

N° d'ordre : 01/2017-D/ELC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté d'Electronique et Informatique



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En: ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Systèmes Electro énergétiques

Par : M. Samir ABDELMALEK

Sujet

**Contribution au Diagnostic et Commandes Tolérantes aux
Défauts d'une MADA**

Soutenue publiquement, le 15/12/2016, devant le jury composé de :

M.	M. HASNI	Professeur à l'USTHB	Président
Mme.	L. BARAZANE	Professeur à l'USTHB	Directrice de thèse
M.	A. LARABI	Professeur à l'USTHB	Co-Directeur de thèse
M.	D. DIB	Professeur à l'Univ. Tébéssa	Examineur 1
M.	S. LADACI	Professeur à l'ENP. Constantine	Examineur 2
M.	L. NEZLI	Professeur à l'ENP	Examineur 3
M.	A.NAIT SEGHIR	Maitre de Conférence/A à l'USTHB	Examineur 4

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du:

- ✓ Laboratoire des Systèmes Electriques et Industriels (LSEI) à l'Université de l'USTHB d'Alger.
- ✓ Laboratoire des Systèmes Multi-Sources (SMS) à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

Je voudrais en premier lieu, exprimer toute ma reconnaissance et toute ma gratitude à mes deux Directeurs de thèses, à Madame **BARAZANE LINDA**, Professeur à l'USTHB et Monsieur **LARABI ABDELKADER**, Professeur à l'USTHB, qui ont efficacement dirigé mes travaux pendant les années de préparation de thèse.

Mes vifs remerciements sont adressés à Monsieur **HASNI MOURAD**, professeur à l'USTHB, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à l'évaluation de ce travail :

- ✓ Monsieur **NAIT SEGHIR AMIROUCHE**, Maitre de conférences à l'USTHB,
- ✓ Monsieur **NEZLI LAZHARI**, Professeur à l'ENP d'Alger,
- ✓ Monsieur **DIB DJALEL**, Professeur à l'université de Tébessa,
- ✓ Monsieur **LADACI SAMIR**, Professeur à l'ENP de Constantine.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur **BETTAYEB MAAMAR**, Professeur à l'Université de Sharjah (UAE), pour son aide précieuse, ses conseils éclairés, ses encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer afin de mener à bien cette tâche.

Cette page ne saurait être complète sans remercier les chercheurs de l'UDES, et en particulier l'équipe du laboratoire Systèmes Multi-Sources (SMS).

Enfin, un grand merci à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études. Qu'ils trouvent en cette thèse le modeste témoignage de ma grande reconnaissance et ma plus profonde gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

A mon cher père

A ma chère femme

A mes deux fils “Mouad” et “Ilyes”

A toute ma famille et mes amis

*A toute la famille **REZAZI***

Avant-propos

Les travaux de recherche consignés par la présente thèse ont été caractérisés par des publications internationales, des communications internationales et nationales dont :

Publications internationales:

- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE, A. LARABI and M. BETTAYEB., “*A novel scheme for current sensor faults diagnosis in the stator of a DFIG described by a T-S fuzzy model.*”, Measurement (Elsevier), 91, pp. 680–691, 2016. **(IF = 1.742)**
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*Fault diagnosis for a doubly Fed induction generator.*”, Revue Roumaine des Sciences Techniques–Électrotechnique et Énergetique., 61(2), pp. 159–163, 2016. **(IF = 0.52)**
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*An advanced robust fault-tolerant tracking control for a doubly fed induction generator with actuator faults.*”, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences., 25, pp. , 2016. **(IF = 0.50)**
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*Stator and Rotor Voltage Dips Detection and Reconfiguration: Application to a DFIG Based Wind Turbines (WT).*”, Control Engineering and Applied Informatics., 2016. **(IF = 0.449)**
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*Unknown Input Observer for a Doubly Fed Induction Generator Subject to Disturbances.*”, International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 6(4), pp. 781-787, 2015.

Communications internationales:

- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*Developping of a Multiple models for a Doubly-Fed Induction Generator: Application to a Doubly-Fed Induction Generator.*”, The 2th International Conference On Electrical Sciences and Technologies (CISTEM'2016), October 26th - 28th, Marrakesh , Morocco.
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE, A. LARABI and H. BELMILI., “*Contributions to Diagnosis and Fault tolerant control Based on Proportional Integral Observer: Application to a Doubly-Fed Induction Generator.*”, The 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE'2015), 13-15 December 2015, Boumerdes, Algeria.

- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE, A. LARABI and H. BELMILI., “*State and Actuator Fault Estimation in Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs).*”, Deuxième Conférence Internationale sur l’Electrotechnique, l’Electronique, l’Automatique et la Maintenance (CIEEAM’15), 23 - 24 Novembre 2015, ENP, Oran.
- **S. ABDELMALEK** and H. BELMILI., “*Sensor faults detection and estimation for a DFIG equipped wind turbine.*”, International Conference on Materials & Energy (ICOME'15), 19-22 Mai 2015, Tétouan – Morocco.
- **S. ABDELMALEK**, H. BELMILI, L. BARAZANE and A. LARABI., “*A New Robust H_∞ Control Power.*”, International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT’14) Proceedings - Copyright IPCO-2014, pp.123-128, ISSN 2356-5608.
- **S. ABDELMALEK** and H. BELMILI., “*An Advanced Robust Control Power Based on Vector Control Approach,*”, International Conference on Computational and Experimental Science And Engineering (ICCESEN)., October 25-29, 2014, Antalya-Turkey.

Communications nationales:

- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE and A. LARABI., “*Takagi–Sugeno Fuzzy Fault-Tolerant Control Strategy of a DFIG.*”, The 1ST National Conference on Electronics & Electrical Engineering (NCEEE’16); November 14-15, 2016, University of BOUIRA. (Accepted)
- **S. ABDELMALEK**, L. BARAZANE, and A. LARABI., “*Short Circuit Faults Detection and Localization (SCFDL).*”, The 1ST National Conference on Electronics & Electrical Engineering (NCEEE’16); November 14-15, 2016, University of BOUIRA. (Accepted)

Projet de recherche:

- **Intitulé du projet** : Intégration et gestion d'un système PV-Eolien dans les milieux urbains, projet 02
 - **Equipe de recherche** : Systèmes Multi-Sources (SMS)
 - **Division** : EER
 - **Affiliation**: Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), EPST/CDER.
 - **Période** : 2014-2016

Résumé (Ar-Fr-An)

ملخص

العمل المنجز في هذه الأطروحة يتعلق باقتراح طريقة جديدة لتحديد القيم الحالية للنظام، لتشخيص الأعطال والتحكم المضاد لهذه الأعطال والتي تصيب الأنظمة الغير خطية والجد متداخلة، حيث أن الأخيرة تم تطبيقها على أعطال المولدات الكهربائية اللائزمانية المتصلة بتوربينات الرياح لأجل لتوليد الطاقة الكهربائية.

في البداية، قمنا بتحويل النظام الغير خطي للمولد الكهربائي إلى نموذج متكون من مجموعة من النماذج الخطية و المعبر عنها بالأنظمة الغامضة (نظام تاكاجي سيجنو). بالاعتماد على النموذج الخطي الناتج اقترحنا خوارزمية جديدة لتقدير حالة النظام، تشخيص الأعطال التي تصيب اللاقط (أو عدة ملتقطات) شدة التيار الكهربائي. حيث أن الأخيرة تعتمد على استخدام بنك مكون من متعدد ملاحظات لونيبرغر لتوليد دالة المتبقي ، والتي تدمج مع متبقي اخر مقترح للكشف عن الأعطال السابق ذكرها. أما فيما يخص تحديد مكان العطل، فقد اقترحنا طريقة رياضية جديدة تسمح لنا بتحديد دقيق لمكان اللاقط المصاب بالعطل.

اما الجزء الثاني من الأطروحة ، اقترحنا نظام مراقبة جديد يهدف الى السيطرة على الأخطاء الناتجة عن انخفاض او ارتفاع الضغط، وذلك بالاعتماد على نظام مراقبة نسبي تكاملي، حيث تم ايجاد حلول جديدة تعتمد اساسا على الدالة المربعة ليايونيوف. هذا النظام يسمح بضمان الاستقرار الكلي لنظام الدائرة المغلقة عن طريق إضافة قيود جديدة. وأخيرا، يتم التوصل لقانون التحكم المقترح الجديد اعتمادا على البحث عن حلول لمجموعة قيود مصفوفة خطية، وذلك بتقليل تأثير المدخلات العشوائية بالاعتماد على التقنية L_2 .

