_i^2(k)) u_i^2(k) = b_1 u_i^1(k) + b_2 \bar{u}_i^2(k) \quad (4.36)$$

La représentation d'état correspondante est :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + b_1u_i^1(k) + b_2\bar{u}_i^2(k) + G_id_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \end{cases} \quad (4.37)$$

- Cas 2 : défaut sur le premier actionneur

$$[b_1 \quad b_2] \begin{bmatrix} 1 + \gamma_i^1(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^1 \\ u_i^2 \end{bmatrix} = b_1(1 + \gamma_i^1)u_i^1(k) + b_2u_i^2(k) = b_1\bar{u}_i^1(k) + b_2u_i^2(k) \quad (4.38)$$

La représentation d'état correspondante est :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + b_2u_i^2(k) + b_1\bar{u}_i^1(k) + G_id_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.39)$$

Les commandes u_i^s pour $s = 1, 2$ élaborées par le contrôleur \mathcal{C}_i sont supposés connus. Lorsque les signaux de commande des actionneurs fonctionnent parfaitement \bar{u}_i^s est identique à u_i^s , en revanche ces signaux diffèrent en cas de défaut.

Observateurs

La stratégie retenue et illustrée sur la figure 4.7 consiste à mettre en œuvre un ensemble d'observateurs. Si les conditions d'existence sont vérifiées, chacun permet d'estimer le signal issu de l'actionneur qui lui est associé. Le système de diagnostic opère par comparaison entre les entrées de commande u_i^s pour $s = 1, 2$ élaborées par le contrôleur et celles estimées par l'observateur à entrées inconnues, notées \hat{u}_i^s . Un écart en valeur absolue supérieur à zéro traduit la présence d'un défaut.

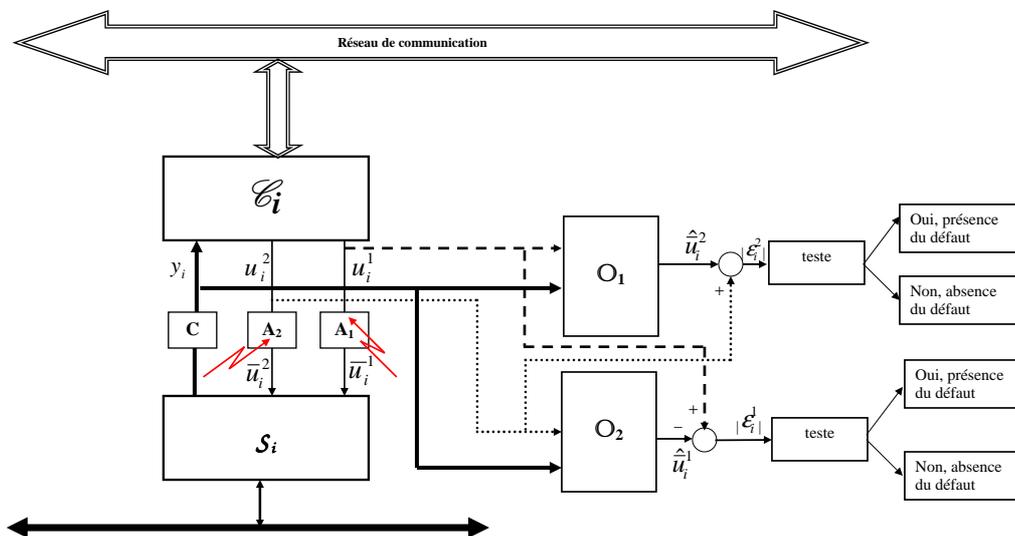


FIG. 4.7 – Ensemble d'observateurs pour le diagnostic de défauts partiels d'actionneurs.

Le premier observateur reconstruit \hat{u}_i^2 , une estimation de la commande \bar{u}_i^2 de l'actionneur (2) d'après les mesures y_i et l'entrée de commande u_i^1 calculée par le contrôleur. Les équations du premier observateur sont :

$$\mathbb{O}_1 \triangleq \begin{cases} \hat{x}_i(k+1) = A_{ii}\hat{x}_i(k) + b_1u_i^1(k) + b_2\hat{u}_i^2(k) + K_i^1(y_i(k) - C_{ii}\hat{x}_i(k)) \\ \hat{y}_i(k) = C_{ii}\hat{x}_i(k) \\ r_i^1(k) = W_i(y_i(k) - \hat{y}_i(k)) \\ \hat{u}_i^2(k) = g(r_i^1(k)) \end{cases} \quad (4.40)$$

De la même manière, le deuxième observateur reconstruit \hat{u}_i^1 , une estimation de la commande de l'actionneur \bar{u}_i^1 d'après les mesures y_i et l'entrée de commande calculée par le contrôleur u_i^2 . Les équations décrivant le deuxième observateur sont :

$$\mathbb{O}_2 \triangleq \begin{cases} \hat{x}_i(k+1) = A_{ii}\hat{x}_i(k) + b_2u_i^2(k) + b_1\hat{u}_i^1(k) + K_i^2(y_i(k) - C_{ii}\hat{x}_i(k)) \\ \hat{y}_i(k) = C_{ii}\hat{x}_i(k) \\ r_i^2(k) = W_i(y_i(k) - \hat{y}_i(k)) \\ \hat{u}_i^1(k) = g(r_i^2(k)) \end{cases} \quad (4.41)$$

L'observateur 1 restitue une estimation \hat{u}_i^2 de sortie de l'actionneur sain ou défaillant \bar{u}_i^2 . Un défaut actionneur est détecté et identifié si l'estimation \hat{u}_i^2 est différente de la commande calculée u_i^2 par le contrôleur. L'observateur 2 procède de la même manière pour estimer \hat{u}_i^1 , un simple test est en suite utilisé pour la détection.

Introduisons la grandeur $\varepsilon_i^s(k)$ représentant l'écart entre la commande $u_i^s(k)$ et la valeur estimée $\hat{u}_i^s(k)$. La présence ou l'absence de défaut est définie comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_i^s(k) = |u_i^s(k) - \hat{u}_i^s(k)| \neq 0 \implies \text{présence de défaut} \\ \varepsilon_i^s(k) = |u_i^s(k) - \hat{u}_i^s(k)| \simeq 0 \implies \text{absence de défaut} \\ \text{pour } s = 1, 2 \end{cases} \quad (4.42)$$

D'après la relation $(1 + \gamma_i^s(k))u_i^s(k) = \bar{u}_i^s(k)$ avec $s = 1, 2$, on obtient avec (4.42) :

$$\begin{aligned} u_i^s(k) + \gamma_i^s(k)u_i^s(k) &= \bar{u}_i^s(k) \\ -u_i^s(k) + \hat{u}_i^s(k) &= \hat{\gamma}_i^s.u_i^s(k) \\ \hat{\gamma}_i^s(k) &= \frac{-u_i^s(k) + \hat{u}_i^s(k)}{u_i^s(k)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

$\hat{\gamma}_i^s(k)$ représente la valeur estimée du facteur de perte de puissance, avec $-1 < \hat{\gamma}_i^s(k) \leq 0$

D'un point de vue diagnostic, on dispose au travers de l'ensemble d'observateurs RAFFE robustes aux entrées inconnues les différents types d'informations nécessaires :

d'une part le signal de détection, $\varepsilon_i(k)$, des défauts partiels d'actionneurs et d'autre part l'identification.

4.5 La commande FTC distribuée à base de MPC

Dans cette section nous présentons un scénario type de défaut qui se produit sur des actionneurs et nous traitons ensuite la modélisation de ce type de défaut dans le cadre des systèmes linéaires complexes sans contraintes pour réaliser une commande coopérative tolérante aux défauts à base de la loi de commande MPC. La stratégie de commande tolérante aux défauts considère le défaut partiel de l'actionneur comme une perte de puissance. Cette information concernant le facteur de perte de puissance serait disponible une fois que FDI a détecté, isolé et estimé le défaut actionneur dans le procédé. L'information de diagnostic est ensuite utilisée pour changer le modèle du procédé.

4.5.1 Défauts d'actionneurs

Intéressons nous à présent au problème qui consiste à modifier le modèle interne pour la commande FTC à base de MPC. Tout d'abord, rappelons que l'algorithme de la loi de commande prédictive à base de modèle repose principalement sur le modèle mathématique interne du procédé à commander. Cette loi est la solution du problème d'optimisation d'une fonction de coût donnée sous forme quadratique. Il est important de rappeler que la performance de la commande MPC dépend fortement de l'exactitude des prédictions en boucle ouverte, et donc du modèle du procédé. Il est possible que la trajectoire prévue diffère, peut-être d'une manière considérable, de la trajectoire réelle suivie du procédé. La différence entre le procédé et son modèle est connue sous le nom de "écart procédé-modèle" (en anglais plant-model mismatch), qui peut rendre, dans le pire scénario, un système instable. Bien que le dispositif de rétro-action de performance dans la commande MPC puisse réduire l'anomalie entre le système et le comportement prévu, la commande MPC n'est pas conçue pour manipuler explicitement l'écart du modèle.

L'effet des défauts sur le procédé se manifeste par un changement dans le comportement dynamique du procédé. Ce changement implique aussi un écart procédé-modèle. Sachant que la commande MPC dépend explicitement du modèle, nous pouvons imaginer un traitement face aux défauts en actualisant le modèle interne, et en laissant l'optimiseur trouver comment commander le système dans ses nouvelles conditions .

Cete hypothèse peut être traitée en utilisant un module FDI adéquat et fiable au sens de l'exactitude de l'information de diagnostic générée à l'aide de l'observateur conçu auparavant.

4.5.2 Architecture de la commande FTC coopérative

La figure 4.8 présente l'architecture de la commande FTC active coopérative et tolérante aux défauts proposée dans notre travail. Cette architecture se compose de plusieurs modules contenant chacun la commande MPC et le module FDI, comme il est montré en figure 4.9.

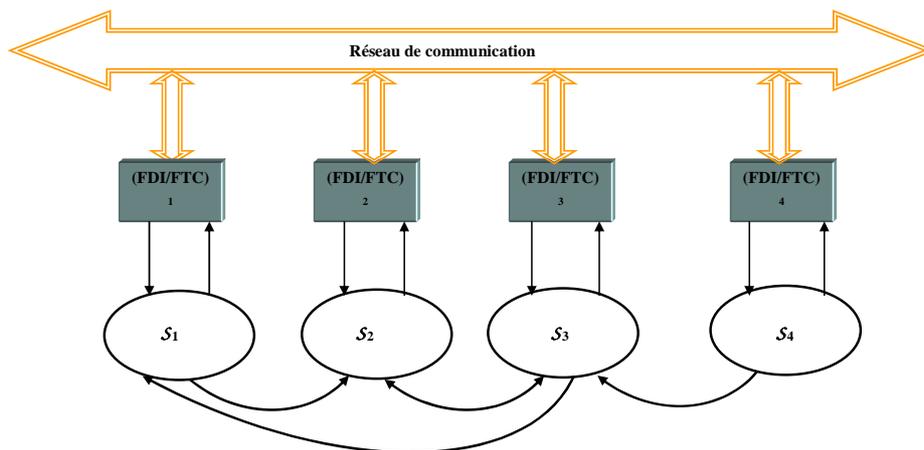


FIG. 4.8 – Architecture de la commande coopérative tolérante aux défauts.

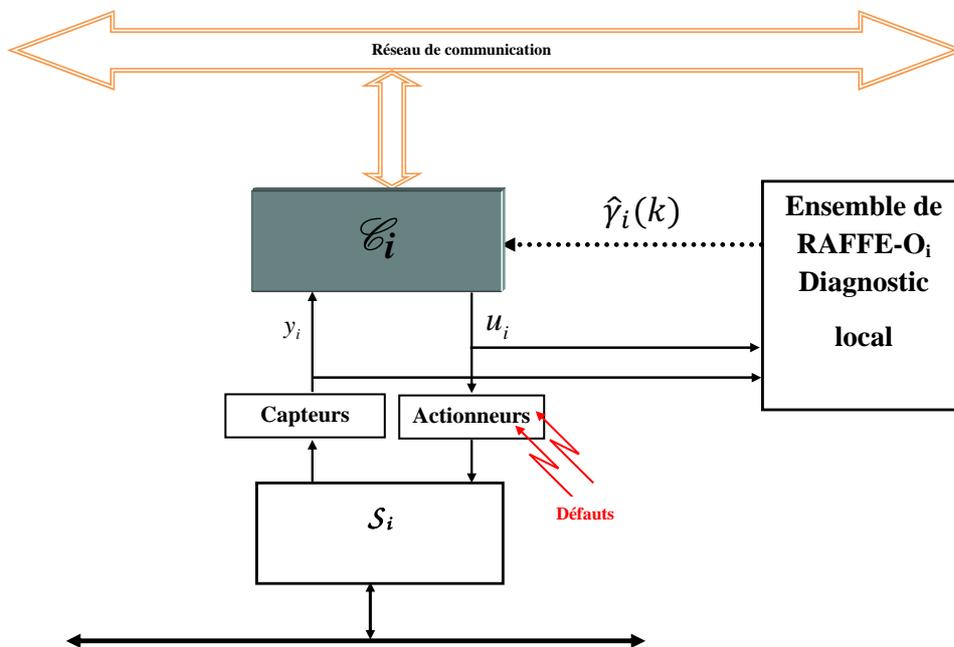


FIG. 4.9 – Diagramme interne d'un FTC/FDI local- défauts actionneurs.

Nous combinons le bloc FDI proposé dans le paragraphe 4.3.1 et 4.4 et la commande MPC distribuée proposée dans le chapitre 3 pour réaliser la commande coopérative tolérante aux défauts. Pour un défaut partiel d'actionneur, le bloc FDI fournit en ligne toute l'information de diagnostic concernant le mode nominal ou le mode défaillant, et ceci pour pouvoir effectuer la mise à jour instantanée du modèle du sous-système S_i . Le nouveau modèle du sous-système en cas de défaut remplace le modèle nominal dans la formulation MPC. Lors de l'apparition d'un défaut partiel d'actionneur, le module FDI localise et estime les facteurs de perte de puissance $\gamma_i(k)$, qui entre dans le modèle défaillant.

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}\left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k)\right)u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.44)$$

En substituant $B_{ii}\left(I_{n_{u_i}} + \Omega_i(k)\right) = B_{ii}^f$ dans l'expression (4.44) on obtient le modèle défaillant :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}^f u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.45)$$

l'expression (4.45) se substitue au le modèle nominal suivant :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.46)$$

dans la formulation MPC. Dans ce cas, ce nouveau modèle qui correspond au procédé réel en mode défaillant va pouvoir en quelque sorte éliminer l'écart procédé-modèle. Il est important de mentionner ici que la fonction de coût reste inchangée ainsi que les horizons de prédiction. A ce stade, nous avons donné l'expression du modèle local défaillant représentant un défaut actionneur dans un sous-système S_i pour $i = 1, 2, \dots, N$, indispensable pour la formulation de commande MPC. Après l'obtention de ce modèle, il s'agit ensuite d'effectuer la même procédure que nous avons déjà présentée au chapitre 3, pour réaliser la commande distribuée basée sur la commande MPC.

4.5.3 Défauts capteurs

Les mesures issues des capteurs contiennent l'information la plus importante pour la loi de commande du système. Le comportement du système en boucle fermée dépend de

l'information délivrée par les capteurs sur l'état du système et son environnement. Un comportement non désiré, voire dangereux du système, peut avoir lieu à la suite d'un défaut de capteur. Les capteurs sont affectés par du bruit, des biais, des dérives ou une perte totale du capteur, etc. Dans ce travail, seuls des défauts de type biais ou dérives sont considérés.

Dans ce paragraphe, nous montrons comment la technique d'observation développée auparavant peut être adaptée et utilisée pour détecter et estimer un défauts capteur sur un sous-système S_i . Au delà du diagnostic des défauts capteurs, on traite également le problème de la commande tolérante à des défauts capteurs via une correction de la mesure défaillante sur la base des informations issues des blocs FDI. Une stratégie de diagnostic et de tolérance aux défauts est mise en œuvre dans un exemple numérique. Nous présentons l'approche de [Park et al. \(1994\)](#) et [Saif et Guan \(1993\)](#) pour représenter les défauts capteurs comme des défauts actionneurs par un système augmenté. Cette représentation nous l'adaptions à notre contexte afin qu'elle soit compatible avec l'utilisation de l'observateur RAFFE.

La commande coopérative embarquée et tolérante aux défauts abordée précédemment est basée essentiellement sur la connaissance parfaite du modèle du système. Pour concevoir le modèle approprié dans le cas de défauts capteurs, nous considérons et incorporons leurs effets dans notre modèle à l'instant de leur apparition. Considérons un sous-système linéaire interconnecté affecté par un défaut capteur

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) \\ y_{mi}(k) = C_{ii}x_i(k) + F_i f_{si}(k) \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.47)$$

où $f_{si}(k) \in \mathbb{R}^{r_{xi}}$ est un vecteur inconnu représentant des défauts capteurs, F_i représente sa matrice de distribution de dimension compatible avec celles des signaux f_{si} et y_{mi} .