كلمات البحث :

المولدات الكهربائية اللائزمانية، الأنظمة الغير خطية، الأنظمة الغامضة (تاكاجي سيجنو)، ملتقطات شدة التيار الكهربائي، عن انخفاض او ارتفاع الضغط أخطاء، تشخيص الاعطال، التحكم المضاد للأعطال.

Résumé

Le travail présenté dans cette thèse concerne le développement de stratégies d'estimation d'état, de diagnostic et de commandes tolérantes aux défauts pour un système fortement non linéaire et couplé qui est la Génératrice Asynchrone à Double Alimentations (GADA) intégrée dans une éolienne. A cet effet et dans un premier temps, le modèle non linéaire de la GADA dans le repère $(\alpha\beta)$ est linéarisé en utilisant l'approche multimodèle de type Takagi-Sugeno (T-S) et cela pour étudier le fonctionnement de cette dernière. Par la suite, le multimodèle de type T-S obtenu après la transformation polytopique par secteur de découpage non linéaire est utilisé pour la synthèse d'un banc de multiobservateur de Luenberger. Ce banc est utilisé pour estimer les variables d'états et générer des résidus permettant la détection de défauts de capteurs de courant dans les phases statoriques de la GADA. En raison du couplage des équations dans la transformation de Clark, nous avons proposé un autre vecteur résidu combiné avec les autres résidus et une logique décisionnelle pour localiser les défauts.

Dans un deuxième partie, une loi de commande tolérante aux défauts est proposée, et laquelle basée sur la poursuite d'un modèle de référence qui correspond au modèle de la GADA sans défaut (en fonctionnement nominal). En exploitant les observateurs Proportionnel Intégral (PI) pour estimer simultanément les variables d'état et l'effet des défauts de creux de tension sur le stator et le rotor de la GADA. Après cette étude, il s'est avéré que la stratégie de commande proposée consiste à rajouter deux termes à la loi de commande initiale du système et cela afin de compenser le défaut de creux de tension affectant la GADA. Dans ce sens et afin de surmonter un tel inconvénient, une solution basée sur une fonction candidate quadratique de Lyapunov a été développée. Celles-ci a permis la synthèse d'une loi de commande obtenue par la résolution d'un ensemble de contraintes proposées sous forme LMIs (Inégalités Linéaires Matricielles) tout en minimisant l'effet des perturbations (bruits de mesure) par la technique de la norme $\mathcal{L}_2$.

Mots clés :

GADA, Système non linéaire, multimodèle (T-S), observateur, Défauts capteurs de courant, Creux de tension, Diagnostic, Commande tolérante aux défauts.

Abstract

The work presented in this thesis concerns the development of state estimation strategies, diagnostic and fault tolerant control for a highly nonlinear and coupled system which is the doubly fed induction generator (DFIG) based wind turbine. The nonlinear model of the DFIG is first transformed into an equivalent Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. Then, using this model, a novel fault detection and isolation (FDI) algorithm is proposed. This algorithm is based on a bank of Luenberger observers for residuals generation combined with a new proposed residual vector. Furthermore, a new binary decision logic is used for current sensor fault isolation.

In a second part, a novel active fault-tolerant tracking control strategy for a DFIG subject to actuator faults is proposed. This strategy consists, firstly, in designing a proportional integral observer (PIO) for simultaneous system states and faults estimation (voltage dips) and secondly, the fault-tolerant controller (FTC) which depends on the estimated states and faults. The objective of such a controller is to drive the state of the system to track a reference state generated by a reference fault-free model (nominal system). In addition, the main results for stability are demonstrated through a quadratic Lyapunov function, which are formulated in terms of Linear Matrix Inequalities (LMIs) in order to guarantee the stability of the whole closed-loop system and to reduce the actuator faults effects with noise attenuation. Further, the gain matrices of the fault-tolerant controller and the proportional integral observers are computed by solving a set of LMIs (Linear Matrix Inequalities) with using YALMIP toolbox with SeDuMi solver.

Keywords:

DFIG, nonlinear system, multiple models (T-S), observer, current sensor faults, voltage dips, diagnosis, fault tolerant control.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1

Figure (1.1)	Schéma de principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	p. 6
Figure (1.2)	Eléments constituant une éolienne	p. 6
Figure (1.3)	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)	p. 8
Figure (1.4)	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)	p. 9
Figure (1.5)	Aérogénérateur à axe horizontal	p. 10
Figure (1.6)	Schéma de la MADA	p. 12
Figure (1.7)	Modes de fonctionnement de la MADA	p. 14
Figure (1.8)	Générateur éolien à base d'une MADA	p. 16
Figure (1.9)	Schéma synoptique d'une turbine éolienne	p. 16
Figure (1.10)	Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide	p. 18
Figure (1.11)	Schéma bloc du modèle de la turbine	p. 19
Figure (1.12)	Zone de fonctionnement d'une éolienne basée sur une MADA	p. 20
Figure (1.13)	Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation	p. 21
Figure (1.14)	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine. asservissement de la vitesse	p. 22
Figure (1.15)	Contrôle MPPT sans Asservissement de la vitesse mécanique	p. 24
Figure (1.16)	Défauts d'un système éolien	p. 25
Figure (1.17)	Causes internes des défauts de la machine asynchrone	p. 26
Figure (1.18)	Causes externes des défauts de la machine asynchrone	p. 27
Figure (1.19)	Pourcentage des défauts pendant une décennie	p. 27
Figure (1.20)	Conséquence des défaillances des génératrices des éoliennes	p. 29

Chapitre 2

Figure (2.1)	Représentation multimodèle	p. 33
Figure (2.2)	Secteur non linéaire global	p. 41
Figure (2.3)	Secteur non linéaire local	p. 41
Figure (2.4)	Représentation schématique d'une GADA	p. 43
Figure (2.5)	Référentiels: triphasés (abc), biphasé fixe ($\alpha\beta$) et biphasé (dq) tournant	p. 45
Figure (2.6)	Évolution des variables d'états ($x_1(t)$ et $x_2(t)$) du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S	p. 52
Figure (2.7)	Évolution des variables d'états ($x_3(t)$ et $x_4(t)$) du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S	p. 53
Figure (2.8)	Évolutions des erreurs (e_1 et e_2) entre les variables d'états du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S	p. 53
Figure (2.9)	Evolutions des erreurs (e_3 et e_4) entre les variables d'états du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S	p. 54
Figure (2.10)	Évolutions des fonctions d'activation	p. 54
Figure (2.11)	Principe de d'estimation d'état	p. 55
Figure (2.12)	Évolution des variables d'états ($x_1(t)$ et $x_2(t)$) du MM-TS de la GADA et leurs estimations ($\hat{x}_1(t)$ et $\hat{x}_2(t)$)	p. 58
Figure (2.13)	Évolution des variables d'états ($x_3(t)$ et $x_4(t)$) du MM-TS de la GADA et leurs estimations ($\hat{x}_3(t)$ et $\hat{x}_4(t)$)	p. 58
Figure (2.14)	Évaluations des erreurs d'estimation d'états (e_1 et e_2)	p. 59
Figure (2.15)	Évaluations des erreurs d'estimation d'états (e_3 et e_4)	p. 59

Chapitre 3

Figure (3.1)	Structure générale d'une procédure de diagnostic	p. 63
Figure (3.2)	Différent types de défauts	p. 64
Figure (3.3)	Différentes méthodes de diagnostic	p. 65
Figure (3.4)	Etapes principales du diagnostic des défauts à base de modèle	p. 66

Figure (3.5)	Principe de la génération de résidus par estimation paramétrique	p. 67
Figure (3.6)	Schéma de principe du diagnostic de défauts à base d'observateur	p. 70
Figure (3.7)	Structure d'observateur simple	p. 71
Figure (3.8)	Localisation des défauts actionneurs par la structure GOS	p. 73
Figure (3.9)	Localisation des défauts actionneurs par la structure DOS	p. 73
Figure (3.10)	Schéma block de la stratégie de diagnostic proposée	p. 74
Figure (3.11)	Banc de multiobservateur de Luenberger (DOS) pour la génération de vecteur de résidus	p. 76
Figure (3.12)	Evolutions des sorties en absence et en présence de défaut	p. 81
Figure (3.13)	Zoom des sorties en absence et en présence de défaut	p. 81
Figure (3.14)	Détection de défaut capteur de courant dans la phase (a)	p. 82
Figure (3.15)	Isolation de défaut capteur de courant dans la phase (a)	p. 82
Figure (3.16)	Evolutions des sorties en absence et en présence de défaut	p. 84
Figure (3.17)	Zoom des sorties en absence et en présence de défaut	p. 84
Figure (3.18)	Détection de défaut capteur de courant dans la phase (b)	p. 85
Figure (3.19)	Isolation de défaut capteur de courant dans la phase (b)	p. 85
Figure (3.20)	Evolutions des sorties en absence et en présence des défauts	p. 86
Figure (3.21)	Zoom des sorties en absence et en présence des défauts	p. 87
Figure (3.22)	Détection des défauts capteurs de courants dans les deux phases (a) et (b)	p. 87
Figure (3.23)	Isolation des défauts capteurs de courants dans les deux phases (a) et (b)	p. 88