Proposition 4.1 ([Xiong et Saif, 2000](#))

Pour toute fonction continue par morceaux $f_{si} \in \mathbb{R}^{r_{xi}}$ et une matrice stable $A_{fi} \in \mathbb{R}^{r_{xi} \times r_{xi}}$, il existe toujours un vecteur d'entrée $\xi_i(k) \in \mathbb{R}^{r_{xi}}$ de telle sorte que :

$$f_{si}(k+1) = A_{fi}f_{si}(k) + \xi_i(k) \quad (4.48)$$

Il résulte de l'équation précédente, le vecteur ξ_i est donné par :

$$\xi_i(k) = f_{si}(k+1) - A_{fi}f_{si}(k). \quad (4.49)$$

Après avoir combiné les équations (4.47) et (4.49), l'état étendu obtenu du nouveau système d'ordre $(n_{xi} + r_{xi})$ est donné sous la forme :

$$\tilde{S}_i \triangleq \begin{cases} \begin{pmatrix} x_i(k+1) \\ f_{si}(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{ii} & 0 \\ 0 & A_{fi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i(k) \\ f_{si}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{ii} \\ 0 \end{pmatrix} u_i(k) + \begin{pmatrix} 0 \\ I_{r_{xi}} \end{pmatrix} \xi_i(k) + \begin{pmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij} \\ 0 \end{pmatrix} x_j(k) \\ y_{mi}(k) = [C_{ii} \quad F_i] \begin{pmatrix} x_i(k) \\ f_{si}(k) \end{pmatrix} \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.50)$$

Hypothèse

Dans la suite de ce travail, un seul défaut capteur est considéré. La localisation du défaut est supposée connue a priori fournie par un banc d'observateurs (Chen et Patton, 1999). Sous cette hypothèse, l'observateur RAFFE (4.25) peut être utilisé pour l'identification du défaut.

Soit $f_{si}^l(k)$ un signal inconnu et F_i^l le vecteur de localisation du défaut capteur. Toutes les composantes de ce vecteur sont nulles à l'exception de l -ième composante qui est égale à 1 pour indiquer le capteur affecté par $f_{si}^l(k)$. Dans ce cas, A_{fi}^l dans la proposition (4.1) est un scalaire négatif et la formule (4.51) peut être réécrite comme suit

$$\tilde{S}_i \triangleq \begin{cases} \begin{pmatrix} x_i(k+1) \\ f_{si}^l(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{ii} & 0 \\ 0 & A_{fi}^l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i(k) \\ f_{si}^l(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{ii} \\ 0 \end{pmatrix} u_i(k) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \xi_i^l(k) + \begin{pmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij} \\ 0 \end{pmatrix} x_j(k) \\ y_{mi}(k) = [C_{ii} \quad F_i^l] \begin{pmatrix} x_i(k) \\ f_{si}^l(k) \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad l = 1, \dots, n_{y_i} \end{cases} \quad (4.51)$$

A partir de cette expression, il est simple de constater que la dynamique de ce nouveau système a la même forme que celle donnée par (4.34) qui décrit un système affecté par des défauts actionneurs. Au final, nous procédons de la même manière pour estimer la valeur exacte du signal inconnu $\xi_i^l(k)$, sous les conditions nécessaires et suffisantes d'existence de l'observateur RAFFE.

L'étape suivante consiste à s'accommoder de la présence de ce défaut en remplaçant le signal inconnu par son estimation et en corrigeant la mesure pour l'utiliser dans la formulation MPC. Dans le cas nominal, le signal de sortie y_i est la variable de sortie mesurée y_{mi} (voir figure 4.10).

A l'occurrence d'un défaut capteur, la variable de sortie mesurée est donnée par :

$$y_{mi}(k) = y_i(k) + F_i^l f_{si}^l(k) \quad \text{avec} \quad y_i(k) = C_{ii} x_i(k) \quad (4.52)$$

Sachant que la formulation MPC se base sur les signaux de sorties y_i pour élaborer la loi de commande, nous corrigeons la variable de sortie mesurée y_{mi} par une simple opération :

$$y_i(k) = y_{mi}(k) - F_i^l \hat{f}_{si}^l(k) \quad (4.53)$$

Cette valeur corrigée y_i est utilisée dans la formulation MPC pour réaliser la commande coopérative embarquée et tolérante aux défauts (voir figure 4.11)

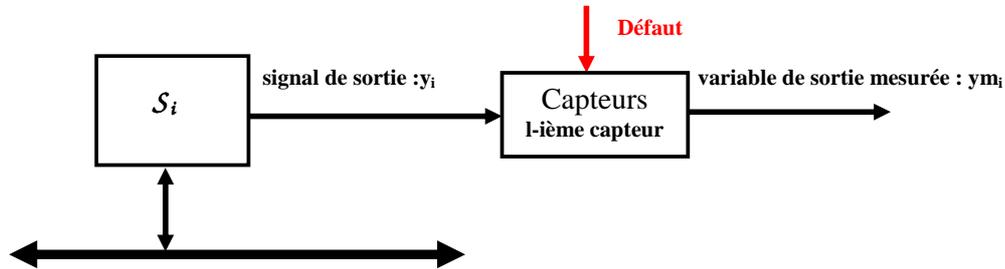


FIG. 4.10 – Représentation du défaut capteur.

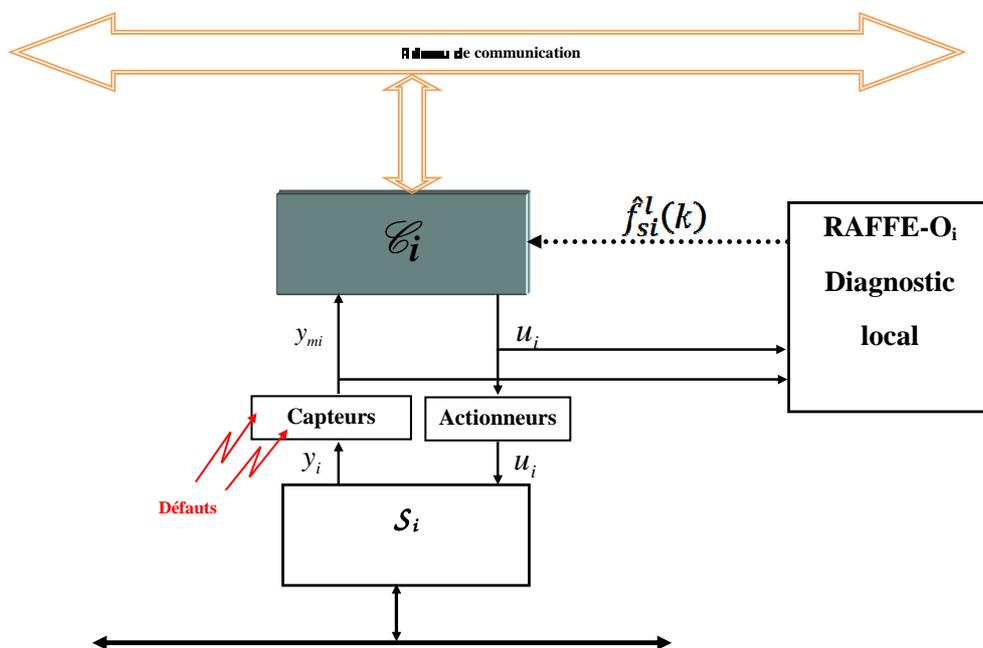


FIG. 4.11 – Diagramme interne d'un FTC/FDI local : défauts capteurs.

De façon générale, le système tolérant aux défauts pour un système complexe, suggère que chaque contrôleur \mathcal{C}_i puisse inclure un module FDI adéquat capable de détecter, isoler et estimer les défauts locaux. Ces informations sur le défaut seront ensuite utilisées pour la mise à jour du modèle du sous-système. A base de ce modèle, la commande coopérative et tolérante aux défauts est utilisée pour minimiser l'effet des défauts.

4.5.4 Défaillance du réseau

On considère maintenant le réseau comme une composante susceptible d'être défaillant au même titre que les autres composants (capteurs, actionneurs). Le caractère embarqué impose la prise de décision sans coopération et l'autonomie des sous-systèmes en cas de

défaillance du réseau. Ici, nous nous attacherons à analyser l'influence du réseau défaillant sur la stabilité globale du système complexe.

4.5.4.1 Analyse de stabilité de la commande MPC distribuée

– a) Analyse de stabilité locale

La stabilité locale du sous-système S_i , pour $i = 1, 2, \dots, N$, en boucle fermée ne garantit pas systématiquement la stabilité du système global et vice-versa, toutefois ces résultats sont en quelque sorte liés, il peut être utile de comparer les résultats locaux avec la stabilité globale. Notez que, d'un point de vue local, les interactions peuvent être considérées comme des perturbations, par conséquent elles doivent être exclues de la dynamique locale.

Theorème 4.2 Stabilité locale (*Vaccarini et al., 2009*)

Le i -ème système local en boucle fermée obtenu par la boucle de rétro-action du sous-système S_i avec son sous contrôleur C_i , solution du problème de la commande MPC distribuée, est asymptotiquement stable si et seulement si :

$$\left| \lambda_{ij} \left\{ \left[\begin{array}{cc} A_{ii} & B_{ii} \\ -K_i L_i A_{ii} & I - K_i (M_i + L_i B_{ii}) \end{array} \right] \right\} \right| < 1, \forall j \in [1, 2, \dots, n_{L_i}], \quad n_{L_i} = n_{x_i} + n_{u_i} \quad (4.54)$$

où n_{L_i} la dimension du i -ème système local en boucle fermée.

Démonstration 4.1

Grâce aux résultats présentés dans la section 3.11, la loi de commande pour le sous-système donnée par les équations d'états (3.33) et qui minimise la fonction coût (3.36) est exprimée par (3.58) où à chaque instant k , l'état x_i est supposé mesuré (connu), donc $\hat{x}_i(k|k) = x_i(k)$. A partir de ces résultats, le système local en boucle fermée est décrit comme suit :

$$x_i(k) = A_{ii}x_i(k-1) + B_{ii}u_i(k-1) + w_i(k-1) \quad (4.55a)$$

$$u_i(k) = -K_i L_i x_i(k) + (I - K_i M_i)u_i(k-1) + K_i Y_i^d(k+1, p|k) - K_i S_i \hat{W}_i(k, p+1|k-1) \quad (4.55b)$$

$$- K_i T_i \hat{V}_i(k, p+1|k-1)$$

$$y_i(k) = C_i x_i(k) + v_i(k) \quad (4.55c)$$

Après avoir combiné le vecteur d'état $x_i(k)$ et le vecteur de commande $u_i(k)$, l'état étendu est obtenu sous la forme :

$$x_{L_i}(k) = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ u_i(k) \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Ainsi, le système local en boucle fermée s'exprime par la relation suivante :

$$\begin{aligned} x_{L_i}(k) &= A_{L_i}x_{L_i}(k-1) + B_{L_i}Y_i^d(k+1, p|k) + F_{L_i}w_i(k-1) + S_{L_i}\hat{W}_i(k, p+1|k-1) \\ &\quad + T_{L_i}\hat{V}_i(k, p+1|k-1) \\ y_{L_i}(k) &= C_{L_i}x_{L_i}(k) + v_i(k) \end{aligned} \quad (4.57)$$

avec les matrices suivantes

$$\begin{aligned} A_{L_i} &\triangleq \begin{bmatrix} A_{ii} & B_{ii} \\ -K_iL_iA_{ii} & I - K_i(M_i + L_iB_{ii}) \end{bmatrix}, B_{L_i} \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ K_i \end{bmatrix}, C_{L_i} \triangleq [I \quad 0], \\ F_{L_i} &\triangleq \begin{bmatrix} I \\ -K_iL_i \end{bmatrix}, S_{L_i} \triangleq \begin{bmatrix} I \\ -K_iS_i \end{bmatrix}, T_{L_i} \triangleq \begin{bmatrix} I \\ -K_iT_i \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

Par conséquent la stabilité du système local en boucle fermée est déterminée par les valeurs propres de la matrice dynamique A_{L_i} . Elle est stable si et seulement si ses valeurs propres sont à l'intérieur du cercle unité.

– b) Analyse de stabilité globale de la structure distribuée

Afin d'effectuer une analyse de stabilité globale du système complexe en boucle fermée, les interactions entre les sous-systèmes sont prises en compte.

Theorème 4.3 : Stabilité globale de la structure distribuée (*Vaccarini et al., 2009*)

Le système en boucle fermée obtenu par la boucle de rétro-action du système S avec ses sous contrôleurs indépendants C_i pour $i = 1, 2, \dots, N$, solution du problème de la commande MPC distribuée, est asymptotiquement stable si et seulement si :

$$\left| \lambda_j \left\{ \begin{bmatrix} A & 0 & B\Gamma^0 & 0 \\ \bar{L} & \bar{A} & \bar{M} & \bar{B} \\ \theta A + \phi\bar{L} & \phi\bar{A} & \rho + \theta B\Gamma^0 + \phi\bar{M} & \phi\bar{B} \\ 0 & 0 & I_{mn_u} & 0 \end{bmatrix} \right\} \right| < 1, \forall j \in [1, 2, \dots, n_{Dis}], \quad n_{Dis} = pn_x + n_x + 2mn_u \quad (4.58)$$

où n_{Dis} est la dimension du système global en boucle fermée.

Démonstration 4.2

Fusionnant l'équation de procédé, l'équation globale de prédiction et l'équation de la loi de commande, la représentation du système global en boucle fermée dans l'espace d'état

est donnée par :

$$\begin{aligned}
x(k) &= Ax(k-1) + B\Gamma^0 U(k-1, m|k-1) \\
\hat{X}(k, p|k-1) &= \bar{L}x(k-1) + \bar{A}\hat{X}(k-1, p|k-2) + \bar{M}U(k-1, m|k-1) + \bar{B}U(k-2, m|k-2) \\
U(k, m|k) &= \theta x(k) + \phi \hat{X}(k, p|k-1) + \rho U(k-1, m|k-1) + \kappa Y^d(k+1, p|k) \\
y(k) &= Cx(k)
\end{aligned} \tag{4.59}$$

Définissons l'état étendu comme suit :

$$X_{Dis} \triangleq \begin{bmatrix} x(k) \\ \hat{X}(k, p|k-1) \\ U(k, m|k) \\ U(k-1, m|k-1) \end{bmatrix} \tag{4.60}$$

les équations dynamiques distribuées globales deviennent :

$$\begin{aligned}
X_{Dis}(k) &= A_{Dis}X_{Dis}(k-1) + B_{Dis}Y_i^d(k+1, p|k) \\
y(k) &= C_{Dis}X_{Dis}(k)
\end{aligned} \tag{4.61}$$

où

$$A_{Dis} \triangleq \begin{bmatrix} A & 0 & B\Gamma^0 & 0 \\ \bar{L} & \bar{A} & \bar{M} & \bar{B} \\ \theta A + \phi \bar{L} & \phi \bar{A} & \rho + \theta B\Gamma^0 + \phi \bar{M} & \phi \bar{B} \\ 0 & 0 & I_{mn_u} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{Dis} \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \kappa \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{Dis} = [C \ 0 \ 0 \ 0]$$

La stabilité du système global en boucle fermée est déterminée par les valeurs propres de la matrice dynamique A_{Dis} . Elle est stable si et seulement si ces valeurs propres est à l'intérieur du cercle unité.

Corollaire 4.1 Stabilité globale de la structure décentralisée : défaut réseau

Sous l'hypothèse 4.3, si aucune communication n'est possible entre les sous contrôleurs, le système en boucle fermée global est asymptotiquement stable si et seulement si :

$$\left| \lambda_j \left\{ \begin{bmatrix} A & B\Gamma^0 \\ \theta A & \rho + \theta B\Gamma^0 \end{bmatrix} \right\} \right| < 1, \forall j \in [1, 2, \dots, n_{Dec}], \quad n_{Dec} = n_x + mn_u \tag{4.62}$$

où n_{Dec} est la dimension du système global en boucle fermée.

Démonstration 4.3

Lorsque la communication n'est plus possible entre les sous contrôleurs, les équations (3.44) doivent donner des valeurs nulles pour les interactions, ce qui implique $\tilde{A} = 0$, $\tilde{B} = 0$, $\tilde{C} = 0$.

Substituant ces valeurs dans la matrice dynamique du théorème 4.3, le système d'ordre réduit en boucle fermée est obtenu et exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} X_{Dec}(k) &= A_{Dec}X_{Dec}(k-1) + B_{Dec}Y_i^d(k+1, p|k) \\ y(k) &= C_{Dec}X_{Dec}(k) \end{aligned} \quad (4.63)$$

où

$$X_{Dec} \triangleq \begin{bmatrix} x(k) \\ U(k, m|k) \end{bmatrix} \quad A_{Dec} \triangleq \begin{bmatrix} A & B\Gamma^0 \\ \theta A & \rho + \theta B\Gamma^0 \end{bmatrix} \quad B_{Dec} \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ \kappa \end{bmatrix}, \quad C_{Dec} \triangleq [C \quad 0] \quad (4.64)$$

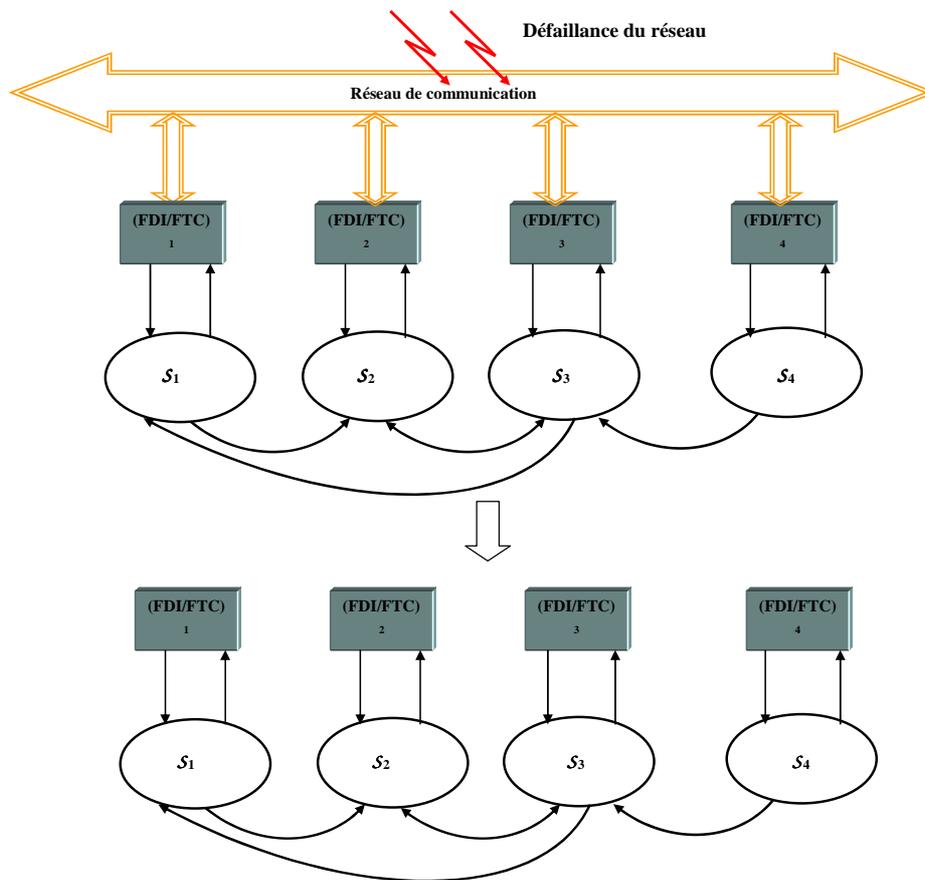


FIG. 4.12 – Défaillance du réseau dans la structure distribuée : obtention de la structure décentralisée.