Chapitre 4

Figure (4.1)	Classification des méthodes tolérantes aux défauts.	p. 91
Figure (4.2)	Schéma de principe de la commande (PFTCS)	p. 92
Figure (4.3)	Schéma de principe de la commande (AFTC)	p. 93
Figure (4.4)	Schéma de principe de la méthode Pseudo-inverse	p. 96

Figure (4.5)	Stratégie de la commande tolérante aux défauts par trajectoire de références	p. 102
Figure (4.6)	Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états avec FTC	p. 109
Figure (4.7)	Comparaison entre les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états avec FTC	p. 109
Figure (4.8)	Comparaison des défauts (f_3 et f_4) et leurs estimations	p. 110
Figure (4.9)	Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états du système avec FTC	p.111
Figure (4.10)	Comparaison entre les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états avec FTC	p. 111
Figure (4.11)	Comparaison des défauts (f_1 et f_2) et leurs estimations	p. 112
Figure (4.12)	Comparaison les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA, états estimés et états du système avec FTC	p. 113
Figure (4.13)	Comparaison les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA, états estimés et états du système avec FTC	p. 113
Figure (4.14)	Comparaison des défauts (f_1 et f_2) et leurs estimations	p. 114
Figure (4.15)	Comparaison des défauts (f_3 et f_4) et leurs estimations	p. 114
Figure (4.16)	Comparaison les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA, états estimés et états du système avec FTC	p. 115
Figure (4.17)	Comparaison les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA, états estimés et états du système avec FTC	p. 115
Figure (4.18)	Comparaison des défauts (f_1 et f_3) et leur estimation	p. 116

Liste des tableaux

Tableau (1.1) : Modes opérationnels de la MADA	p.15
---	------

Symboles, Notations et Acronymes

Liste des symboles

V_w	Vitesse du vent
P_v	Puissance cinétique du vent
R	Longueur des pales
ρ	La densité de l'air.
S	Surface baillé par le rotor de la turbine.
C_{aero}	Couple aérodynamique
P_{aero}	Puissance aérodynamique
$C_p(\lambda, \beta)$	Rendement aérodynamique de la turbine (coefficient de puissance)
λ	Vitesse spécifique de la turbine
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale de la turbine.
λ_i	Vitesse spécifique
ρ	Densité de l'air.
β	Angle de calage des pales
R	Rayon des pales de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique de la génératrice
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
C_{em}	Couple électromagnétique
C_m	Couple mécanique
G	Gain du multiplicateur de vitesse
J_t	Inertie de la turbine
$v_{sa, sb, sc}$	Tension de la phase statorique a, phase b, phase c, respectivement
$v_{ra, rb, rc}$	Tension de la phase rotorique a, phase b, phase c, respectivement
$I_{sa, sb, sc}$	Courant de la phase statorique a, phase b, phase c, respectivement
$I_{ra, rb, rc}$	Courant de la phase rotorique a, phase b, phase c, respectivement
$u_{\alpha s}, u_{\beta s}$	Tensions statoriques dans le repère ($\alpha\beta$)

$u_{\alpha r}, u_{\beta r}$	Tension rotoriques dans le repère ($\alpha\beta$)
$I_{\alpha s}, I_{\beta s}$	Courants statoriques dans le repère ($\alpha\beta$)
$I_{\alpha r}, I_{\beta r}$	Courants rotoriques dans le repère ($\alpha\beta$)
$\varphi_{\alpha s}, \varphi_{\beta s}$	flux statoriques dans le repère ($\alpha\beta$)
$\varphi_{\alpha r}, \varphi_{\beta r}$	flux rotoriques dans le repère ($\alpha\beta$)
R_s, R_r, R_m	Résistances statorique, rotorique et magnétisante
R_s, R_r, R_m	Résistances statorique, rotorique et magnétisante
L_s, L_r, L_m	Inductances propre statorique, rotorique et magnétisante
θ	Angle électrique entre le stator et le rotor
L	Matrice d'inductances contient toutes les matrices propres et mutuelles
P	Nombre de pair de pôles
P_m	Puissance mécanique de la machine.
J_t	Moment d'inertie de la turbine
C_g	Couple développé par la génératrice
f_t	Coefficient dû aux frottements visqueux de la turbine
C_t	Couple mécanique de la turbine éolienne
J_m	Moment d'inertie de la MADA
$C_{méc}$	Couple mécanique sur l'arbre de la MADA
f_m	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA
f	Coefficient de frottements externes de la turbine
C_{em}	Couple électromagnétique de la MADA
Ω_t^{ref}	Vitesse de rotation de référence de la turbine
$\Omega_{méc}^{ref}$	Vitesse de rotation de référence de la génératrice
$C_{ém_ref}$	Couple électromagnétique de référence
$P_{méc_opt}$	Puissance mécanique optimale

Liste des notations

Indices

a, b, c	Repère triphasé réel (abc)
s, r	stator, rotor Ensemble des nombre réels
dq	Repère biphasé lié au champ tournant
α, β	Repère biphasé lié au stator
$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$	Coefficient de dispersion de Blondel.

Ensemble et domaines

$\mathbb{N}$	Ensemble des entiers naturels
$\mathbb{R}$	Ensemble des nombre réels
$\mathbb{R}^n$	Espace vectoriel de dimension n construit sur le corps des réels
$\mathbb{R}^{(n \times m)}$	Ensemble des matrices réelles de dimension (n×m)

Matrice et opérations

I_n	Matrice identité dimension (n×n)
$O_{n \times m}$	Matrice nulle de dimension (n×)
X^{-1}	Inverse de la matrice X
X^T	Transpose de la matrice X
$\begin{bmatrix} A_{11} & (*) \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$	Matrice symétrique, le symbole (*) désigne le transpose de A_{21} , (avec $(*) = A_{21}^T$)

Notation relatives aux multimodèles

$x(\cdot), u(\cdot), y(\cdot)$	Respectivement, vecteur d'état, vecteur d'entrée et vecteur de sortie
A_i, B_i, C_i	Respectivement, matrice d'état, matrice d'entrée et matrice de sortie du modèle local
$\mu_i(\cdot)$	$i^{ème}$ fonction d'activation correspondant au modèle local tel que $\mu_i(\cdot) \geq 0, \sum_{i=1}^M \mu_i(\cdot) = 1$
r	Nombre de modèle locaux

Liste des Acronymes

AFTC	Active Fault Tolerant Control.
DOS	Dedicated Observer Scheme
FTC	Fault Tolerant Control
FTCS	Fault Tolerant Control Systems
FDI	Fault Detection and Isolation
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MM	Multi-Modèles
GOS	Generalized Observer Scheme
LQG	Linear Quadratic Gaussian
LTI	Linéaires à Temps Invariant
LMI	Linear Martix Inégalities
LPV	Linear Parameter Varying
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MM	Multi-modèles
PI	Proportionnel Intégral
PFTC	Passive Fault Tolerant Control
T-S	Takagi-Sugeno

Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	p. 1
Chapitre 1: Description et défaillances d'un système éolien à base d'une MADA	
1.1. INTRODUCTION	p. 5
1.2. AEROGENERATEURS EOLIENS	p. 5
1.2.1. Eléments Constitutifs d'une éolienne	p. 6
1.2.2. Différents types d'aérogénérateurs	p. 8
1.2.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical	p. 8
1.2.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal	p. 9
1.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE	p. 10
1.3.1. Avantages	p. 10
1.3.2. Inconvénients	p. 11
1.4. AEROGENERATEUR A VITESSE VARIABLE BASEE SUR LA MADA	p. 11
1.4.1. Avantages et inconvénients de la MADA	p. 12
1.4.2. Modes de fonctionnement de la MADA	p. 13
1.5. MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN BASEE SUR UNE MADA	p. 15
1.5.1. Description du système de conversion éolien	p. 15
1.5.2. Modélisation de la turbine éolienne	p. 16
1.5.3. Zones de fonctionnement de la MADA dans un système éolien	p. 20
1.5.4. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	p. 21
1.5.5. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	p. 22
1.6. GENERALITE SUR LES DEFAUTS AFFECTENT UN SYETEM EOLIEN	p. 24
1.6.1. Différents types de défauts dans un système éolien	p. 24
1.6.2. Différents types de défauts affectant la GADA	p. 25

1.6.2.1. Causes des défauts	p. 28
1.6.2.2. Conséquences des défauts	p. 28
1.7. CONCLUSION	p. 29
Chapitre 2: Modélisation et estimation d'états de la GADA par multimodèles de type T-S	
2.1. INTRODUCTION	p. 31
2.2. GENERALITES SUR LES MULTIMODELES (MM)	p. 32
2.2.1. Terminologies et définitions	p. 32
2.2.2. Structures des multimodèles	p. 33
2.2.2.1. Multimodèles de Takagi-Sugeno (T-S)	p. 34
2.2.2.2. Multimodèles découplés	p. 35
2.3. TECHNIQUES D'OBTENTION D'UN MODÈLE FLOU DE T-S	p. 36
2.3.1. Technique par identification	p. 36
2.3.2. Technique par linéarisation	p. 37
2.3.3. Technique de découpage par secteurs non-linéaires	p. 39
2.4. STABILITE DES SYSTEMES REPRESENTES PAR MULTIMODELES	p. 41
2.4.1. Stabilité quadratique	p. 41
2.4.2. Stabilité relaxée	p. 42
2.5. MODELE MATHEMATIQUE DE LA GADA	p. 43
2.5.1. Modèle non linéaire dans le repère de Park	p. 45
2.5.2. Modèle non linéaire dans le repère ($\alpha\beta$)	p. 47
2.6. REPRESENTATION MULTIMODELES DE LA GADA	p. 48
2.6.1. Méthodologie d'obtention du multimodèle	p. 48
2.6.2. Résultats de simulation et interprétations	p. 51
2.7. ESTIMATION D'ETAT A BASE D'OBSERVATEURS DES SYSTEMES T-S	p. 55
2.7.1. Multiobservateur basé sur la structure multimodèle de T-S	p. 56

2.7.2. Résultats de simulation et interprétations	p. 57
2.8. CONCLUSION	p. 60
Chapitre 3: Diagnostic des défauts statoriques à base d'observateurs	
3.1. INTRODUCTION	p. 61
3.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS	p. 62
3.3. PROCEDURE DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS	p. 62
3.4. CLASSIFICATION ET CARACTERISTIQUES TEMPORELLES DES DEFAUTS	p. 63
3.5. DIFFERENTES METHODES DE DIAGNOSTIC DE DEFAUTS	p. 64
3.5.1. Principe de l'approche qualitative	p. 65
3.5.2. Principe de l'approche quantitative.	p. 65
3.5.3. Diagnostic à base de modèles	p. 66
3.5.4. Diagnostic sans modèle à priori	p. 68
3.6. GENERATION DES RESIDUS POUR LE DIAGNOSTIC DE DEFUATS	p. 69
3.6.1. Génération de résidus à base d'observateurs	p. 69
3.6.2. Structuration et évaluation des résidus générés à base d'observateurs	p. 70
3.6.2.1. Structure d'observateurs simplifiés	p. 71
3.6.2.2. Structure d'observateurs dédiés (DOS)	p. 71
3.6.2.3. Structure d'observateurs généralisés (GOS)	p. 72
3.6.3. Localisation des défauts	p. 72
3.6.3.1. Localisation des défauts actionneurs	p. 72
3.6.3.2. Localisation des défauts capteurs	p. 73
3.7. STRATEGIE PROPOSEE DE DIAGNOSTIC DE DEFAUTS CAPTEURS DE COURANT DE LA GADA	p. 74
3.7.1. Modèle défaillant de la GADA	p. 75
3.7.2. Procédure proposée de diagnostic de défauts	p. 76
3.7.2.1. Phase de génération des résidus	p. 76

3.7.2.2. Phase de détection de défauts	p. 78
3.7.2.3. Phase d'isolation de défauts	p. 78
3.7.3. Résultats de simulations et interprétations	p. 80
3.8. CONCLUSION	p. 88
Chapitre 4: Commande FTC proposée en présence de défauts de creux de tension	
4.1. INTRODUCTION	p. 90
4.2. METHODES DE COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS	p. 91
4.2.1. Méthodes passives	p. 91
4.2.2. Méthodes actives	p. 92
4.3. METHODES DE SYNTHESE D'UNE LOI DE COMMANDES TOLERANTES AUX FAUTES ACTIVES	p. 94
4.3.1. Pseudo-inverse	p. 95
4.3.2. Placement de structure propre	p. 96
4.3.3. Multimodèles de T-S	p. 97
4.3.4. Commande adaptative	p. 97
4.3.5. Commande prédictive à base de modèle	p. 98
4.3.6. Commande tolérante aux défauts par poursuite de trajectoire	p. 98
4.3.7. Atténuation des perturbations par la norme $\mathcal{L}_2$	p. 98
4.4. IMPACT DE CREUX DE TENSION SUR LA GADA	p. 99
4.5. STRATEGIE PROPOSEE DE COMMANDE FTC PAR TRAJECTOIRES DE REFERENCE	p. 100
4.5.1. Modèle de la GADA en présence de défaut de creux de tension	p. 100
4.5.2. Etapes de synthèse de la loi de commande FTC	p. 101
4.5.3. Résultats de simulations et interprétations	p. 108
4.6. CONCLUSION	p. 116
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	p. 118

Références bibliographiques	p. 120
Annexe A	p. 136
Annexe B	p. 137

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières décennies, la recherche dans le domaine du diagnostic et de commande tolérante aux défauts des génératrices asynchrones à double alimentation a fait l'objet d'une attention particulière et intéresse de plus en plus la communauté scientifique et les industriels.

Actuellement, la plupart des fermes éoliennes à vitesses variables sont basées sur des Génératrices Asynchrones à Double Alimentation (GADA) [Beltran, 2010; Benbouzid *et al.*, 2014; Raúl *et al.*, 2015; Bossoufi *et al.*, 2015]. Et cela vu les différents avantages qu'elle présente tels que sa robustesse, sa puissance massique, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût [Heier, 2006 ; Abdeddaim *et al.*, 2014]. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces machines présentent quelques défaillances d'ordre électrique qui peuvent apparaître au niveau de son rotor ou stator (courts-circuits entre spires, capteurs, perturbations du réseau, creux de tension...etc) [Rothenhagen *et Fuchs*, 2006 ; Abo *et al.*, 2006 ; Iov *et al.*, 2007 ; Rothenhagen *et Fuchs*, 2008 ; Rothenhagen *et Fuchs*, 2009a ; Rothenhagen *et Fuchs*, 2009b ; Benbouzid *et al.*, 2014], mécaniques ou des perturbations externes (bruits de mesure,...).

Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements au niveau des génératrices, ainsi que des systèmes éoliens associé et conduisent par conséquent à sa mise en hors service. De plus, si le défaut n'est pas détecté, isolé et compensé rapidement, il peut dans certains cas mettre en danger tout le système éolien. Par conséquent, afin d'empêcher la propagation de tels défauts aux autres composants et aux autres systèmes éoliens d'une ferme éolienne et d'assurer la continuité de service en toute circonstance en présence d'une défaillance, des méthodes efficaces et rapides de détection et de compensation de défaut doivent être mises en oeuvre. En effet, le besoin du diagnostic et de commande tolérante aux défauts se fait alors, de plus en plus, sentir et cela pour tendre vers une maintenance prédictive et éviter les arrêts d'urgence ou forcés, qui engendre des pertes de production et des réparations coûteuses. Ainsi, pour améliorer la fiabilité de ces génératrices, il est nécessaire d'intégrer un système de surveillance et de diagnostic fiable, qui va permettre non seulement, de détecter et localiser les défauts et compenser l'effet néfaste qui en découle, mais aussi de fournir des informations sur le fonctionnement du système aux opérateurs qui l'exploitent.