Les expressions des vecteurs et matrices utilisées pour l'étude de stabilité sont dans les paragraphes 3.12.3, 3.12.3.2 et 3.12.3.3

4.6 Exemple numérique et résultats de simulation

La stratégie de la commande coopérative et tolérante aux défauts développée et étudiée dans ce chapitre est appliquée en simulation sur un exemple numérique, que l'on trouvera tout au long de cette section. Pour des raisons de simplicité, le système global utilisé est décomposé en deux sous-systèmes interconnectés. Sachant que la mise en place de cette stratégie reste toujours applicable sur les N sous-systèmes interconnectés. En outre, il faut mentionner que nous avons réalisé une décomposition mathématique de telle sorte que les deux sous-systèmes soient commandés localement (selon l'équation (4.5)). Cependant et en pratique, la décomposition est suggérée par la réalité physique des sous-systèmes. Les défauts considérés dans cette partie sont de type actionneur et capteur. Considérons un système linéaire complexe S , représenté sous la forme suivant :

$$S \triangleq \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (4.65)$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.028 & 0.2 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0.2 & 0.772 & 0.2 & 0 & 0.02 & 0 \\ 0.01 & 0.075 & 0.0407 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0.0107 & 0.08 & 0.2 \\ 0.2 & 0.02 & 0 & 0.09 & 0.021 & 0.34 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0.04 & 0.09 & 0.199 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.787 & 0.02 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.787 & -0.4 & -0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.01 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.04 \end{bmatrix}, \quad C = I_6$$

L'examen du modèle global nous amène à décomposer le système en deux sous-systèmes où chacun est commandé par un sous-contrôleur local qui communique via le réseau de communication (voir figure 4.13). Les contrôleurs C_1 et C_2 sont implantés à l'aide de l'algorithme décrit en section 3.12.4, la réalisation dans l'espace d'état correspondante de S_1 (S_2) a la forme (4.3) (paragraphe 4.2.2) avec les matrices A_{11}, B_{11}, C_{11} (A_{22}, B_{22}, C_{22}) qui représentent les sous-systèmes isolés et la matrice A_{12} (A_{21}) qui représente l'interaction entre les deux sous-systèmes.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.028 & 0.2 \\ 0.2 & 0.772 & 0.2 \\ 0.01 & 0.075 & 0.0407 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0.0107 & 0.08 & 0.2 \\ 0.09 & 0.021 & 0.34 \\ 0.04 & 0.09 & 0.199 \end{bmatrix}, \quad A_{21} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.02 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.5 & 0.3 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.787 & 0.02 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad B_{22} = \begin{bmatrix} 0.787 & -0.4 & -0.2 \\ 0.6 & 0.01 & 0.1 \\ 0.2 & 0.7 & 0.04 \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = I_3, \quad C_{22} = I_3$$

Une analyse préliminaire du système montre que :

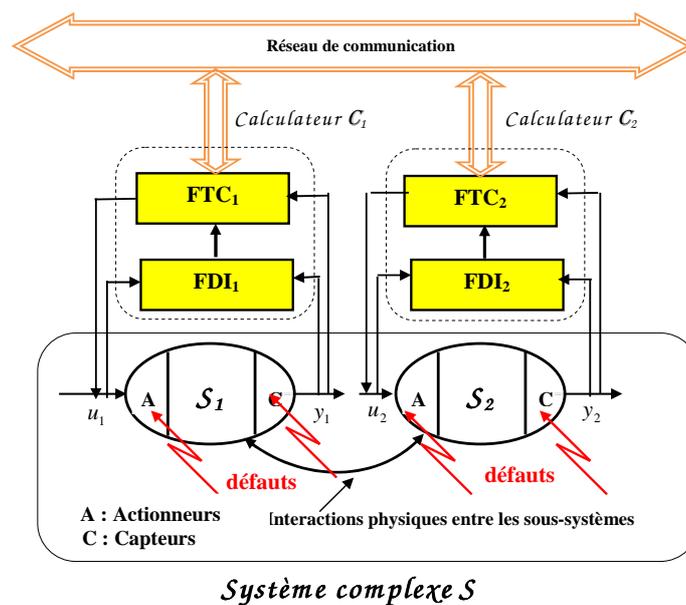


FIG. 4.13 – Deux sous-systèmes interconnectés.

- le système global est caractérisé par les dimensions suivantes : $n_x = 6, n_u = 6$ et $n_y = 6$; il en résulte un système décomposé en deux sous-systèmes multivariables de dimension $n_{x_i} = 3, n_{u_i} = 3$ et $n_{y_i} = 3$ pour $i = 1, 2$
- les deux sous-systèmes sont stables (les valeurs propres de la matrice A_{ii} sont à l'intérieur du cercle unité) ;
- la paire (A_{ii}, B_{ii}) est commandable et la paire (A_{ii}, C_{ii}) est observable. Cette propriété permet, a priori, de concevoir l'observateur RAFFE pour l'estimation de défaut.

Les horizons de prédiction $p_1 = p_2 = 10$, $m_1 = m_2 = 4$ ont été choisis identiques pour les deux sous-contrôleurs.

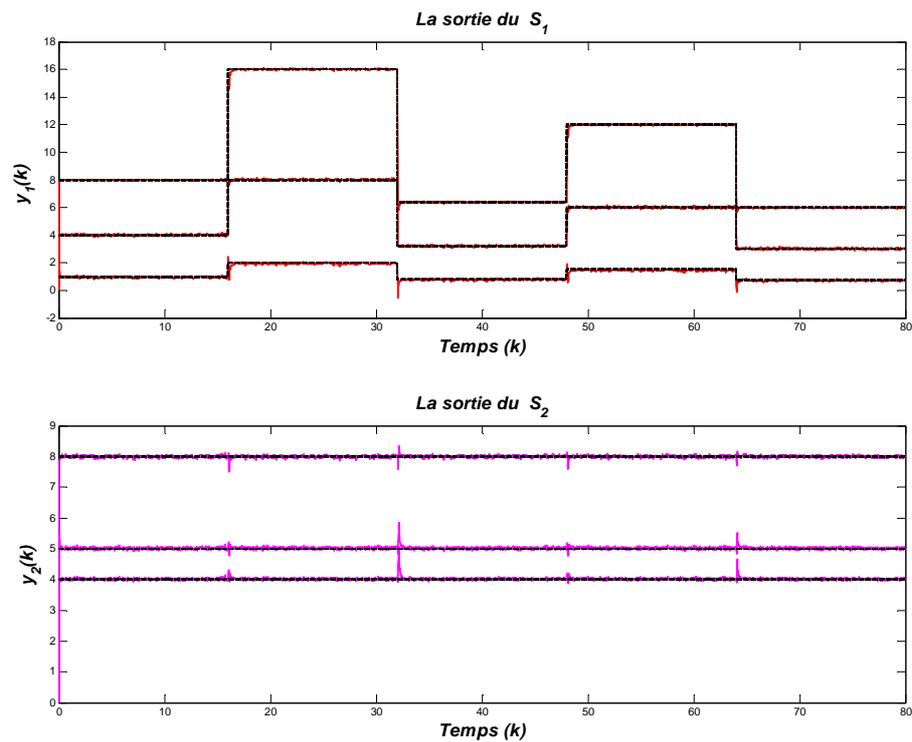
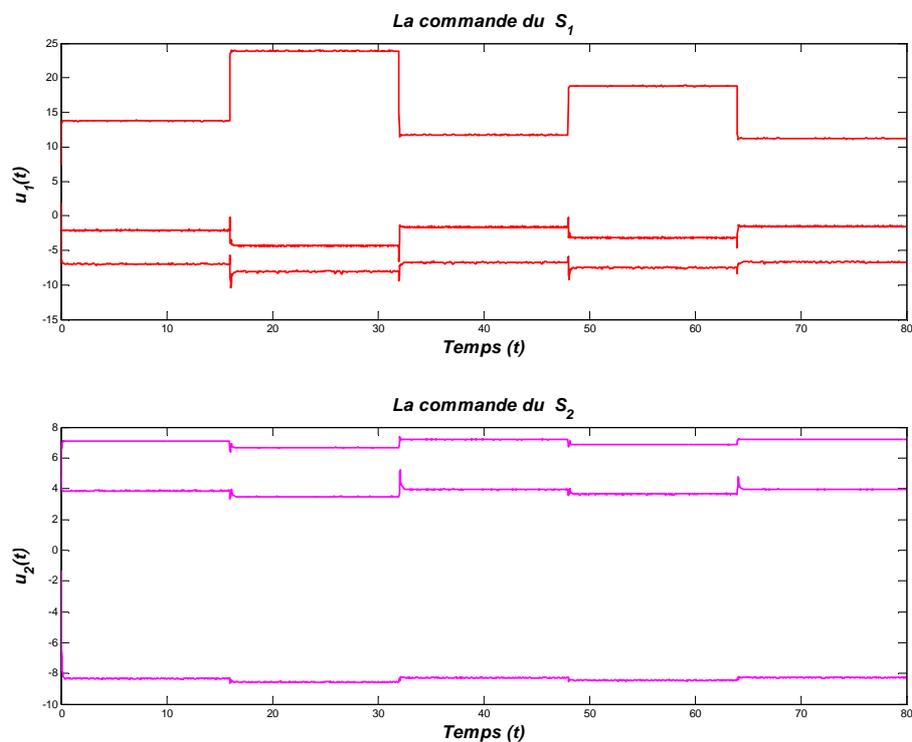
Cas nominal

L'objectif de commande est de maintenir les sorties de deux sous-systèmes à des valeurs de consignes spécifiées. Aucune perturbation n'est introduite pour cette application. Afin d'évaluer les performances de la commande MPC distribuée, le comportement de la régulation par rapport aux variations de la consigne du premier sous-système S_1 est étudié. Les valeurs de y_2^d restent inchangées.

Lors des simulations temporelles, des consignes en échelon d'amplitudes $y_1^d = [1, 4, 8]^T$ et $y_2^d = [4, 5, 8]^T$ ont été appliquées. Lorsque les deux régimes permanents sont atteints, une série de variation de consigne y_1^d est appliquée, comme suit :

$$\begin{aligned} y_1^d &= [2, 8, 16]^T & 17 < k \leq 32; \\ y_1^d &= [0.8, 3.2, 6.4]^T & 32 < k \leq 48; \\ y_1^d &= [1.5, 6, 12]^T & 48 < k \leq 64; \\ y_1^d &= [0.75, 3, 6]^T & 64 < k \leq 80. \end{aligned}$$

Une première phase d'analyse des résultats obtenus consiste à s'intéresser à la simulation temporelle du système asservi par le contrôleur MPC coopératif \mathcal{C}_i , $i = 1, 2$. La figure 4.14 illustre ainsi les réponses indicielles aux consignes prédéfinies. Les résultats obtenus montrent que les sorties suivent parfaitement les consignes. Ces dernières sont atteintes très rapidement, sans dépassement et avec un temps de réponse très court. Suite au couplage multivariable, le changement de consigne sur la première sortie du sous-système S_1 (en haut) se répercute sur la deuxième sortie du sous-système S_2 (en bas). Les commandes appliquées sur les deux sous-systèmes sont présentées sur la figure 4.15. L'influence du couplage multivariable se fait aussi ressentir sur la deuxième commande au moment du changement de la consigne appliquée à la première entrée.

FIG. 4.14 – Les sorties des systèmes S_1 et S_2 - cas nominal.FIG. 4.15 – Les commandes appliquées aux S_1 et S_2 - cas nominal.

Cas Défaillant

Dans cette partie, nous mettons en exergue la structure distribuée retenue dans notre travail pour illustrer l'approche AFTC, et montrer la place principale qu'occupe l'obser-

vateur RAFFE présenté au paragraphe 4.4 et 4.3.1. L'ensemble des observateurs RAFFE a pour tâche de détecter et estimer les défauts locaux affectant les sous-systèmes. Ces informations sur ces défauts sont ensuite utilisées par la loi de commande MPC distribuée. Notons que dans cette structure, la stratégie de distribution des tâches de diagnostic/commande est différente à celle de la structure hiérarchisée. Dans la structure hiérarchisée, la distribution de tâche de commande/diagnostic se fait entre le niveau inférieur (local) et le niveau supérieur (coordinateur). Par rapport à notre stratégie, il s'agit de faire du diagnostic localement sur chaque sous-système, fournir cette information de diagnostic à chaque sous-contrôleur qui lui est associé et faire la mise à jour du modèle dans la formulation MPC. Grâce à la stratégie coopérative inhérente à cette structure distribuée, les sous-contrôleurs essaient de maintenir l'objectif global. La coopération entre les sous-contrôleurs se réalise par un échange d'information entre eux. Les états prédits et la séquence de commandes optimales transitent sur le réseau de communication, comme illustré à la figure 3.10.

1) Défauts actionneurs

Pour la tolérance aux défauts, l'approche active AFTC est considérée. Cette dernière nécessite l'intégration du bloc diagnostic dans la boucle de commande. Dans cette partie, la perte de puissance d'un actionneur est considérée. Pour illustrer l'application AFTC, nous supposons une perte de puissance de 50% sur le troisième actionneur du sous-système S_1 (c.à.d. 50% de la valeur nominale), ainsi qu'une perte de puissance de 25% sur le premier actionneur du sous-système S_2 . Les temps d'apparition des défauts pour les deux actionneurs sont considérés respectivement $k_1 = 50$ et $k_2 = 15$. D'après l'analyse préliminaire présentée au paragraphe 4.6, portant sur l'étude de la commandabilité et l'observabilité des paires (A_{ii}, B_{ii}) et (A_{ii}, C_{ii}) respectivement, nous vérifions que les sous-systèmes S_1 et S_2 sont observables. Cette propriété étant vérifiée, il convient ensuite de s'assurer les conditions d'existence de l'observateur RAFFE données en annexe A. Les équations des observateurs RAFFE1 et RAFFE2 conçus respectivement pour les sous-systèmes S_1 et S_2 , permettent de générer l'information relative au facteur de perte de puissance d'un actionneur où $|\gamma_i^s(k)| \in [0 \ 1]$. Les contrôleurs \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 ainsi synthétisés sont alors implantés conformément au schéma de la figure 4.13.

Sur la figure 4.16, l'évolution de valeur des facteurs $\gamma_i(k)$ estimés par les observateurs RAFFE est présentée, elle montre que la valeur des facteurs est égale à zéro quand le système est en mode nominal. Par contre, lorsque les sous-systèmes passent en mode défaillant et que les actionneurs perdent de la puissance, les observateurs adaptatifs estiment avec précision la valeur des deux facteurs. Ces estimations suivent avec précision les valeurs réelles.

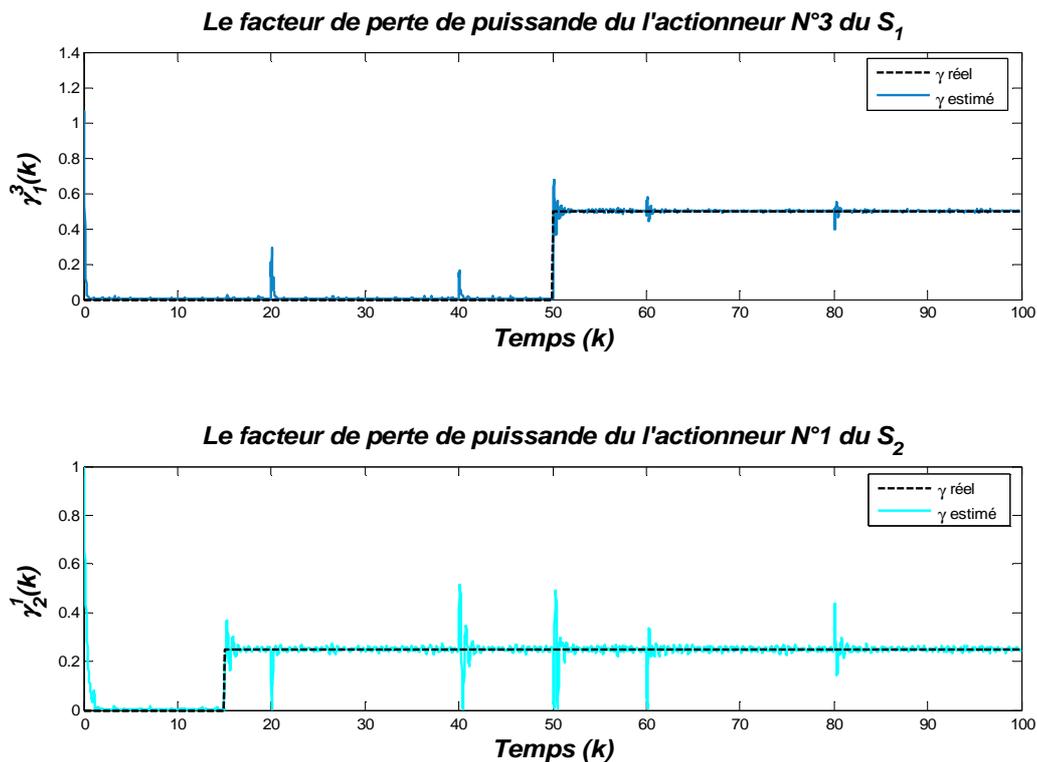


FIG. 4.16 – Facteurs de perte de puissance - cas défauts actionneurs.