Pour répondre à cette problématique, diverses techniques de surveillance et de diagnostic des défauts au niveau de la GADA d'une éolienne ont été développées dans la littérature, parmi lesquelles on peut citer les travaux de : [Bonnett *et Soukup*, 1992 ; Boumegoura, 2001; Didier, 2004 ; Arfat *et al.*, 2005 ; Ibrahim, 2006; Rangarajan *et al.*, 2007 ; Bonnett *et Yung*, 2008 ;

Kaikka, 2010 ; Galvez-Carrillo *et al.*, 2010 ; Benzineb 2010 ; Galvez-Carrillo *et* Kinnaert, 2011; Elkhatib *et al.*, 2012 ; Medoued, 2012; Attoui *et al.*, 2014 ; Ramahaleomiarantsoa, 2013 ; Razavi-Far *et al.*, 2014 ; Ouyessaad, 2014 ; Attoui, 2014 ; Kouchih, 2015 ; Boudrim, 2015]. Cependant, la majorité de ces techniques sont basées sur des outils de représentation temps-fréquence et temps-échelle aussi diverses que le spectrogramme et la transformée en ondelettes [Attoui *et al.*, 2014; Boudrim, 2015]. Seulement, quelques travaux [Rothenhagen *et* Fuchs, 2006; Rothenhagen *et* Fuchs, 2008 ; Rothenhagen *et* Fuchs, 2009a ; Rothenhagen *et* Fuchs, 2009b ; Elkhatib *et al.*, 2012 ; Ouyessaad, 2014] sont dédiés à l'exploitation des techniques à base de modèles pour le diagnostic ; ce qui nous a motivés dans la présente thèse de doctorat à contribuer dans ce sens.

En effet, l'objectif principal visé dans cette thèse consiste à proposer des stratégies de diagnostic et de commande tolérante aux défauts à base de modèle de la GADA. Plus précisément, nous avons essayé de focaliser notre recherche sur les défauts de capteurs de courant dans les phases statoriques et l'effet de défaut de creux de tension sur le stator et le rotor. Dans un premier temps, nous proposons un algorithme de détection, et d'isolation de défauts basé sur un banc multiobservateur de Luenberger, avec une structure DOS (Dedicated Observer Scheme). L'algorithme proposé est combiné avec un autre vecteur résidu proposé et une logique de décision pour localiser les défauts. Ce dernier, est capable de détecter et d'isoler simultanément des défauts de capteurs multiples.

Notons cependant, que toutes les méthodes développées dans cette thèse sont basées sur l'approche multimodèle de type T-S à cause de la complexité de la GADA qui est un système multivariable, non linéaire et fortement couplé. Cette approche consiste à construire une représentation polytopique convexe pour approcher le comportement des systèmes non linéaires. Cette représentation peut être obtenue à partir de la linéarisation autour de différents points de fonctionnement, par identification à partir de mesures entrées-sorties, ou dans certains cas par transformations par secteur de découpage non linéaires.

Par ailleurs, et pour garantir la sûreté de fonctionnement de la génératrice et du système éolien associé, et assurer également la bonne qualité de l'énergie fournie au réseau en présence de défauts de creux de tensions qui peuvent influencer directement sur le stator et le rotor de la génératrice, nous proposons une stratégie de commande tolérante aux défauts par poursuite de trajectoire de référence. Cette stratégie est basée sur le formalisme $\mathcal{L}_2$ (la norme 2) et exploite le

multimodèle de type T-S obtenue de la GADA, ainsi que les observateurs proportionnels intégral (PI). Elle permet de ce fait de:

- s'accommoder automatiquement en présence du divers type de défauts,
- estimer simultanément les variables d'états ainsi que les défauts qui peuvent apparaître au niveau du rotor ou du stator de la GADA. Ces défauts sont causés par les creux de tension,
- maintenir la stabilité de la GADA en présence de défaut, afin d'éviter les situations catastrophiques.

Afin d'atteindre ces objectifs, on a tenu à organiser cette thèse en quatre chapitres distincts à savoir :

- **Le premier chapitre** présente l'état de l'art sur les systèmes à énergie éolienne. La définition de l'énergie éolienne, les différents composants qui constituent l'aérogénérateur, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que les différents types d'éoliennes et cela de manière succincte. Ensuite, nous expliquerons l'intérêt de la partie multiplicateur de vitesse, ainsi que l'arbre de l'aérogénérateur. D'autre part, nous introduirons la notion de MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui est une approche permettant à l'aérogénérateur de fonctionner continuellement à une vitesse tendant à sa vitesse nominale en fonction de la vitesse du vent. Enfin, nous présentons les divers défauts qui peuvent apparaître au niveau du système éolien et la génératrice asynchrone et lesquels seront diagnostiqués dans les chapitres suivants.
- **Le deuxième chapitre**, constitue une première contribution de ce travail de thèse, en effet le but est de développer un modèle mathématique de la GADA par l'approche multimodèles de type T-S, en utilisant la technique par secteur de découpage non linéaire. La représentation multimodèle obtenue sera ensuite exploitée, pour l'estimation des variables d'états de la génératrice à base du multiobservateur de Luenberger. Les gains du multiobservateur seront calculés à travers la résolution des Inégalités Matricielles Linéaires (LMIs). Enfin, des résultats de simulation seront illustrés pour montrer et valider le multimodèle de T-S obtenu, ainsi que l'estimation des variables d'états de la GADA.
- **Le troisième chapitre**, constitue une deuxième contribution de ce travail de thèse. En effet, un algorithme de diagnostic robuste sera proposé, et cela en vue de diagnostiquer les défauts des capteurs de courants statoriques causés par les défauts de court-circuit des

spires dans une seule phase (a ou b), puis dans deux phases statoriques (a et b). Cet algorithme est basé sur un banc de multiobservateur avec une structure DOS, qui sera utilisé pour la génération des résidus. Ces derniers seront combinés avec un vecteur résidu proposé dans le but de détecter et localiser ces défauts (simples, multiples et simultanés). Les gains de banc de multiobservateur sont alors calculés en se basant sur la résolution des LMIs. Enfin, des résultats de simulation seront présentés dans le but de démontrer et valider la stratégie de diagnostic proposée.

- **Le quatrième chapitre**, fait lui aussi l'objet d'une troisième contribution dont l'objectif est de proposer une stratégie de synthèse d'une loi de commande tolérante aux défauts basée sur le formalisme $\mathcal{L}_2$, pour le multimodèle T-S de la GADA sous forme standard tout en tenant compte des perturbations externes (bruits de mesures). Cette stratégie est basée sur la poursuite de trajectoire d'un modèle de référence décrivant le comportement de la GADA en fonctionnement nominal (sans défauts). Dans ce cas, la commande contient un terme correspondant à la commande nominale de la GADA à laquelle seront ajoutés des termes qui tiennent compte de l'estimation simultanée de l'état et des défauts. Les conditions de stabilité sont alors exprimées en termes des LMIs à travers une fonction candidate quadratique de Lyapunov. Un observateur Proportionnel-Intégral (PI) est utilisé. L'avantage de ce dernier est de permettre d'estimer simultanément les variables d'états et les défauts causés par les creux de tensions.

Cette thèse s'achèvera par une conclusion générale permettant de résumer l'ensemble des travaux réalisés et des contributions apportées.

Chapitre 1

Description et défaillances d'un système éolien à base d'une MADA

1.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'introduire la notion d'aérogénérateur éolien et plus particulièrement l'aérogénérateur éolien à base d'une GADA. Nous expliquerons le fonctionnement de l'aérogénérateur, ainsi que toute sa chaîne de conversion énergétique. Comment à partir de l'énergie cinétique du vent, on obtient de l'énergie électrique. Ensuite, nous étudierons et modéliserons les différents composants constituant l'aérogénérateur éolien. En plus, nous modéliserons l'aérogénérateur éolien en évoquant le coefficient de puissance.

Par la suite, nous expliquerons l'intérêt du multiplicateur ainsi que l'arbre de l'aérogénérateur. D'une part, nous introduirons ensuite la notion de MPPT, technique permettant à l'aérogénérateur de fonctionner continuellement à une vitesse tendant à sa vitesse nominale en fonction de la vitesse du vent. Enfin, nous présentons succinctement un panorama des défauts pouvant affecter un système éolien.

1.2. AEROGENERATEURS EOLIENS

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- a- Au niveau de la turbine éolienne : qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- b- Au niveau de la génératrice : qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

La structure de base d'un aérogénérateur consiste en :

- a- Un rotor pour capter l'énergie cinétique du vent en la transformant en énergie mécanique en rotation,
- b- Un couplage mécanique direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur ou un couplage réalisé par l'intermédiaire d'un système d'engrenage dans le cas contraire,
- c- Une machine électrique pour convertir l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission en énergie électrique.

Un schéma de principe est donné à la Figure (1.1).

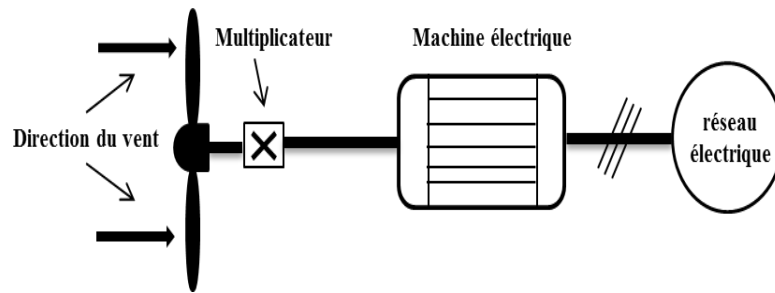


Figure (1.1) : Schéma de principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

1.2.1. Éléments constitutifs d'une éolienne

Un système éolien comporte essentiellement des éléments mécaniques et électriques comme le montre sur la Figure (1.2) [El-Aimani, 2004 ; Arnaud, 2010].

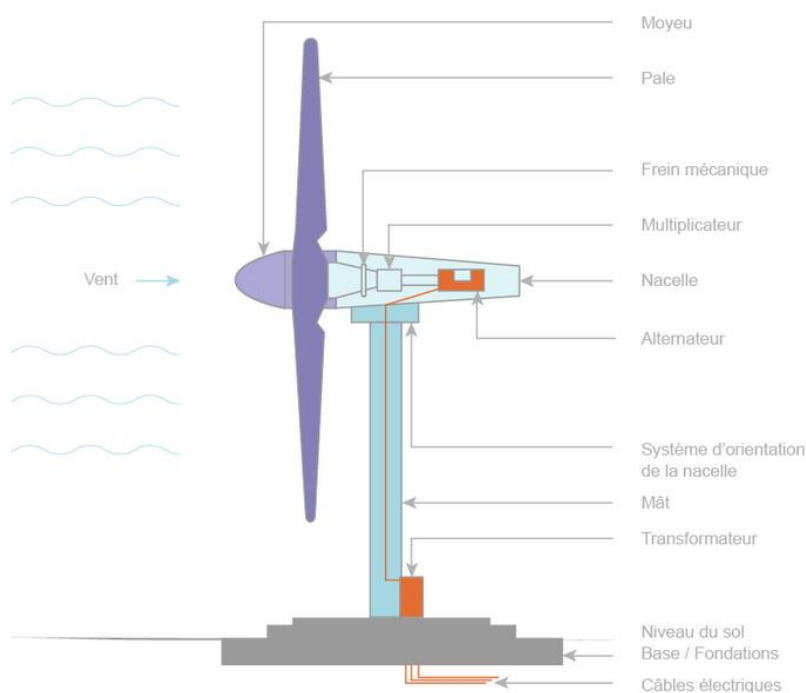


Figure (1.2) : Éléments constituant une éolienne.

- a- Mat :** il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mat abrite généralement une partie des composants électrique et électronique (modulateur, commande, multiplicateur, générateur,... etc).

- b- Nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales et de la nacelle (voir la Figure (1.2)).
- c- Rotor :** il est composé de plusieurs pales et du nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être branché directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Ce dernier est relié à la nacelle par moyeu.
- d- Moyeu :** le moyeu est une pièce en acier moulé, il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle
- e- Fondation :** une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.
- f- Pales :** elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- g- Génératrice :** c'est l'élément principal de la conversion mécanique-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.
- h- Multiplicateur :** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- i- Arbre de transmission :** Il est composé de deux arbres :
 - **Arbre primaire :** cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20-40 tr/min).
 - **Arbre secondaire :** il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tr/min) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.
- j- Système de refroidissement :** se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- k- Système de contrôle :** c'est un dispositif qui surveille l'état et le dispositif d'orientation.

l- Outils de mesure de vent : nous avons deux types : une girouette pour évaluer la direction du vent et un anémomètre pour en mesure la vitesse.

m- Système d'orientation de la nacelle : les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.

1.2.2. Différents types d'aérogénérateurs

Les aérogénérateurs peuvent être classés en deux catégories selon la disposition de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [Multon *et al*, 2004; Nasser *et al.*, 2011]. Actuellement, les aérogénérateurs à axe horizontal sont largement plus utilisés que les aérogénérateurs à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation [Gaillard, 2010].

1.2.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles :

a- Aérogénérateurs à rotor de Darrieus: ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (voir la Figure (1.3)). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



Figure (1.3) : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).

- a- **Aérogénérateurs à rotor de Savonius** : son principe est basé sur la traînée différentielle. Un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure. La Figure (1.4) montre la structure d'un aérogénérateur à rotor de Savonius.



Figure (1.4) : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).

Parmi les principaux avantages des aérogénérateurs à axe vertical sont:

- a- l'accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- b- la non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant, elles ont comme inconvénients les points suivants:

- a- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- b- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- c- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

1.2.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans le monde, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Pour des raisons des stabilités, de poids et de fluctuations mécaniques, 80% des éoliennes construites sont des aérogénérateurs tripales comme présenté à la Figure (1.5).



Figure (1.5) : Aérogénérateur à axe horizontal.

1.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.3.1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [Bourillon, 1999 ; Camblong, 2003]:

- a- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂, propre et sans rejet atmosphérique;
- b- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable;
- c- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risques comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs ;
- d- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;
- e- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains [Hornefors, 2005; Camblong, 2003]:

- a- C'est l'énergie la moins onéreuse des énergies renouvelables ;
- b- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;

Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie peut être facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

1.3.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages [Camblong, 2003] :

- a- Le captage et la conversion de l'énergie sont complexes;
- b- La source d'énergie (vent) est aléatoire ;
- c- L'impact visuel qui reste, néanmoins, un thème subjectif ;
- d- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur et le bruit aérodynamique qui est lié à la vitesse de rotation du rotor, en limitant cette dernière ;
- e- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs et d'autres recommandent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux pour éviter qu'ils ne se fassent pas attraper par les aéroturbines;
- f- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne ;
- g- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse concurrencer la plupart des sources d'énergie classique.

1.4. AEROGENERATEUR A VITESSE VARIABLE BASEE SUR LA MADA

La MADA est une génératrice permettant le fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne en ajustant la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. La MADA est composée d'une machine asynchrone, de deux convertisseurs de puissance et en général d'un

transformateur pour adapter la tension au réseau [Rémi, 2012]. La Figure (1.6) montre que le rotor est branché au redresseur alors que le stator est directement branché au réseau.

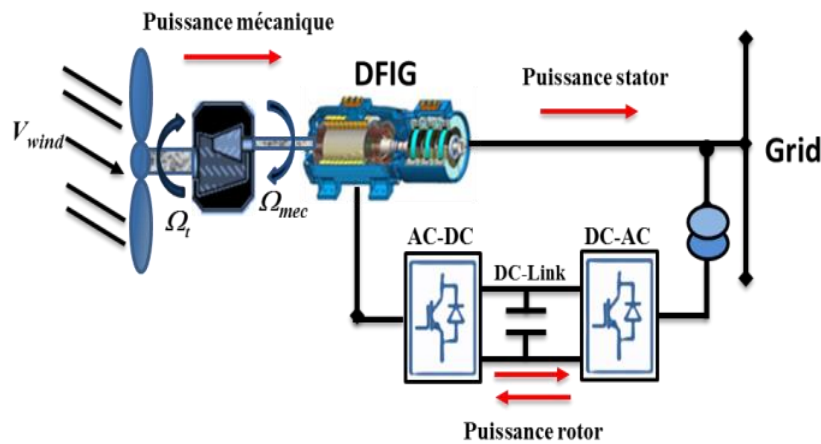


Figure (1.6) : Schéma de la MADA.

Les grandeurs alternatives au stator (courants et tensions) ont la même fréquence que celle du réseau. C'est pourquoi elles n'ont pas besoin de passer par des convertisseurs de puissance pour transférer la puissance électrique statorique au réseau. En revanche, les grandeurs alternatives à la sortie du rotor n'ont pas la même fréquence que les grandeurs alternatives du réseau. Elles dépendent de la vitesse du rotor et donc de la vitesse du vent. On utilise alors des convertisseurs de puissance pour adapter leur fréquence à celle du réseau [Tremblay, 2006]. La GADA utilise donc des convertisseurs sous dimensionnés et donc moins coûteux. Cette technologie est mûre, solide et très fiable. On peut l'utiliser pour des applications à grande puissance et à vitesse variable. Elle possède actuellement un meilleur rendement que les nouvelles machines synchrones à aimants permanents.