La figure 4.6 donne le vecteur des résidus, on peut observer que ces derniers ont des valeurs nulles, on peut déduire que la dynamique des résidus décèle l'apparition des défauts actionneurs aux instants $k = 15$ pour S_2 et $k = 50$ pour S_1 , ils se manifestent par un pic très court qui traduit l'instant exact de l'apparition des défauts. Pour les autres pics on voit qu'à cause du couplage, le changement de consigne sur la première sortie du S_1 se répercute sur les deux résidus. En se basant sur les figures précédentes, nous remarquons que : 1) l'observateur est robuste aux interactions et en conséquence aux défauts des autres sous-systèmes

2) l'observateur fournit une estimation exacte sur le facteur de perte de puissance. La figure 4.18 confirme bien ce que nous avons présenté. La sortie réelle des actionneurs sujet aux défauts actionneurs correspond à la sortie estimée des actionneurs.

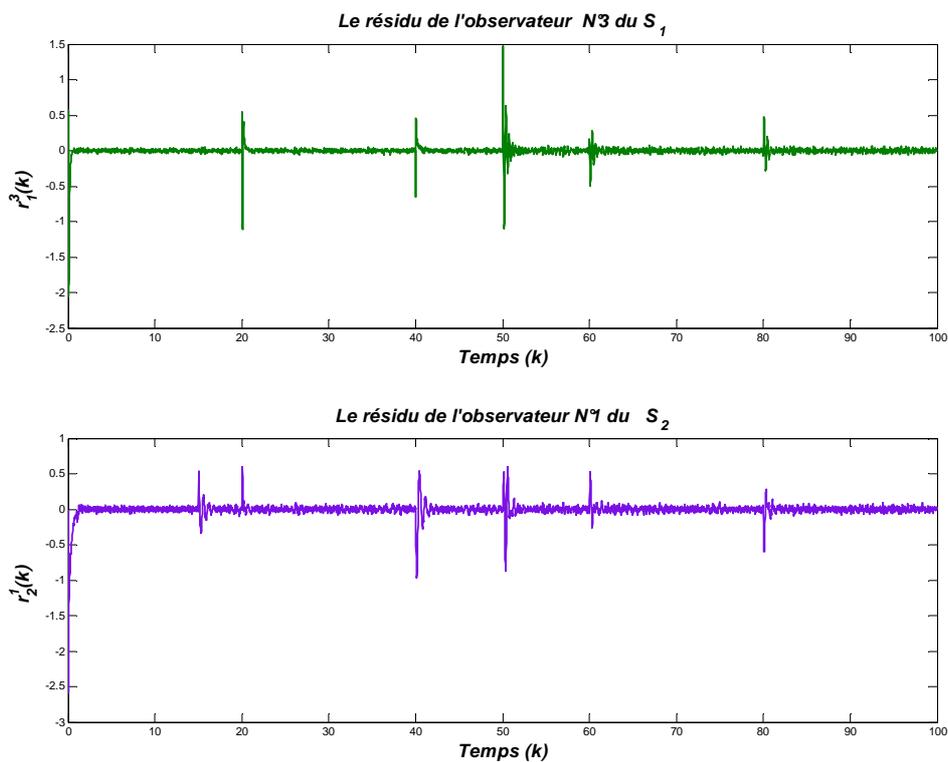


FIG. 4.17 – Les résidus pour défauts actionneurs - cas défauts actionneurs.

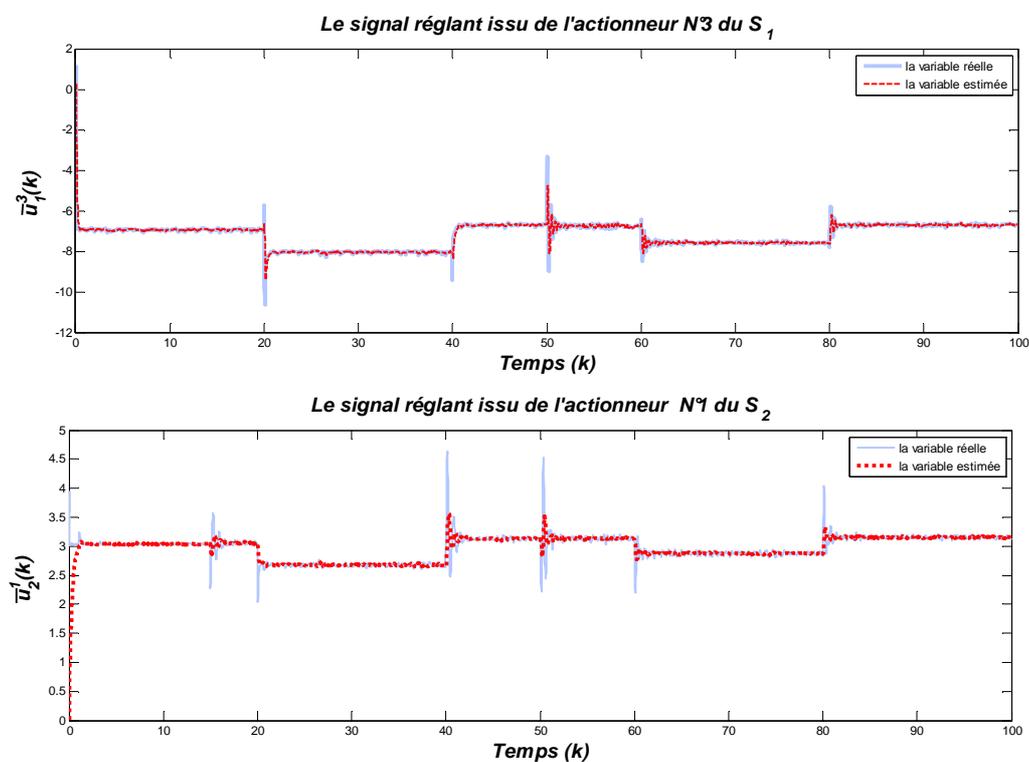


FIG. 4.18 – Les signaux réglants - cas défauts actionneurs.

L'estimation de l'amplitude des défauts illustre la performance de l'observateur adaptatif. Cette estimation est nécessaire pour la mise à jour permanente du sous-modèle tout au long du fonctionnement du système, reflétant ainsi la situation réelle du sous-système et évitant tout écart entre le modèle et le procédé (mismatch model-process), afin de l'utiliser dans la formulation MPC. Dans notre étude, notre préoccupation a été d'estimer en ligne le facteur de perte de puissance élément clé pour représenter le modèle du système et la mise à jour de la matrice de commande B .

Afin de noter et observer les effets de l'accommodation, la figure 4.19 présente les sorties des deux sous-systèmes, la première sortie du sous-système S_1 (en haut) et la deuxième sortie du sous-système S_2 (en bas). Ces figures mettent en évidence la performance du système tolérant aux défauts actionneurs. Cette performance résulte de la stratégie de commande coopérative à base de MPC qui préserve l'objectif de commande nominale. On remarque que l'allure de la sortie suit parfaitement la consigne qu'elle atteint très rapidement, sans dépassement avec un temps de réponse très court. A cause du couplage, le changement de consigne ainsi que l'apparition d'un défaut affectant la première sortie du sous-système S_1 (en haut) se répercute sur la deuxième sortie du sous-système S_2 (en bas). Pour finir notre analyse, les commandes appliquées aux sous-systèmes sont données

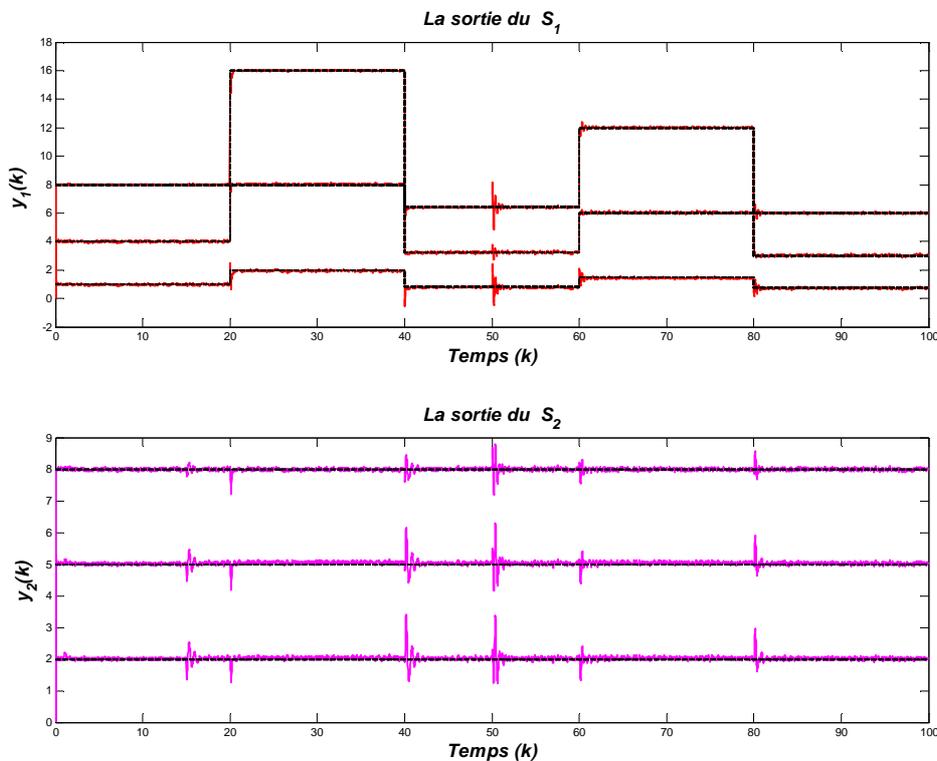


FIG. 4.19 – Les sorties de S_1 et S_2 - cas défauts actionneurs.

par la figure 4.20. L'influence du couplage se fait aussi ressentir sur la deuxième commande au moment du changement de la consigne appliquée ainsi que lors de l'apparition

du défaut. Même remarque pour l'influence du couplage lors de l'apparition du défaut sur le sous-système S_2 et son impact sur la commande du sous-système S_1 .

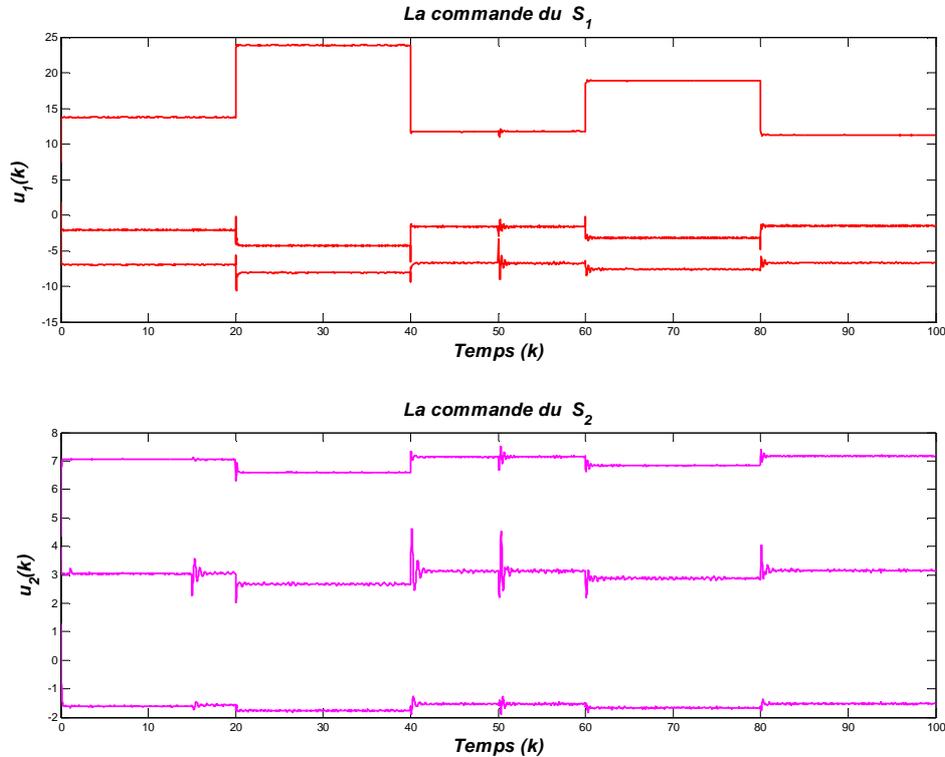


FIG. 4.20 – Les commandes appliquées aux S_1 et S_2 - cas défauts actionneurs.

2) Défauts capteurs

Nous montrons dans cette partie, la capacité de la stratégie de la commande coopérative à maintenir l'objectif de commande face aux défauts capteurs. Nous évaluons également le rôle important de l'observateur proposé au travers de l'équation (4.25) après avoir utilisé l'équation augmentée (4.51) pour un défaut capteur. Après avoir vérifié les conditions nécessaires pour la conception de l'observateur, nous utilisons l'algorithme de l'annexe A pour déterminer les matrices (K , W et F). Compte tenu des conditions de simulation, nous considérons plusieurs scénarios de défauts. Dans le premier scénario, nous présentons un défaut de type biais appliqué au capteur 1 du sous-système S_1 , de même sur le capteur 2 du sous-système S_2 . Dans le deuxième scénario, un défaut de type intermittent affecte le capteur 1 du sous-système S_1 et un défaut de type dérive qui affecte le capteur 2 du sous-système S_2 .

Les contrôleurs \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 synthétisés sont implantés conformément au schéma de la figure 4.11. Les résultats de simulation concernant les sorties sont illustrés sur la figure 4.21. On constate que lorsque la stratégie FTC opère, les sorties du système reviennent

sur leurs trajectoires imposées par le signal de consigne $y_1^d=[1, 6, 10]^T$ et $y_2^d=[4, 5, 8]^T$. En outre, on peut voir aussi sur la figure 4.22 que le signal de commande reste inchangé parce qu'il y a une mise à jour instantanée du sous-modèle.

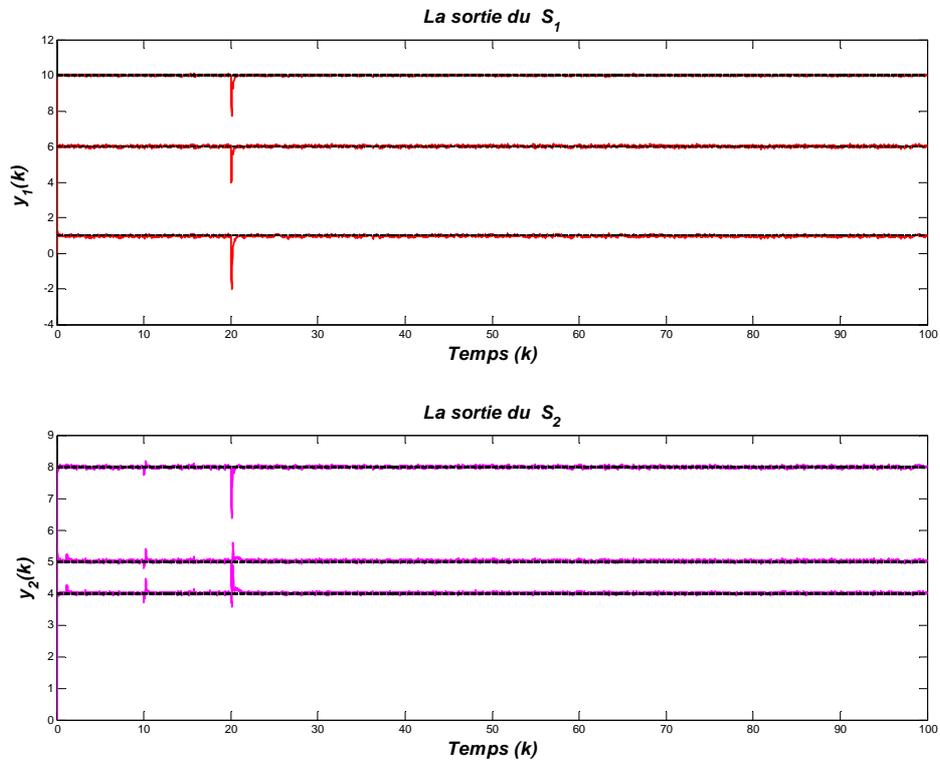


FIG. 4.21 – Les sorties des sous-systèmes S_1 et S_2 - premier scénario.