1.4. 1. Avantages et inconvénients de la MADA

Les avantages de la GADA sont [Rémi, 2012; Boudrim, 2015]:

- a- Sa capacité de commander la puissance réactive, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive: elle permet de mettre en place une commande vectorielle, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront: la puissance active pour l'axe « q » rotorique et la puissance réactive pour l'axe « d » rotorique.

- b- Elle peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- c- Elle est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active permet de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal. De plus, la commande indirecte avec deux boucles en cascades permet d'accroître la robustesse du système.
- d- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.

Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

1.4.2. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (Figure (1.7)) [Merahi, 2014 ; Moualdia, 2014]. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

- a- La MADA fonctionne en mode moteur (Quadrant 1). Le stator consomme de la puissance P_s du réseau électrique. Durant ce mode de fonctionnement, la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme, la puissance du glissement P_r transitée à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau, c'est le mode hypo-synchrone ;
- b- La MADA fonctionne en mode moteur hyper-synchrone (Quadrant 2). Le stator consomme de la puissance P_s du réseau électrique. La puissance du glissement P_r transitée par les deux convertisseurs de puissance est absorbée par le rotor entraînant ainsi un fonctionnement au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- c- La MADA fonctionne en mode générateur (Quadrant 3). La turbine fournit une puissance mécanique (P_m) à la machine. Une partie de la puissance générée par le stator est réabsorbée par le rotor à travers les deux convertisseurs de puissance. C'est le mode hypo-synchrone.

- d- La MADA fonctionne en mode générateur hyper-synchrone (Quadrant 4). La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Le Tableau (1.1) résume les différents modes et régimes de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants. Le signe (-) attribué à une telle puissance signifie que celle-ci est fournie par la MADA, alors que le signe moins (+) est attribué dans le cas où la puissance est fournie de l'extérieur à la MADA.

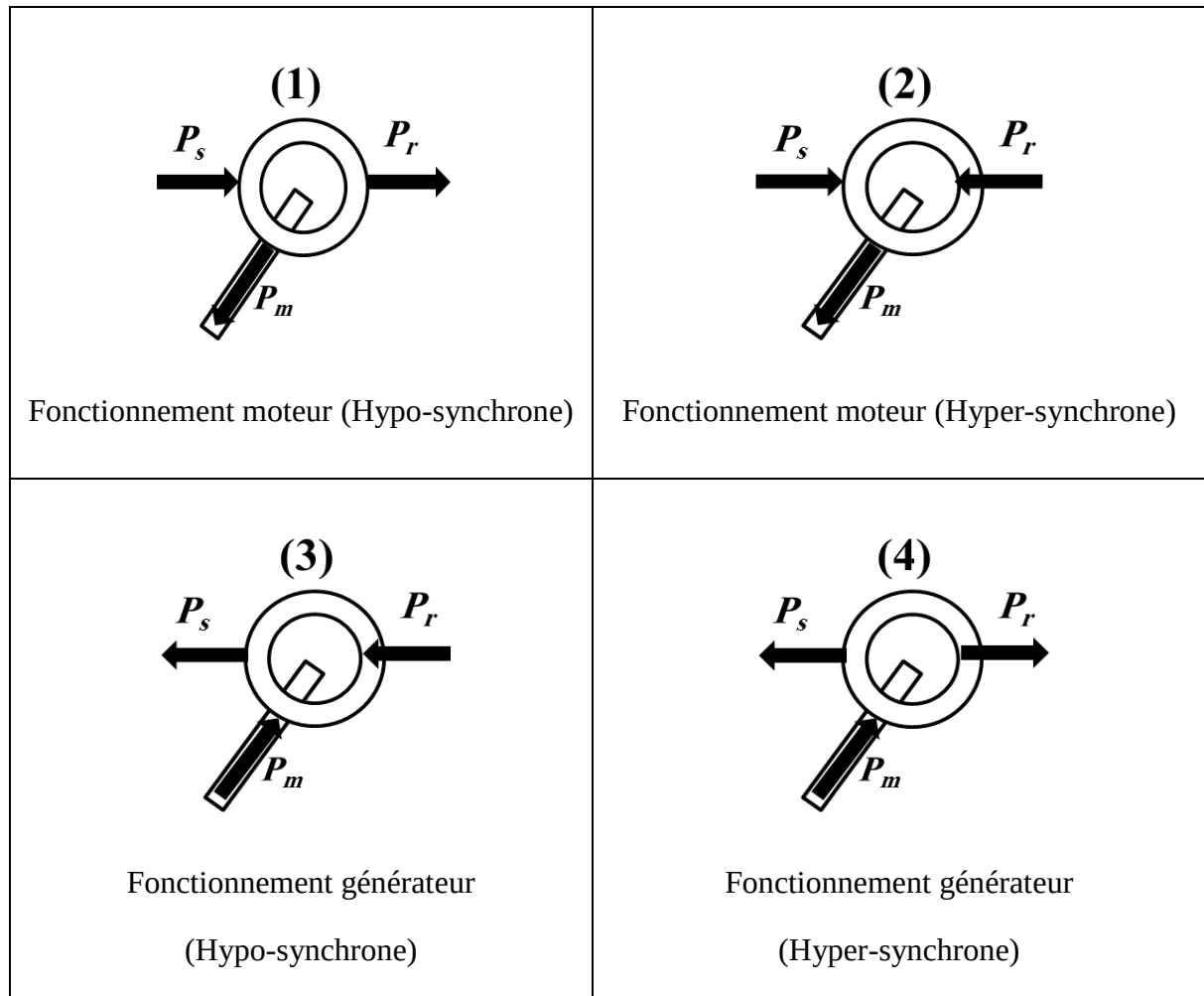


Figure (1.7) : Modes de fonctionnement de la MADA.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants (3) et (4) sont intéressants. En effet, si la plage de variation de vitesse est comprise entre plus ou moins 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance du glissement. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite

un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques. Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisagés et sont présentés [Poitier, 2003; Francois *et al.*, 2005; Moualdia, 2014; Merahi, 2014].

Tableau (1.1) : Modes opérationnels de la MADA.

		Modes	
		Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$
Régimes	Hypo-synchrone	$P_s > 0$	$P_s < 0$
	$P_s = -(P_m + P_r)$	$P_r < 0$	$P_r > 0$
	Hyper-synchrone	$P_s > 0$	$P_s < 0$
	$P_m = -(P_s + P_r)$	$P_r > 0$	$P_r < 0$

1.5. MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN BASEE SUR UNE MADA

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'arbre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'obtenir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement. On s'intéresse dans cette partie par la modélisation et les différentes stratégies de contrôle d'une turbine éolienne.

1.5.1. Description du système de conversion éolien

La Figure (1.8) présente une configuration classique de la turbine éolienne utilisant une MADA. La MADA est un générateur à rotor bobiné avec un système de balais et de bagues. Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseurs électroniques à bus continu intermédiaire.

La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associé au rotor. Afin d'obtenir des vitesses de rotation sous-synchrone et hyper-synchrone, la chaîne de conversion électronique associée au rotor doit être bidirectionnelle. Cela est effectué à partir d'un convertisseur back-to-back qui est constitué par deux convertisseurs de tension avec un bus continu en commun.

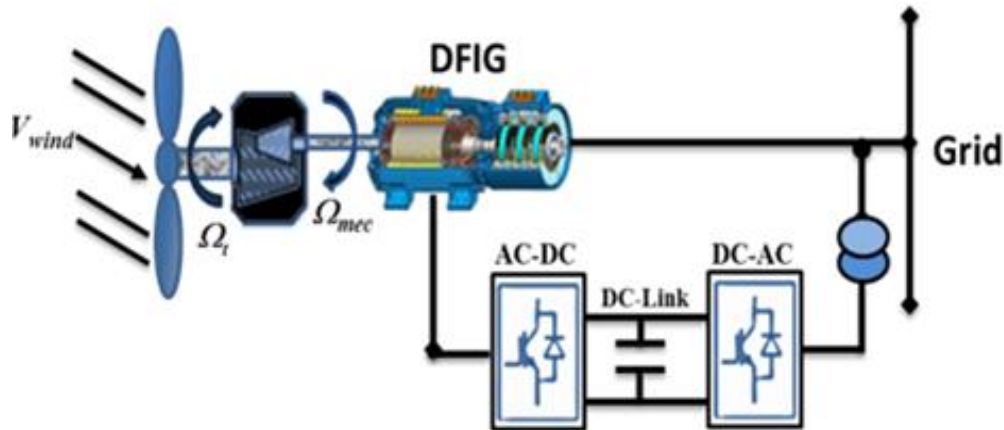


Figure (1.8) : Générateur éolien à base d'une MADA.