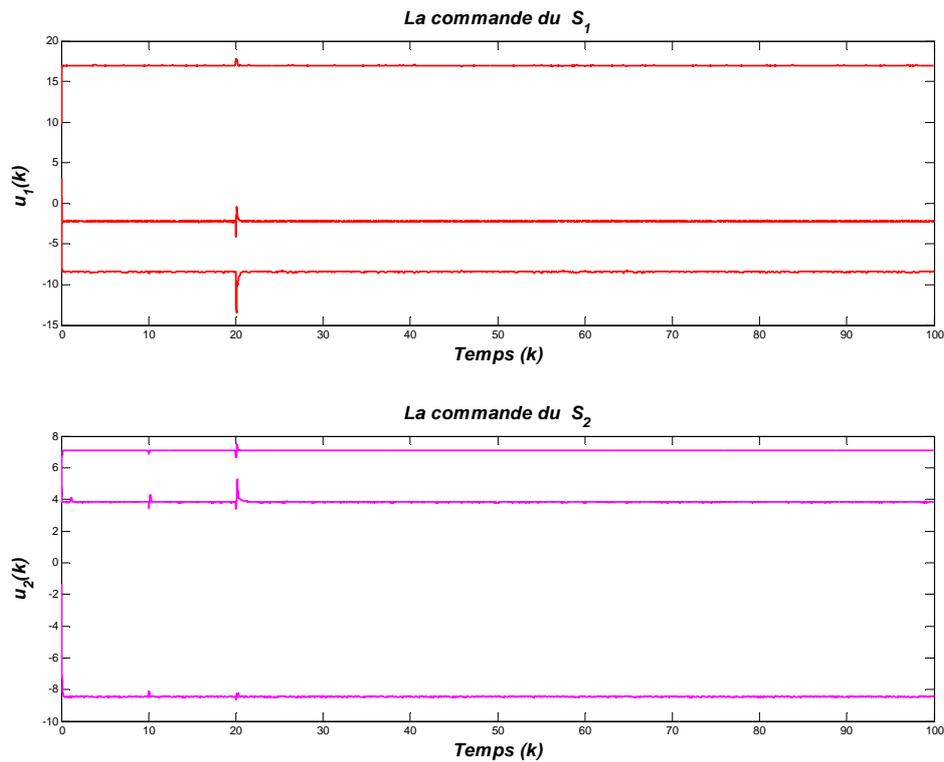


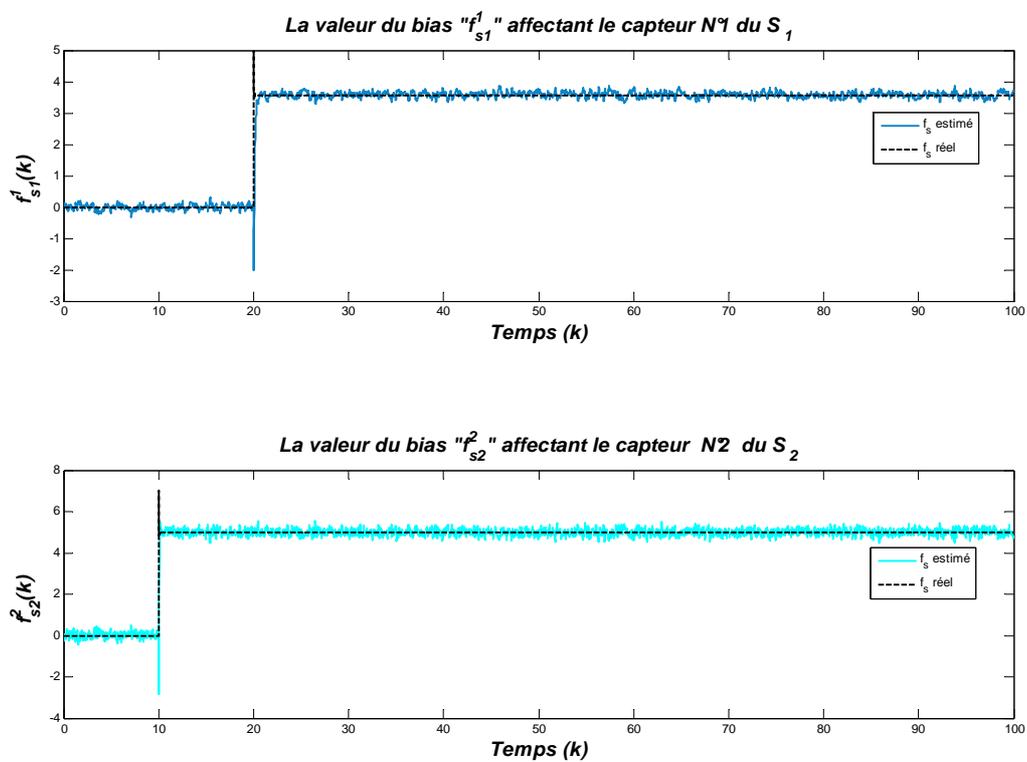
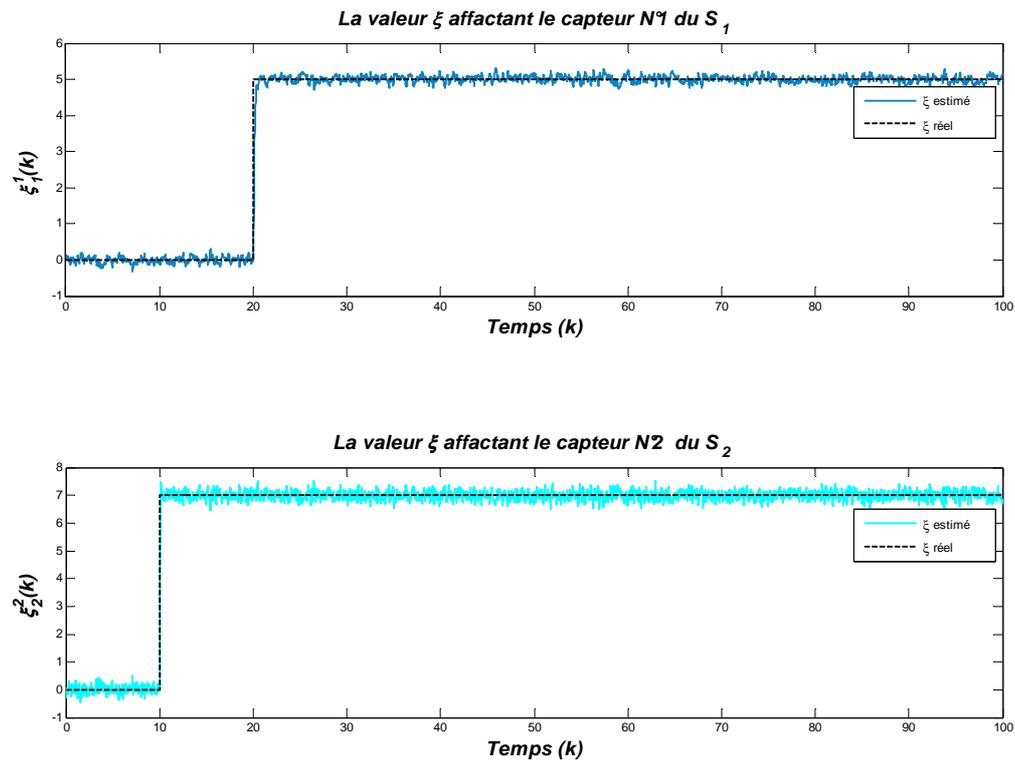
FIG. 4.22 – Les commandes appliquées sur S_1 et S_2 - premier scénario.

Afin d'analyser la pertinence des résultats obtenus, les facteurs $\xi_1^1(k)$ et $\xi_2^2(k)$ sont estimés en permanence aussi bien dans le cas nominal que dans le cas défaillant, ces estimations sont importantes pour fournir les valeurs $f_{s1}^1(k)$ et $f_{s2}^2(k)$. Les figures 4.23 et 4.24, présentent les résultats obtenus.

Une première analyse met en évidence le fait qu'avec cet observateur, les valeurs avant et après l'occurrence d'un défaut capteur sont estimées avec précision. De plus, le signal résidu, figure 4.25, montre clairement que cet observateur est robuste vis-à-vis des entrées inconnues représentées par les variables d'interconnexions.

La figure 4.26 illustre le comportement de la variable de sortie mesurée y_{mi} , $i = 1, 2$ pour les défauts biais des capteurs des sous-systèmes S_1 et S_2 .

Le second scénario défaillant considéré correspond à un défaut capteur de type intermittent appliqué sur le capteur 1 du système S_1 d'amplitude 5 dans l'intervalle $8 \leq k < 17$ et zéro ailleurs et un défaut "dérive" appliqué sur le capteur 2 du système S_2 à l'instant $k = 20$. La figure 4.27 illustre le comportement dynamique de la sortie y_{mi} pour les deux défauts capteurs.



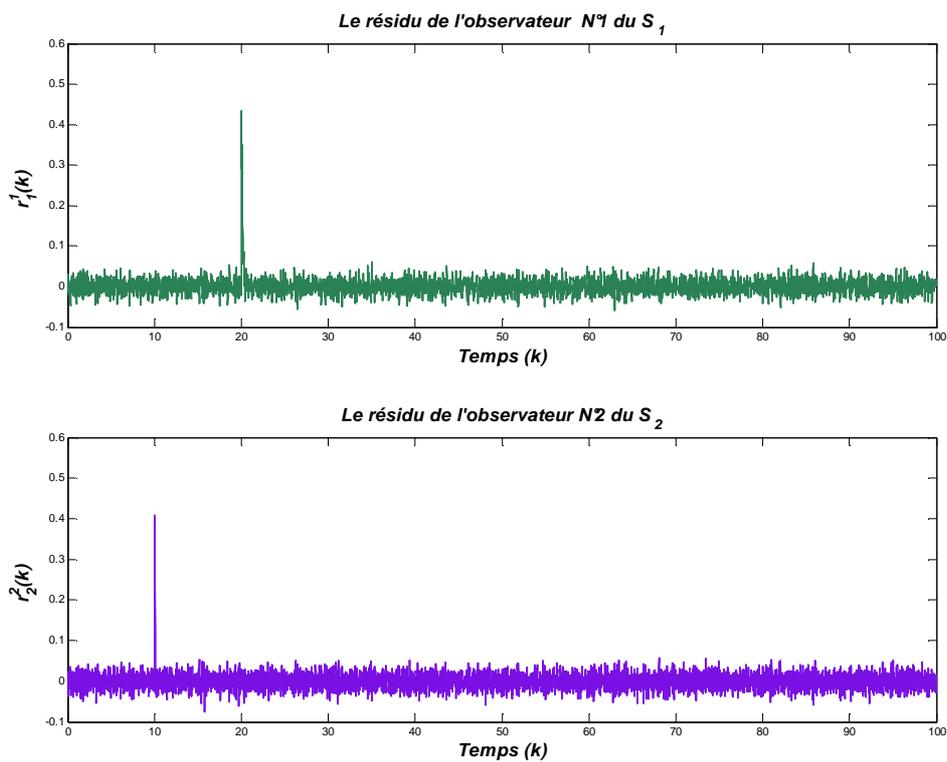


FIG. 4.25 – Les résidus - premier scénario.

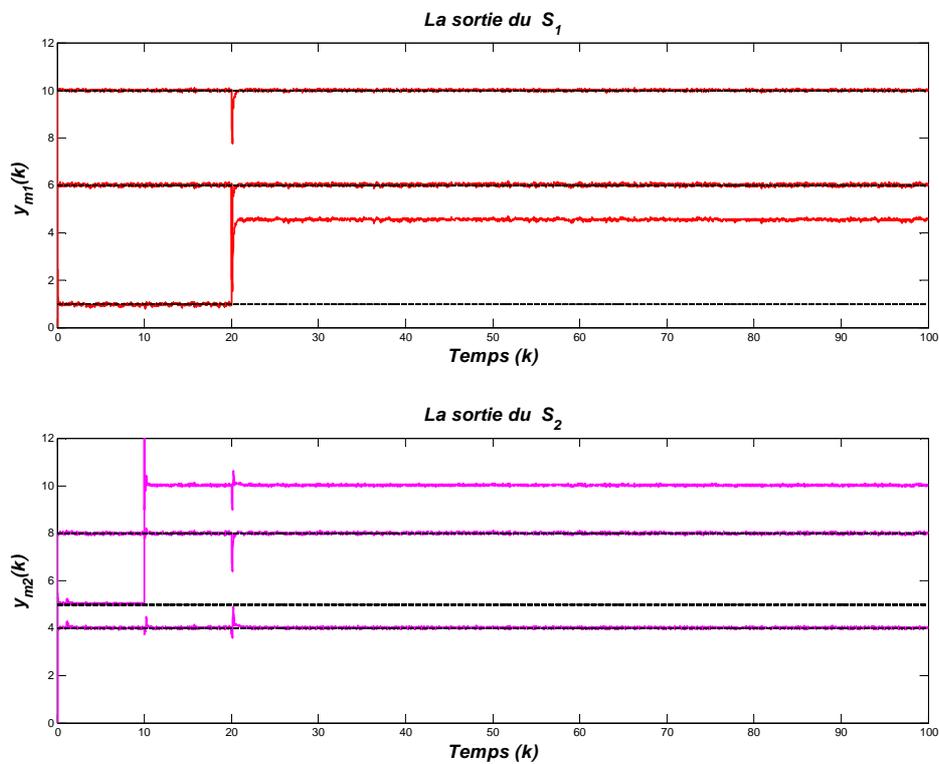


FIG. 4.26 – La réponse de la variable de sortie mesurée - premier scénario.

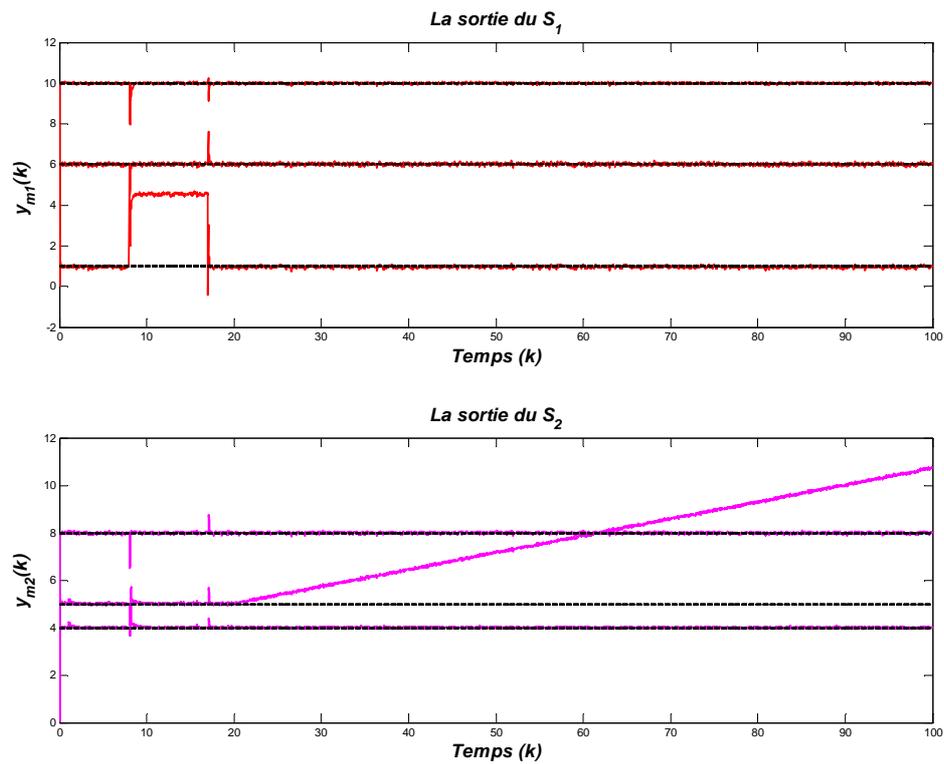


FIG. 4.27 – La réponse de la variable de sortie mesurée - deuxième scénario.

Sur la figure 4.28, on présente le comportement du signal de sortie du sous-système S_1 et S_2 lorsque la stratégie FTC opère pour maintenir les valeurs de consigne $y_1^d = [1, 6, 10]^T$ et $y_2^d = [4, 5, 8]^T$ désirées. Pour évaluer la pertinence de notre stratégie et la tâche cruciale de notre observateur, les figures 4.29, 4.30 et 4.31 représentent les résidus et les valeurs de ξ_i et f_{si} .

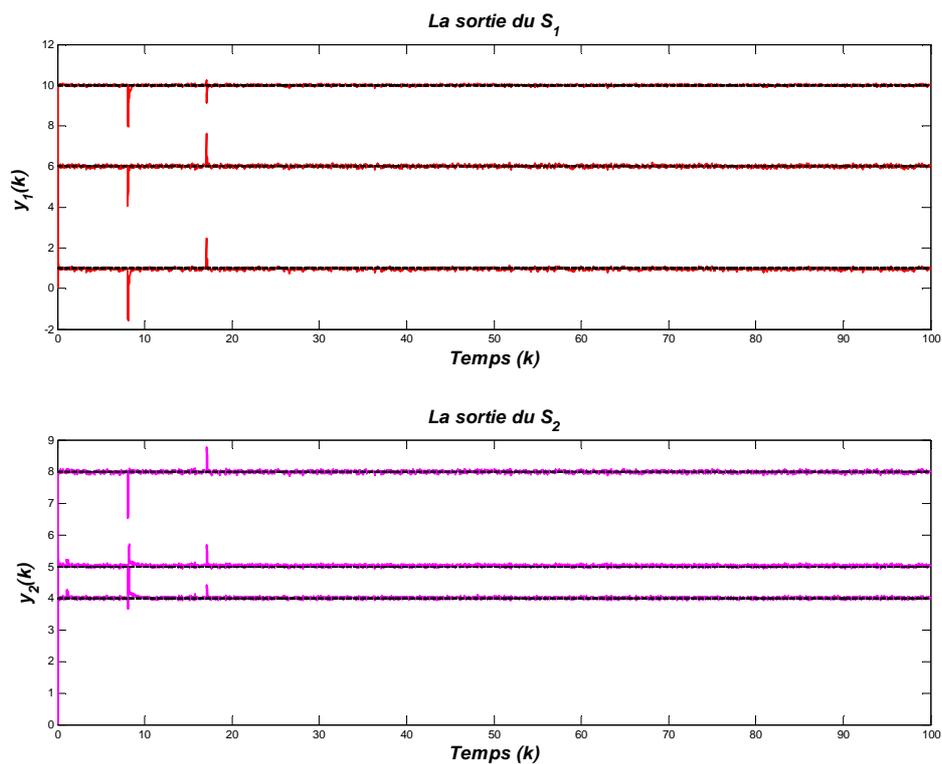
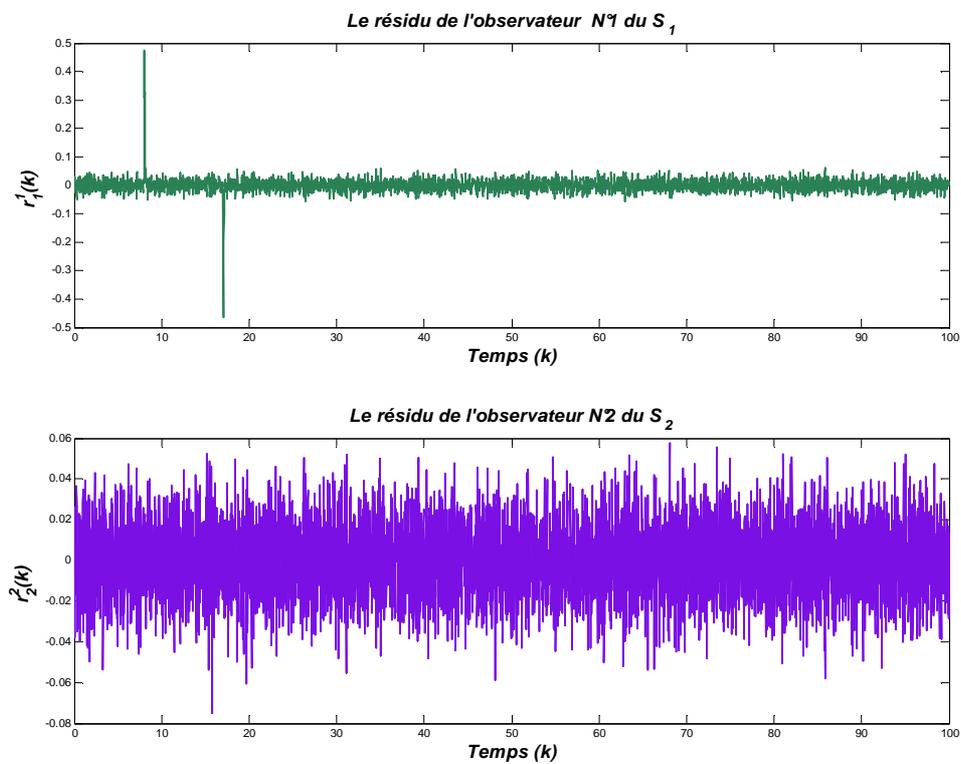
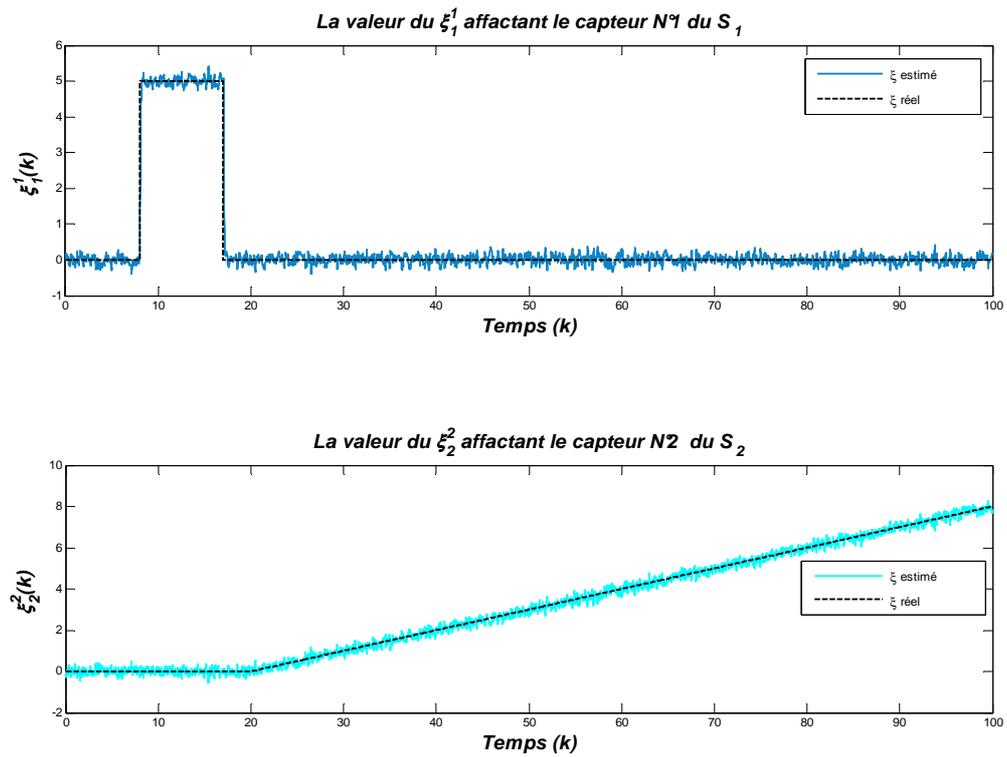
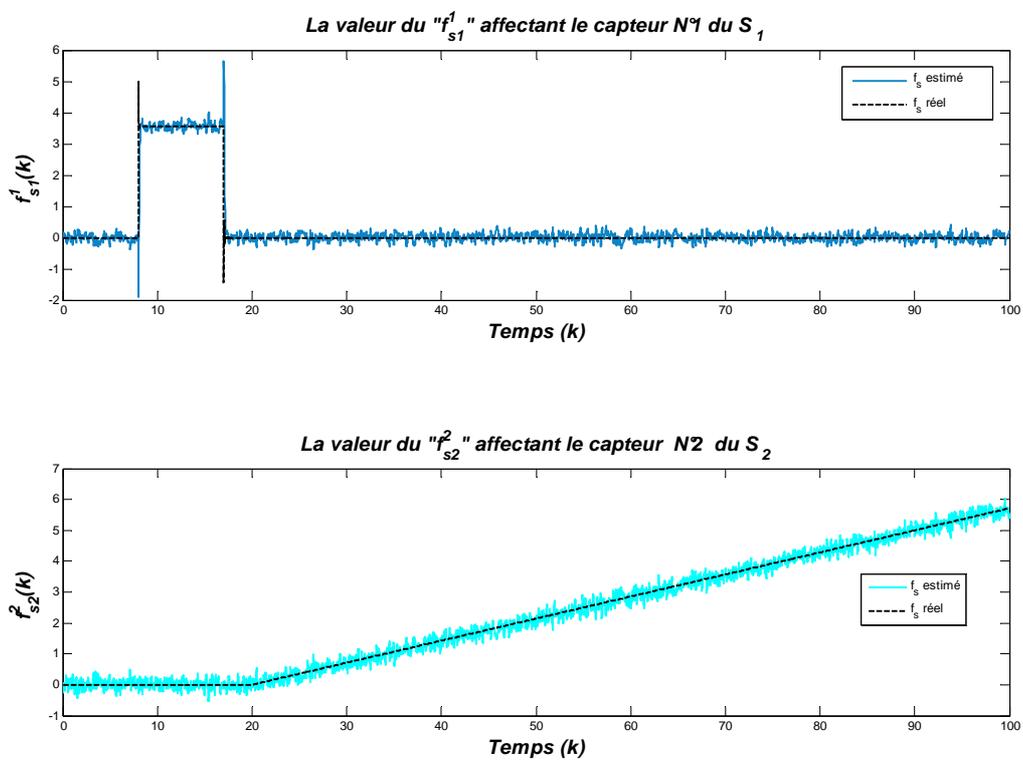


FIG. 4.28 – La réponse du signal de sortie - deuxième scénario.

FIG. 4.29 – Le signal résidu r_i - deuxième scénario.

FIG. 4.30 – Le signal ξ - deuxième scénario.FIG. 4.31 – Le signal f_{si} - deuxième scénario.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif principal était de réaliser à partir de la structure de commande MPC distribuée, une stratégie active de la commande FTC coopérative pour tolérer l'effet des défauts actionneurs et capteurs.

L'un des aspects saillant pour la réalisation de ce système FTC est le bloc de diagnostic (FDI). Comme la technique MPC est basée sur le modèle du procédé, nous avons dans un premier temps défini la méthode de diagnostic nécessaire pour estimer les défauts, et ceci pour définir le nouveau modèle correspondant aux différentes situations défailtantes. Nous nous sommes attachés à proposer un système de diagnostic local adaptatif, associé à chaque sous-système. Nous avons ensuite mis en œuvre un observateur capable d'estimer les défauts locaux tout en les en discriminant de l'effet des interactions entre les différents sous-systèmes. Les informations sur les défauts délivrées par le système de diagnostic peuvent désormais être exploitées par la loi de commande tolérante aux défauts. Celle-ci est basée sur une actualisation instantanée du modèle, indispensable pour sa formulation.

Finalement, nous avons présenté une analyse de stabilité du système global en cas de défaillance du réseau.

Chapitre 5

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, une structure de commande distribuée tolérante aux défauts est proposée. Cette structure repose sur un ensemble de modules FDI/FTC assurant leur fonction de façon locale et indépendante. La coopération entre les différentes modules est réalisée au moyen d'un réseau de communication. Cette architecture de commande coopérative et tolérante aux défauts permet au système défectueux de garantir des performances satisfaisantes. Le choix de la structure est en partie justifié par le fait qu'elle permet de prendre en compte les interactions entre les sous-systèmes qui composent le système global.

Dans le deuxième chapitre du document, nous nous sommes attachés dans un premier temps à présenter le principe du diagnostic et de la tolérance aux défauts à base de modèle. L'accent est mis sur la présentation des approches nécessitant des informations sur le défaut qui affecte le système comme :

- l'instant d'apparition ;
- l'amplitude ;
- perte de puissance (actionneur), dérive ou biais (capteur).

Dans un deuxième temps, nous donnons un aperçu des principales architectures des systèmes suivant lesquelles les modules de diagnostic et de tolérance aux défauts s'articulent. Nous exposons en particulier le cas des architectures centralisée, décentralisée, hiérarchique ainsi que les schémas de représentation qui leur sont associés. Le choix d'une méthode de commande tolérante au défaut peut se faire en fonction de plusieurs critères généraux tels que la dynamique du système, de degré de redondance au niveau de l'instrumentation, le type de défaut à compenser,..., mais aussi les dimensions de l'installation à surveiller. Force est de constater que la plupart des travaux existants sur ce sujet s'intéressent à des systèmes de petite ou moyenne dimension reposant, en général, sur une structure centralisée. Dans le cas des systèmes complexes ces approches s'avèrent délicates à mettre en œuvre du fait, en particulier, du temps de calcul requis par les algo-

rithmes de diagnostic ou de commande. Par ailleurs, la complexité du modèle du système ne permet pas une synthèse aisée de la loi de commande. Ce chapitre présente un certain nombre de stratégies pouvant s'appliquer au cas des systèmes complexes. Nous orientons le choix de la structure vers une structure de type distribué car elle permet de considérer les problèmes du diagnostic et de la tolérance aux défauts de façon locale donc plus simple à étudier. Parallèlement, la communication possible entre les modules autorise la prise en compte au niveau local d'informations externes.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du système complexe et à la définition de la commande qui lui est attribuée. Il ne s'agit pas ici de développer une commande spécifique mais de montrer comment une commande classique, la commande prédictive en l'occurrence, peut répondre aux exigences de la structure coopérative tolérante aux défauts. La structure de commande tolérante aux défauts présentée dans ce rapport de thèse, s'appuie sur une décomposition de la structure nominale complexe en sous-systèmes disposant chacun de mesures qui leur sont propres et qui sont commandés localement par un algorithme de commande prédictive, indépendamment des autres sous-systèmes. Néanmoins, Il apparaît que la commande prédictive présente la particularité de pouvoir prendre en compte les paramètres de couplages au niveau de sa synthèse.

La première partie du chapitre 3 soulève certains aspects de la complexité des systèmes et un ensemble de terminologies sont rappelées. La représentation du système complexe découle logiquement de la méthode de décomposition qui lui est appliquée. La décomposition du système en sous-systèmes interconnectés se justifie essentiellement par la simplification qu'elle apporte à la compréhension du système. L'ordre de chaque sous-système est moins élevé, ce qui entraîne une simplification de la synthèse et de l'implantation des lois de commande. Néanmoins, la décomposition du système peut affecter le niveau de performances globales. Ainsi, le fait de ne pas prendre en compte les interactions entre les sous-systèmes peut conduire à une instabilité des éléments environnants mais cela peut également affecter sensiblement la qualité du diagnostic. Pour éviter ce type de problème, nous proposons une architecture distribuée qui permet de prendre en compte les interactions physiques qui lient les sous systèmes. La deuxième partie du chapitre traite du problème de la commande prédictive. Après en avoir rappelé le principe général, nous abordons le problème de la distribution de la commande. En s'appuyant sur une structure de type distribuée, il apparaît que l'échange d'informations entre les contrôleurs locaux permet de converger vers un consensus à la différence d'une commande centralisée qui tend vers une solution globale optimale. Dans ce cas, la commande prédictive locale est obtenue par minimisation d'un critère local. Cette caractéristique, particulièrement intéressante dans le contexte de notre étude, est exploitée à des fins de tolérance aux défauts en utilisant le réseau de communication entre les modules.

Le chapitre 4 est consacré à l'intégration des fonctions de diagnostic et de tolérance

aux défauts au sein d'une structure dont les éléments ont été introduits aux chapitres 2 et 3. La stratégie de commande tolérante aux défauts, dans le cas des systèmes distribués communicants, met en œuvre une étape de diagnostic local réalisée pour chaque sous-système. L'algorithme de diagnostic local est établi à partir d'un ensemble d'observateurs capable d'estimer en ligne l'amplitude des défauts. Ces estimations sont utilisées pour la mise à jour des modèles des sous-systèmes. Les commandes locales développées à partir d'algorithmes de commandes prédictives présentées au chapitre 3 interagissent entre elles au moyen du réseau de communication. Finalement, divers scénarios de défauts sont traités sur un exemple afin de mettre en évidence l'efficacité de l'approche.

Perspectives

Les réflexions menées sur la commande tolérante aux défauts des systèmes complexes ont conforté notre intérêt pour la structure distribuée. Les résultats obtenus à travers l'exemple numérique considéré dans ce mémoire offrent des perspectives intéressantes de développements. Néanmoins, les points suivants peuvent faire l'objet de travaux futurs :

- la synthèse de commande proposée dans ce mémoire a été bâtie pour les systèmes ayant une modélisation linéaire. Or, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée et les systèmes dynamiques ont souvent un comportement non linéaire. Il est montré que certains problèmes de diagnostic non linéaire peuvent être résolus. Dans le même esprit, un axe intéressant pourrait être l'extension de la commande tolérante aux défauts pour les systèmes non linéaires, de façon à prendre en compte une classe plus large de systèmes, tout en conservant les avantages offerts par la structure distribuée proposée dans ce mémoire.
- étudier la tolérance aux défauts des sous-systèmes en cas de défaillance partielle du réseau où un sous-système sera déconnecté du reste des sous-systèmes. Aussi, nous envisageons de traiter des défauts plus sévères tels que la perte totale de l'actionneur ou du capteur, etc.
- traiter le problème de l'isolation du multiple défaut capteur. Une solution de ce problème peut se trouver dans l'assignement des propriétés directionnelles au vecteur de résidu. L'utilisation de la théorie proposée dans (Beard, 1971),(Xiong et Saif, 2000) serait une piste favorable pour résoudre ce type de problème.
- d'un point de vue application, nous recommandons d'implanter cette structure de commande tolérante aux défauts sur la plate forme du pont roulant installée au laboratoire du CRAN, afin de valider les résultats obtenus en simulation.

Annexe A

La transformation SCB pour la génération des résidus robustes

Similaire à la décomposition classique de Kalman, le changement de base spéciale de coordonnées (SCB) met en évidence les propriétés structurelles du système i.e, les structures des zéros finis et zéros à l'infinis, l'inversibilité à droite et à gauche du système (Liu *et al.*, 2005). Le résultat principale de la Théorie SCB est donné par le Théorème suivant :

Theorème A.1 :((Saber *et al.*, 2007),chapitre 3)

Soit un système linéaire décrit par les équations suivantes :

$$\Sigma \equiv \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Gd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Alors il existe

- des nombres entiers non négatifs $n_a^-, n_a^+, n_b, n_c, n_d, m_d \leq p$ et $q_i, i = 1, 2, \dots, m_d$, $n_d = \sum_{i=1}^{m_d} q_i$ et
- Γ_1, Γ_2 et Γ_3 des transformations d'états, de sorties et d'entrées non singulières, telles que ces transformations permettent de rendre le système donné Σ exprimé dans la base SCB afin de montrer explicitement les structures de zéros finis et infinis, l'inversibilité à droite et à gauche du système Σ . La base SCB peut être décrite par la forme compacte suivante

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \Gamma_1^{-1}x, \quad \bar{y} = \Gamma_2^{-1}y, \quad \bar{d} = \Gamma_3^{-1}d \\ \bar{x} &= [(x_a^-)^T, (x_a^+)^T, x_b^T, x_c^T, x_d^T]^T, \quad \bar{y} = [(y_d)^T, (y_b)^T]^T, \quad \bar{d} = [(d_a)^T, (d_b)^T]^T \\ \bar{\Sigma} &\equiv \begin{cases} \bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{G}\bar{d}(k) \\ \bar{y}(k) = \bar{C}\bar{x}(k) \end{cases} \quad (\text{A.2}) \end{aligned}$$

où $\bar{A}, \bar{G}, \bar{C}$ sont donnée par :

$$\bar{A} := \Gamma_1^{-1} A \Gamma_1$$

$$\left[\begin{array}{cc|cc|c} A_{aa}^- & 0 & L_{ab}^- C_b & 0 & L_{ad}^- C_d \\ 0 & A_{aa}^+ & L_{ab}^+ C_b & 0 & L_{ad}^+ C_d \\ \hline 0 & 0 & A_{bb} & 0 & L_{bd} C_d \\ \hline G_c E_{ca}^- & G_c E_{ca}^+ & L_{cb} C_b & A_{cc} & L_{cd} C_d \\ \hline G_d E_a^- & G_d E_a^+ & G_d E_b & G_d E_c & A_d \end{array} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$\bar{G} := \Gamma_1^{-1} G \Gamma_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & G_c \\ G_d & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$\bar{C} := \Gamma_2^{-1} C \Gamma_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & C_d \\ 0 & 0 & C_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Propriété 1 :

Le système Σ est inversible à droite (à gauche) si et seulement si x_b et par conséquent y_b n'existent pas, c.-à-d., n_b est égal à zéro ; il est inversible à gauche si et seulement si x_c et par conséquent d_c n'existent pas, c.-à-d., n_c est égal à zéro.

Propriété 2 :

$n_a = n_a^- + n_a^+$, où n_a^- , n_a^+ sont les nombres de zéros de transmission stables et instables du système Σ respectivement.

Propriété 3 :

n_d est le nombre de zéros à l'infini et $n_d = \sum_{i=1}^{m_d} q_i$, où q_i est le nombre de zéros infinis d'ordre i et m_d est le plus grand ordre de zéro à l'infini, il représente aussi le nombre de lignes de la matrice C_d .

Propriété 4 :

$$n = n_a + n_b + n_c + n_d$$

Propriété 5 :

(A_{bb}, C_b) et (A_{dd}, C_d) sont des paires observables (détectables).

A.1 Synthèse de l'observateur RAFFE

Cette partie présente une méthode de synthèse de l'observateur RAFFE que nous avons développée dans (Menighed *et al.*, 2010b,c,a) pour le système décrit par l'équation suivante

$$\Sigma \equiv \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ef_a(k) + Gd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

L'observateur reconstruit les entrées inconnues $f_a(k)$. L'algorithme pour la synthèse de cet observateur est donné dans la suite de ce paragraphe A.2. D'abord, pour la conception de cet observateur, il faut vérifier les conditions d'existences.

A.1.1 Conditions d'existence de RAFFE

L'observateur RAFFE existe si et seulement si (Menighed *et al.*, 2010b,c,a) :

- i) $n_b \neq 0$;
- ii) Tous les zéros de transmissions de (A, E, C) sont à l'intérieur du cercle unitaire.

A.2 Algorithme pour la conception de l'observateur

Les conditions (i) et (ii) étant satisfaites, les matrices A, G, C définies dans l'équation A.6 sont exprimées dans la base SCB.

Calcul de K et W

1. Trouver les transformations Γ_1, Γ_2 et Γ_3 pour réécrire les matrices A, G, C définies dans l'équation A.6 sous forme SCB. $\bar{A} := \Gamma_1^{-1}A\Gamma_1$, $\bar{G} := \Gamma_1^{-1}G\Gamma_3$ and $\bar{C} := \Gamma_2^{-1}C\Gamma_1$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_{aa} & L_{ab}C_b & 0 & L_{ad}C_d \\ 0 & A_{bb} & 0 & L_{bd}C_d \\ G_cE_{ca} & L_{cb}C_b & A_{cc} & L_{cd}C_d \\ G_dE_a & G_dE_b & G_dE_c & A_d \end{bmatrix},$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & G_c \\ G_d & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C_d \\ 0 & C_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

où le nombre de lignes de C_d est m_d , et le nombre de lignes de C_b est la dimension maximale du signal résidu, tel que, $m_r = n_y - m_d$

- a) Si $n_b = 0$, stop
 - b) Sinon continue
2. Étant donnée (A_{bb}, C_b) est observable, choisir un gain K_{bb} de telle sorte que les valeurs propres $\lambda(A_{bb} - K_{bb}C_b)$ sont stable.
 3. Définir les matrices \mathcal{A} et \mathcal{C} comme suit :

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} A_{aa} & 0 & L_{ad}C_d \\ G_cE_{ca} & A_{cc} & L_{cd}C_d \\ G_dE_a & G_dE_c & A_d \end{bmatrix}, \quad \mathcal{C} = [0 \quad 0 \quad C_d] \quad (\text{A.8})$$

Si le couple (A, C) est détectable, $(\mathcal{A}, \mathcal{C})$ doit être détectable.

- i) Choisir le gain \mathcal{K} tel que les valeurs propres $\lambda(\mathcal{A} - \mathcal{K}\mathcal{C})$ sont stables.
- ii) Partitionner \mathcal{K} comme suit $\mathcal{K} = [\mathcal{K}_a^T \mathcal{K}_c^T \mathcal{K}_d^T]$ ensuite construire la matrice \bar{K} :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} \mathcal{K}_a & L_{ab} \\ L_{bd} & K_{bb} \\ \mathcal{K}_c & L_{cb} \\ \mathcal{K}_d & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

4. Sélectionner la matrice $\bar{W} = [W_d \quad W_b]$ de tel sorte $W_d C_d = 0$, et W_b est une matrice non singulière quelconque de dimension compatible avec C_b avec $W_b C_b \neq 0$. Pour la simplicité, on choisi $W_b = I_{m_r}$.
5. Finalement, calculer les matrices K et W comme suit :

$$K = \Gamma_1 \bar{K} \Gamma_2^{-1}, \quad W = \bar{W} \Gamma_2^{-1} \quad (\text{A.10})$$

Calcul de \hat{f} utilisant la loi adaptative rapide

1. D'après le Theorem1, choisir Q définie positive quelconque et calculer P , solution de l'équation de Lyapunov $(A - KC)^T P (A - KC) - P = -Q$;
Par ailleurs, calculer la matrice F à partir de $E^T P = FC$.
2. La loi adaptative pour l'estimation rapide de défaut est donnée par :

$$\hat{f}(k+1) = -\beta \bar{F}(r(k+1) + \eta r(k)) \quad (\text{A.11})$$

où $F = [\bar{F} \quad *]$ et \bar{F} a une dimension compatible avec W , $\beta \neq 0$ et $\eta \neq 0$ sont deux scalaires de réglages.

Remarque 1 : on voit par récurrence de l'estimation aux différences (A.11) que l'algorithme adaptatif proposé combine un terme proportionnel et un terme l'intégral (Zhang *et al.*, 2008a)

$$\hat{f}(k) = -\beta \bar{F} \left(r(k) + \eta \sum_{i=k_f}^k r(i) \right) \quad (\text{A.12})$$

L'introduction du terme proportionnel joue un rôle important pour améliorer la rapidité de l'estimation du défaut.

Bibliographie

- ABDULLAH, A. et IOANNOU, P. (2003). Decentralized reconfigurable control for large scale systems with application to segmented telescope. *in Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1 (9):pp. 768–773. [2.6.2.1](#), [2.6.3](#)
- AGACHI, P., NAGY, Z., CRISTEA, M. et LUCACI, A. (2006). *Model Based Control : Case Studies in Process Engineering*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. [3.7.3](#)
- ALWI, H. et EDWARDS, C. (2006). Fault tolerant control of a large civil aircraft using a sliding mode based scheme. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS' 06)*, pages pp. 853–858. [2.5](#)
- ANDRY, A. N., SHAPIRO, E. Y. et CHUNG, J. C. (1983). Eigenstructure assignment for linear systems. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, Vol. 19. [2.5.1](#)
- BAKULE, L. (2008). Decentralized control : An overview. *Annual Reviews in Control*, Vol. 32 (1):pp. 87–98. [3.3.1](#)
- BALLÉ, P., FICHER, M., FÜSSEL, D. et ISERMAN, R. (1997). Integrated control, diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger. *in Proceedings of American Control Conference*. [2.6.3](#)
- BAO, J., ZHANG, W. et LEE, P. (2003). Decentralized fault-tolerant control system design for unstable processes. *School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry*, Vol. 58 (22):pp. 5045–5054. [2.6.3](#)
- BAR-YAM, Y. (2003). *Dynamics of complex systems : Studies in nonlinearity*. Westview Press. [3.2](#)
- BATMAN, F., NOURA, H. et OULADSIME, M. (2007). An actuator fault detection, isolation and estimation system for an uav using input observers. *in Proceeding of European Control Conference*, pages pp. 1805–1810. [4.3](#)
- BAVAFA-TOOSI, Y., OHMORI, H. et LABIBIC, B. (2005). Failure tolerant performance stabilization of the generic large scale system by decentralized linear output feedback. *ISA Transactions*, Vol. 44:pp. 501–513. [2.6.3](#)
- BEARD, R. (1971). *Failure accommodation in linear systems through self-reorganization*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Aeronautics and Astronautics. [2.3](#), [2.4.1](#), [5](#)

- BEMPORAD, A. et MORARI, M. (1999). Robust model predictive control : A survey. *in Robustness in Identification and Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 245:pp. 207–226. [3.7.3](#)
- BERNUSSOU, J. et TITLI, A. (1982). *Interconnected dynamical systems : stability, decomposition and decentralisation*. North-Holland. [3.3](#), [3.2](#), [3.3.1](#), [3.5.2](#), [3.5.3](#)
- BERTELSEN, S. (2003). Construction as a complex system. *Presented at the 11th annual conference in the international group for lean construction*. [3.2](#)
- BLANKE, M., IZADI-ZAMANABADI, R., BOGH, S. et LUNAU, P. (1997). Fault tolerant control systems : A holistic view. *Control Engineering Practice*, Vol. 5 (5):pp. 693–702. [2.6.3](#)
- BLANKE, M., KINNAERT, M., LUNZE, J. et STAROSWIECKI, M. (2003). *Diagnosis and fault tolerant control*. Springer-Verlag. [2.2](#), [2.4.1](#), [2.5](#), [2.5.1](#), [2.5.1](#)
- BONIVENTO, C., CAPILUPPI, M., MARCONI, L. et PAOLI, A. (2005). An integrated design approach to multilevel fault tolerant control of distributed systems. *16th IFAC World Congress*. [2.6.3](#)
- BOUCHER, P. et DUMUR, D. (1996). *La commande prédictive*. Collection Méthodes et pratiques de l'ingénieur, Editions Technip, Paris. [3.7.4](#), [3.8](#)
- CAMILE et MACIEJOWSKI, J. (2000). Robust finite horizon mpc without terminal constraints. *in Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol.1:pp. 166–171. [3.7.3](#)
- CHEN, B. (1998). On properties of the special coordinate basis of linear system. *International Journal of Control*, Vol. 71:pp. 981–1003. [4.3.1](#)
- CHEN, J. et PATTON, R. (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer. Academic Publishers. [2.4.2](#), [4.3](#), [4.3](#), [4.1](#), [4.3](#), [4.3](#), [4.5.3](#)
- CHOW, E. (1981). *A failure detection system design methodology*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. [2.4.1](#)
- CHUNG, H., BIEN, Z., PARK, J. et SEONG, P. (1994). Incipient multiple fault diagnosis in real time with application to large scale systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 41 (4):pp. 1692–1703. [2.6.2.2](#)
- CHUNG, W. et SPEYER, J. (1998). A decentralized fault detection filter. *in Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 4:pp. 2017–2021. [2.6.2.1](#)

- CIESLAK, J. (2007). *Analyse et synthèse d'une architecture coopérative pour la commande tolérante aux défauts application à un système aéronautique*. Thèse de doctorat, Université bordeaux 1. [2.5.1](#)
- CLAVEAU, F. (2005). *Contribution à l'analyse et la commande des grands systèmes*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes et Université de Nantes. [3.3](#), [3.5](#), [3.3.1](#), [3.5.2](#)
- COHEN, G. (2004). Optimisation des grands système. Mémoire de D.E.A., CERMICS-Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et INRIA. [3.3](#)
- CORDIER, M., DAGUE, P., DUMAS, M., LEVY, F., MONTMAIN, J., STAROSWIECKI, M. et TRAVÉ-MASSUYÈS, L. (2000). Ai and automatic control approaches of model-based diagnosis : Link and underlying hypotheses. *IFAC Symposium SAFEPROCESS 2000*, pages pp. 274–279. [2.6.1](#)
- CORLESS, M. et TU, J. (1998). State ans input estimation for a class of uncertain systems. *Automatica*, Vol. 34:pp. 757–764. [4.3](#), [4.3](#), [4.1](#)
- COVIELLO, G. (1965). An organizational approach to the optimisation of multivariable systems. *In inProceeding. JACC*. [3.5.3.3](#)
- DE-ALMEIDA, F. et LEISSLING, D. (2009). Fault tolerant flight control system using model predictive control. *Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications*. [3](#)
- DING, S., JEINSCH, T., FRANK, P. et DING, E. (2000). A unified approach to the optimization of fault detection systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Proceeding*, Vol. 14:pp. 725–745. [2.4.1](#)
- DUFOUR, P. (2000). *Contribution à la commande prédictive des systèmes à paramètres répartis non linéaires*. Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON 1 département de Génie Electrique et des Procédés. [3.7.4](#)
- FINCH, F. E., OYELEYE, O. O. et KRAMER, M. A. (1990). A robust event-oriented methodology for diagnosis of dynamic process systems. *Computers and Chemical Engineering*, vol.14(2):pp. 1379–1396. [2.6.2.1](#)
- FRADKOV, A. L., MIROSHNIKI, V. et NIKIFOROV, V. (1999). *Nonlinear and adaptive control of complex systems*. Kluwer. [3.2](#)
- FRANK, P. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica*, Vol. 26 (3):pp. 459–474. [2.6.1](#), [2.6.1](#)
- FRANK, P. et DING, X. (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer fault detection systems. *Journal of Process Control*, Vol. 7:pp. 403–424. [4.3](#)

- FRANK, P. M., DING, S. X. et KÖPPEN-SELIGER, B. (2000). Current developments in the theory of fdi. in *Proceedings of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (Safeprocess'2000)*, Vol. 1:pp. 16–27. [2.4.1](#)
- GAO, Z. et ANTSAKLIS, P. (1991). Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control. *International Journal of Control.*, Vol. 53(3):pp. 717–729. [2.5.1](#)
- GAO, Z. et ANTSAKLIS, P. (1992). Reconfigurable control system design via perfect modelfollowing. *International Journal of Control*, Vol. 56 (4):pp. 783–798. [2.5.1](#)
- GARCIA, E. et FRANK, P. (1996). On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection. In *IFAC-World Congress*, Vol. N:pp. 25–29. [2.4.1](#)
- GEROMEL, J. C., BERNUSSOU, J. et PERES, P. (1994). Decentralized control through parameter space optimization. *Automatica*, vol. 30, N°10:1565–1578. [3.3](#)
- GERTLER, J. (1995). Diagnosing parametric faults : From parameter estimation to parity relations. in *Proceedings of American Control Conference*, Vol. 3, (21):pp. 1615–1620. [2.4.1](#)
- GERTLER, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. CRC Press. [2.4.1](#), [2.6.1](#)
- GIRAUD, D. (1998). *Diagnostic des systèmes industriels complexes par agrégation de méthodes : Application à une station d'épuration*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy I. [2.6.2.2](#)
- GUENAB, F., THEILLIOL, D., WEBER, P., PONSART, J. et SAUTER, D. (2005). Fault tolerant control method based on cost and reliability analysis. *16th IFAC World Congress*. [2.6.3](#)
- HAMMELIN, F. et SAUTER, D. (2000). Robust fault detection in uncertain dynamic systems. *Automatica*, Vol. 36 (11):pp. 1747–1754. [2.4.1](#)
- HARRISON, J. (2006). Organisations, agents, and the evolution of complexity. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 14 (4):pp. 339–341. [3.2](#)
- HENRY, D. et ZOLGHADRI (2006). Norm based design of robust fdi schemes for uncertain systems under feedback control : Comparison of two approaches. Vol.14 (9):pp. 1081–1097. [2.4.1](#)
- HOU, M. et PATTON, R. (1998). Input observability and input reconstruction. *Automatica*, Vol. 34(6):pp. 789–794. [4.3](#)

- HUANG, C. Y. et STENGEL, R. (1990). Restructurable control using proportional integral implicit model following. *Journal of Guidance, Control et Dynamics*, Vol. 13 (2):pp. 303–309. [2.5.1](#)
- HUANG, S., LAM, J., YANG, G. et ZHANG, S. (1999). Fault tolerant decentralized h-infinity control for symmetric composite systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 44 (11):pp. 2108–2114. [2.6.3](#)
- HURTEAU, R. (1977). *Calcul et commande hiérarchisés des systèmes dynamique : Mise en oeuvre numérique et hybride*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse. [3.12.1](#)
- HUZMEZAN, M. et MACIEJOWSKI, J. (1998). Reconfigurable flight control of a high incidence research model using predictive control. *Proceedings of the IEE Conference Publication*, pages pp. 1169–1174. [2.5.1](#)
- IKEDA, M. et ŠILJAK, D. (1986). Overlapping decentralized control with input, state, and output inclusion. *Control Theory and Advanced Technology*, vol. 2 (2):pp. 155–172. [3.6.1](#)
- ISERMANN, R. (1984). Process fault detection based on modelling and estimation methods : A survey. *Automatica*, Vol. 20 (4):pp. 387–404. [2.4.1](#)
- ISERMANN, R. (2005a). Model-based fault detection and diagnosis status and applications. *Annual Reviews in control*, Vol. 29:pp. 71–85. [2.4.1](#)
- ISERMANN, R. (2005b). Model-based fault detection and diagnosis status and applications. *Annual Reviews in Control*, Vol. 29:pp. 71–85. [2.5](#)
- JALOTE, P. (1994). *Fault tolerance in distributed systems*. Prentice Hall. [2.6.3](#)
- JIANG, j. (2005). Fault tolerant control systems : An introductory overview. *ACTA Automatica SINICA*, Vol.31 (1):pp. 161–174. [2.5](#)
- KALE, M. et CHIPPERFIELD, A. (2005). Stabilized mpc formulaion for robust reconfigurable flight control. *Control Engineering Practice*, Vol.13:pp. 771–788. [4.1.2](#)
- KALMAN, R. (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Boletin Sociedad Matematica Mexicana*, Vol .5:pp. 102–119. [3.10](#)
- KAMBHAMPATI, C., PERKGOZ, C., PATTON, R. et AHAMED, W. (2007). An interaction predictive approach to fault tolerant control in network control systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 221:pp. 885–894. [3.12.1](#), [4.2](#)

- KANEV, S. (2004). *Robust fault tolerant control*. Thèse de doctorat, University of Twente, The Netherlands. [2.5.1](#)
- KANEV, S. et VERHAEGEN, M. (2000). Controller reconfiguration for nonlinear systems. *Control Engineering Practice*, Vol. 8 (11):pp. 1223–1235. [2.5.1](#)
- KLINKHIEO, S., PATTON, R. et KAMBHAMPATI, C. (2008). Robust fdi for ftc coordination in a distributed network system. *Proceeding of the 16th IFAC World Congress*, pages pp. 13551–13556. [4.2](#)
- KONSTANTOPOULOS, I. et ANTSAKLIS, P. (1996). An eigenstructure assignment approach to control reconfiguration. *Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation*, pages pp. 328–333. [2.5.1](#)
- KUWATA, Y., RICHARDS, A., SCHOUWENAARS, T. et HOW, J. P. (2006). Decentralized robust receding horizon control for multi-vehicle guidance. *In Proceeding American Control Conference*. [1](#)
- LEE, P. et ANDERSON, T. (1990). *Fault tolerance : principles and practice*. Springer Verlag. [2.6.3](#)
- LEITCH, R. et GALLANTI, M. (1992). Task classification for knowledge based systems in industrial automation. *IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics*, Vol. 22 (1):pp. 142–152. [2.6.2.2](#)
- LIU, X., CHEN, B. et LIN, Z. (2005). linear system toolkit in matlab : Structural decomposition and their applications. *Journal of Control, Theory and Applications*, Vol. 3:pp. 287–294. [4.3.1](#), [A](#)
- LONGHI, S., TRILLINI, R. et VACCARINI, M. (2005). Application of a networked decentralized mpc to syngas process in oil industry. *in 16th IFAC World Congress*. [3.6.2](#)
- LUENBERGER, D. (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions On Automatic Control*, vol. 16 (6):pp. 596–602. [2.4.1](#)
- MACIEJOWSKI, J. (1997). Modelling and predictive control : enabling technologies for reconfiguration. *Cambridge University Engineering Dept., Cambridge CB2 1PZ, England*. [2.5.1](#)
- MACIEJOWSKI, J. (1998). The implicit daisy-chaining property of constrained predictive control. *Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 8:pp. 695–711. [4.1.1](#)
- MACIEJOWSKI, J. (1999). Fault tolerant aspects of mpc. *IEE Two-Day Workshop on Model Predictive Control : Techniques and Applications - Day 2*, Ref. No. 1999/096:pp. 1/1 –1/4. [2.5.1](#), [4.1.2](#)

- MAHMOUD, M., JIANG, J. et ZHANG, Y. (2003). *Active fault tolerant control systems : Stochastic analysis and synthesis*. Springer-Verlag. 2.5
- MASSOUMNIA, M. (1986). A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. *IEEE Transactions On Automatic Control*, Vol. 31(9):pp. 839 – 846. 2.4.1
- MENIGHED, K., AUBRUN, C. et YAMÉ, J. (2009a). Distributed state estimation and model predictive control : Application to fault tolerant control. *7th International Conference on Control and Automation*. 3.9
- MENIGHED, K., AUBRUN, C. et YAMÉ, J. (2009b). Distributed state estimation and model predictive control of linear interconnected system : Application to fault tolerant control. *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*. 3.9
- MENIGHED, K., YAMÉ, J. et AUBRUN, C. (2010b). Modification of an adaptive observer to improve its performance in actuator fault detection. *accepted to MED 2010*. 4.3.1, 4.3.1, A.1, A.1.1
- MENIGHED, K., YAMÉ, J. et AUBRUN, C. (2010c). A slightly improved robust adaptive observer for actuator fault detection. *submitted to 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. 4.3.1, 4.3.1, A.1, A.1.1
- MENIGHED, K., YAMÉ, J. et AUBRUN, C. (April 2010a). An improved robust adaptive observer for actuator fault detection. *Submitted to the International Journal of Control, Automation and Systems*. 4.3.1, 4.3.1, A.1, A.1.1
- MESAROVIC, M., LEFKOWITZ, I. et PEARSON, J. (1965). Advanced in multilevel control. *In Proceedings of the IFAC Symposium*. 3.5.3.3
- MESAROVIC, M., MACKO, D. et TAKAHARA (1970). Theory of hierarchical multilevel systems. *In Academic Press-New York and London*. 3.5.3.3
- MILLOT, P. (1990). *Supervision des procédés automatisés et ergonomie. Traité des nouvelles technologies, série automatique*,. Hermès, Paris. 1
- MOERDER, D., HALYO, N., BROUSSARD, J. et CAGLAYAN, A. (1989). Application in a reconfigurable aircraft flight control system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.12 (3):pp. 325–333. 2.5.1
- NIEMANN, H. et STOUSTRUP, J. (2005). Passive fault tolerant control of a double inverted pendulum-a case study. *Control Engineering Practice*, Vol. 13:pp. 1047–1059. 2.1
- NOURA, H. (2002). *Méthodes d'accommodation aux défauts : Théorie et application*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1. 1, 2.5.1

- PARK, J., RIZZONI, G. et RIBBENS, W. B. (1994). On the representation of sensor faults in fault detection filters. *Automatica*, Vol. 30 (11):pp. 1793–1795. [4.5.3](#)
- PATTON, R. (1997). Fault tolerant control systems : the 1997 situation. In *IFAC Safe Process*. [2.1](#), [2.5](#), [2.5.1](#)
- PATTON, R. et CHEN, J. (1991). A review of parity space approaches to fault diagnosis. In *Proceedings of IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS '91)*, Vol. 1:pp. 239–255. [2.4.1](#), [2.4.1](#), [2.4.1](#)
- PATTON, R. et CHEN, J. (2000). On eigenstructure assignment for robust fault diagnosis. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10:pp. 1193–1208. [4.3](#), [4.3](#)
- PATTON, R., FRANK, P. et CLARK, R. (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer. [2.4.1](#)
- PATTON, R., KAMBHAMPATI, C., CASAVOLA, A., ZHANG, P., DING, S. et SAUTER, D. (2007). A generic strategy for fault tolerance in control systems distributed over a network. *European journal of control*, Vol. 13:pp. 280–296. [\(document\)](#), [2.13](#), [3.12.1](#), [4.2](#)
- PATTON, R. et KLINKHIEO, K. (2009). An adaptive approach to active fault tolerant control. *The Open Automation and Control Systems Journal*, Vol. 2:pp. 54–61. [2.5.1](#)
- RAUCH, H. (1994). Intelligent fault diagnosis and control reconfiguration. *IEEE Control System Magazine*, Vol. 14 (3):pp. 6–12. [2.6.3](#)
- RAUCH, H. (1995). Autonomous control reconfiguration. *IEEE Control System Magazine*, Vol. 15 (6):pp. 37–49. [2.6.3](#)
- RICHALET, J., G. LAVIELLE, G. et MALLET, J. (2005). *La commande prédictive. Mise en oeuvre et applications industrielles*. Groupe Eyrolles, Paris. [3.7.4](#)
- RODRIGUES, M. (2005). *Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1. [2.5.1](#)
- ROSSITER, J. (2003). *Model-Based Predictive Control : A Practical Approach*. CRC. [3.7.1.4](#)
- RUGH, W. J. (1992). Analytical framework for gain scheduling. *IEEE Control System Magazine*, 11:pp. 79–84. [2.5.1](#)
- SABERI, A., STOOORVOGEL, A. A. et SANNUTI, P. (2007). *Filtering theory : With applications to fault detection, isolation and estimation*. Birkhaser. [A.1](#)

- SAIF, M. et GUAN, Y. (1993). A new approach to robust fault detection and identification. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29 (3):pp. 685–695. [4.5.3](#)
- SANDELL, N. R., VARAIYA, P., ATHANS, M. et SAFONOV, M. G. (1978). Survey of decentralized control methods for large scale systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 23 (2):pp. 108–128. [3.3](#)
- SAUTER, D., BOUKHOBZA, T. et HAMELIN, F. (2006). Decentralized and autonomous design for fdi/ftc of networked control systems. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, pages pp. 163–168. [2.6.2.2](#)
- SCORLETTI, G. (1997). *Approche unifiée de l'analyse et de la commande des systèmes par formulation LMI*. Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay. ([document](#)), [3.3](#), [3.4](#), [3.1](#)
- SIMON, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the american philosophical society*, vol. 106 (6):pp. 467–482. [3.2](#)
- STANKOVIC, S., STANOJEVIC, M. et ŠILJAK, D. (2000). Decentralized overlapping control of a platoon of vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8 (8):pp. 816–832. [3.6.1](#), [3.6.1](#)
- STAROSWIECKI, M. (2005a). Fault tolerant control : the pseudo-inverse method revisited. *Proceeding 16th IFAC World Congress*. [2.5.1](#)
- STAROSWIECKI, M. (2005b). Fault tolerant control using an admissible model matching approach. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, pages pp. 2421–2426. [2.5.1](#)
- STAROSWIECKI, M. et GEHIN, A. (2001). From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, Vol. 25:pp. 1–11. [1](#), [2.5.1](#)
- STAROSWIECKI, M., YANG, H. et JIANG, B. (2006). Progressive accommodation of aircraft actuator faults. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'06)*, pages pp. 877–882. [2.5](#)
- STEFFEN, T., MICHAIL, K., DIXON, R., ZOLOTAS, A. et GOODALL, R. (2009). Optimal passive f-fault tolerant control of a high redundancy actuator. *Preprints of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'2009)*, pages pp. 1234–1239. [2.1](#)
- STEWART, D. (1962). On an approach to techniques for the analysis of the structure of large systems of equations. *SIAM Review*, 4:321–342. [3.4](#)

- STIWELL, D. J. et RUGH, W. J. (1999). Interpolation of observer state feedback controllers for gain scheduling. *IEEE transactions on automatic control*, Vol. 44 (6):pp. 1225–1229. [2.5.1](#)
- STOUSTRUP, J. et BLONDEL, V. (2004). A simultaneous stabilization approach to (passive) fault tolerant control. *Proceedings of American Control Conference*, Vol. 2:pp. 1817–1822. [2.5.1](#)
- STOUSTRUP, J. et NIEMANN, H. (2002). Fault estimation a standard problem approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol.12 (8):pp. 649–673. [2.4.1](#)
- SUN, S., DONG, L., LI, L. et GU, S. (2008). Fault tolerant control for constrained linear systems based on mpc and fdi. *International Journal of Information and Systems Sciences*, vol. 4(4):pp. 512–523. [4.1.1](#), [4.1.1](#)
- TAO, G. et JOSHI, S. (2005). Adaptive output feedback compensation of variant actuator failures. *American Control Conference*, pages pp. 4862–4867. [2.5.1](#)
- THEILLIOL, D., AUBRUN, C., GIRAUD, D. et GHETIE, M. (1997). Dialogs : A fault diagnosis toolbox for industrial processes. *SAFEPROCESS'97*. [2.6.1](#)
- THEILLIOL, D., SAUTER, D. et PONSART, J. (2003). A multiple model based approach for fault tolerant control in non linear systems. *5th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*, pages pp. 151–156. [2.5.1](#)
- TITLI, A. (1975). *Commande hiérarchisée et optimisation des processus complexes*. Dunod. [1](#), [3.5.3.1](#)
- TYLER, M. et MORARI, M. (1994). Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules. *Proceeding of the American Control Conference*, Vol.2:pp. 2060–2064. [2.5.1](#)
- VACCARINI, M., LONGHI, S. et KATEBI, R. (2009). Unconstrained networked decentralized model predictive control. *Journal of Process Control*, 19:328–339. [1](#), [3.6.2](#), [3.8](#), [3.10](#), [3.1](#), [3.11](#), [4.2](#), [4.3](#)
- VENKAT, A. N., RAWLINGS, J. B. et WRIGHT, S. J. (2007). Distributed model predictive control of large scale systems. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 358:pp. 591–606. [1](#)
- VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R. et KAVURI, S. N. (2003a). A review of process fault detection and diagnosis. part iii. process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27:pp. 327–346. [3](#)

- VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R. et KAVURI, S. N. (2003b). A review of process fault detection and diagnosis. part i. quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27:293–311. [1](#)
- VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R. et KAVURI, S. N. (2003c). A review of process fault detection and diagnosis. part ii. qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27:pp. 313–326. [2](#)
- ŠILJAK, D. (1978). *Large-scale dynamic systems : Stability and Structure*. New-York. [3.3](#), [3.1](#), [3.3.1](#)
- ŠILJAK, D. (1991). Decentralized control of complex systems. In *Academic Press, vol, 184 of Mathematics in Science Engineering, New-York*. [3.3](#), [3.5](#), [3.5.2](#)
- ŠILJAK, D. (1996). Decentralized control and computations : Status and prospects. *Automatica Reviews in Control*, Vol. 20:pp. 131–141. [3.3](#), [3.3.1](#)
- ŠILJAK, D. D. et ZEČEVIĆ, A. I. (2005). Control of large-scale systems : Beyond decentralized feedback. *Annual Reviews in Control*, vol. 29 (2):pp. 169–179. [3.6.1](#), [3.6.1](#)
- WANG, A. et LIN, S. (2000). The parametric solutions of eigenstructure assignment for controllable and uncontrollable singular systems. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 248:pp. 549–571. [2.5.1](#)
- WANG, H. et DALEY, S. (1996). Actuator fault diagnosis : An adaptive observer based technique. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 41 (7):pp. 1073–1078. [4.3](#), [4.3](#)
- WILLSKY, A. S. et JONES, H. (1976). A generalized likelihood ration approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Transactions On Automatic Control*, Vol. 21(1):pp. 108–112. [2.4.1](#)
- XIONG, Y. et SAIF, M. (2000). Robust fault detection and isolation via diagnosis observer. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 10:pp. 1175–1192. [4.3](#), [4.1](#), [5](#)
- XIONG, Y. et SAIF, M. (2003). Unknown disturbance inputs estimation based on state functional observer design. *Automatica*, Vol. 39:pp. 1390–1398. [4.3](#), [4.3](#), [4.2](#)
- ZHANG, K., JIANG, B. et COCQUEMPOT, V. (2008a). Adaptive observer-based fast fault estimation. *Inernational Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 6(3):pp. 320–326. [A.2](#)

- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2001). Integrated active fault tolerant control using imm approach. *IEEE Trans. on Aerospace et Electronic Systems*, vol. 37 (4):pp. 1221–1235. [2.5.1](#)
- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2002a). Active fault tolerant control system against partial actuator failures. *IEE Proc-Control Theory and application*, Vol. 149 (1):pp. 95–104. [2.5.1](#)
- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2002b). Design of restructurable active fault-tolerant control systems. *Proceedings of the 15th Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. [2.5.1](#)
- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2003). Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation. *IEEE Transactions on Aerospace et Electronic Systems*. [4](#)
- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2006). Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault-tolerant control systems. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'06)*, pages pp. 1513–1524. [2.5](#), [2.5.1](#)
- ZHANG, Y. et JIANG, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, vol. 32:pp.229–252. [2.1](#), [2.5](#), [2.5.1](#)
- ZHANG, Y., JIANG, J. et THEILLIOL, D. (2008b). Incorporating performance degradation in fault tolerant control system design with multiple actuator failures. *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 6 (3):pp. 327–338. [2.5](#), [3](#)
- ZHANG, Y., JIANG, J., YANG, Z. et HUSSAIN, A. (2005). Managing performance degradation in fault tolerant control systems. *in Proceedings of 16th IFAC World Congress*. [2.5](#)
- ZHOU, K. (2000). A new controller architecture for high performance, robust, and fault tolerant control. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. [2.5.1](#)

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse porte sur la tolérance aux défauts dans le cas des systèmes linéaires. Les moyens de communication numériques sont utilisés dans le cadre de la mise en œuvre d'une architecture de commande tolérante aux défauts pour des systèmes complexes. Une coopération entre les modules de commande/diagnostic assure la tolérance à certains types de défauts qui affectent le système. La commande des systèmes est traditionnellement réalisée à partir d'un ordinateur central qui collecte l'ensemble des informations relevées sur le procédé, puis les traite pour élaborer un ensemble de commande qui est appliqué au procédé. Avec le développement des systèmes commandés en réseaux (Networked Control System) et des systèmes embarqués, l'architecture des systèmes s'oriente vers une distribution des algorithmes de commande et de diagnostic. On se propose d'aborder le problème de la conception des stratégies de distribution de diagnostic/commande et de coopération des tâches de commande entre les sous-contrôleurs associés à chaque sous-système qui composent le système complexe et de prendre en compte les défauts des actionneurs et de capteurs affectant les sous-systèmes. Il s'agit alors d'élaborer une stratégie de commande coopérative visant à compenser les effets des défauts affectant le système. Les commandes locales sont des commandes prédictives à base de modèle (MPC : Model Predictive Control). Une analyse de stabilité a été faite en prenant en considération la défaillance du réseau de communication.

Mots clés : *Tolérance aux défauts, Diagnostic de défaut, Commande coopérative, Commande MPC, Système complexe.*

Abstract

The work presented in this memory of thesis focuses on fault tolerance in the case of linear systems. Digital communication tools are used in the context of the implementation of an architecture for fault tolerant control of complex systems. A cooperation between the control/diagnosis blocks ensures the tolerance to certain types of faults which affect the system. Control system is traditionally carried out starting from a central computer that collects all information gathered on the process. Then, these information are treated in order to develop a set of command which is applied to the process. Thanks to the development of the Networked System Control and embedded systems, systems architecture is oriented towards a distributed control and diagnostic algorithms. One proposes to address the problem of designing distribution strategies for diagnosis/control and control tasks cooperation between sub-controllers associated at each subsystem comprising the complex system and to take into account the faults on the actuators and sensors that affect the subsystems. Then a cooperative control strategy is proposed. It aims at compensating the effects of the faults affecting the system. Local controls are based on Model Predictive Control (MPC). An analysis of stability was made taking into account the failure of the communication network.

KeyWords : *Faults tolerance, Fault diagnosis, Cooperative control, MPC controller, Complex system.*