Le convertisseur de tension coté réseau est connecté à celui-ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques du courant. La partie mécanique de la turbine est composée par des pales orientables, un réducteur de vitesse et une transmission de puissance. La partie électrique est composée par un générateur, la chaîne de convertisseurs électronique de puissance avec son bus continu et son filtre de sortie.

1.5.2. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t , qui entraînera une génératrice (GADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

La Figure (1.9) montre le schéma d'une turbine éolienne.

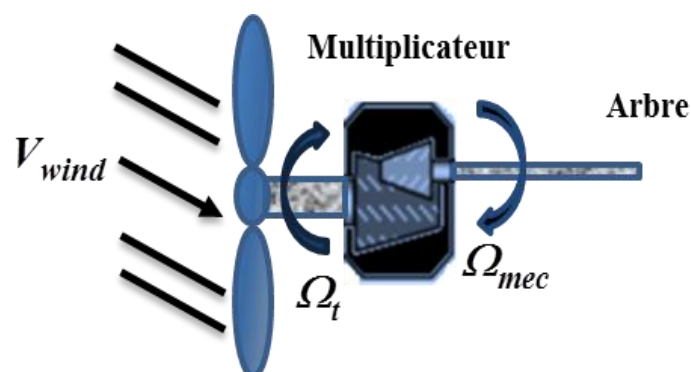


Figure (1.9) : Schéma synoptique d'une turbine éolienne.

a. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par [Abdeddaim et Bekta, 2013]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_w^3 \quad (1.1)$$

Le couple aérodynamique (C_{aero}) de la turbine est donné par:

$$C_{aero} = \frac{1}{2 \Omega_t} \rho S V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1.2)$$

La puissance aérodynamique (P_{aero}) apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit:

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S V_w^3}{2} \quad (1.3)$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V_w} \quad (1.4)$$

L'expression du coefficient de puissance est donnée par l'expression suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 \lambda_i^{-1} - C_3 \beta - C_4) e^{-C_5 \lambda_i^{-1}} + C_6 \lambda \quad (1.5)$$

Avec ;

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (1.6)$$

et $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$ et $C_6 = 0.0068$.

b. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne Ω_t (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice Ω_{mec} (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par un simple gain constant:

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (1.7)$$

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (1.8)$$

c. Modèle de l'arbre mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. L'hors de la conception aérodynamique des pales, nous considérons :

- a- que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé ;
- b- la vitesse de la turbine étant très faible ;
- c- les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice.

Dans le modèle mécanique utilisé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme illustre la Figure (1.10). Lorsque le modèle à une masse est ramené sur l'arbre rapide alors, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{J_t}{G} \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_t - \frac{f_t}{K} \Omega_{méc} \\ J_m \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{ém} - f_m \Omega_{méc} \end{cases} \quad (1.9)$$

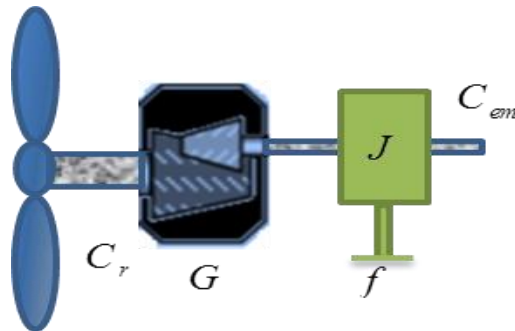


Figure (1.10) : Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide.

- J_t : représente le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne;
- f_t : est le coefficient dû aux frottements visqueux de la turbine;
- C_t : représente couple mécanique de la turbine éolienne;
- J_m : le moment d'inertie de la MADA;
- f_m : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA;
- $C_{méc}$: le couple mécanique sur l'arbre de la MADA;
- $C_{ém}$: est le couple électromagnétique de la MADA;

A partir l'équation (1.9) on peut écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par:

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{ém} - f \Omega_{méc} \quad (1.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} J = J_m + \frac{J_t}{G^2} \\ f = f_m + \frac{f_t}{G^2} \\ C_k = \frac{C_t}{G} \end{cases} \quad (1.11)$$

D'où, J , f et C_k représentent respectivement, l'inertie, le coefficient de frottements externes de la turbine et le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide.

La Figure (1.11) montre le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine. Sachant que, la vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice pour ce système.

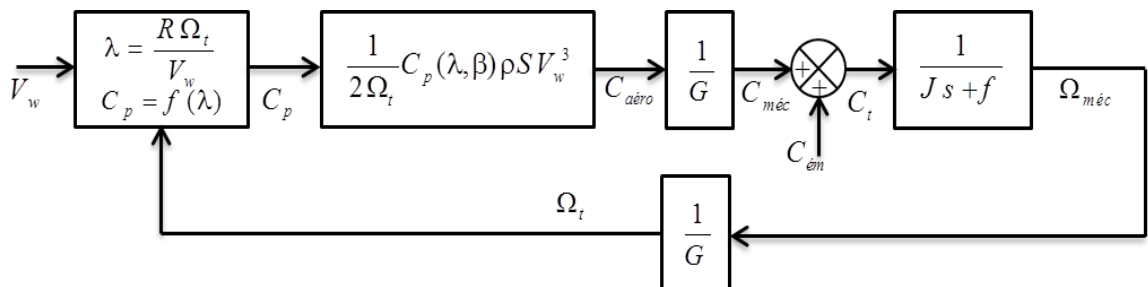


Figure (1.11) : Schéma bloc du modèle de la turbine.

1.5.3. Zones de fonctionnement de la MADA dans un système éolien

La caractéristique (puissance, vitesse) mesurée d'une éolienne à base de MADA se distingue par quatre zones principales de fonctionnement. La Figure (1.12) illustre les quatre zones [El-Aimani, 2004; Merahi, 2014]:

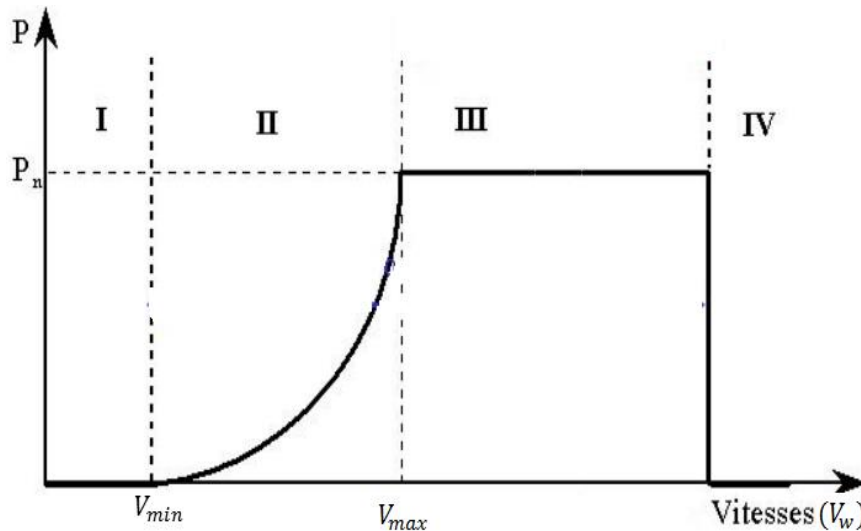


Figure (1.12) : Zones de fonctionnement d'une éolienne basée sur une MADA.

- a- **Zone I** : est la zone de démarrage de la génératrice. Elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{min} .
- b- **Zone II** : est la zone pour laquelle une extraction maximale de la puissance est réalisée en adaptant la vitesse de la génératrice. La vitesse mécanique est très variable et correspond à une grande plage de variation de la puissance électrique produite. L'angle de calage des pales est maintenu constant, et seul le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice est mis en œuvre dans cette zone.
- c- **Zone III**: correspond à une vitesse mécanique quasiment constante de la génératrice. Dans cette zone, la puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- d- **Zone IV** : correspond à la limitation de la puissance générée à sa valeur maximale grâce au contrôle de l'angle d'orientation des pales. Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne.

Dans notre cas, nous nous intéresserons au fonctionnement de la zone II et zone III. Dans la Zone II, il existe plusieurs techniques de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite (la terminologie MPPT).

1.5.4. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Le principe de cette stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la GADA doit être effectué, comme le montre la Figure (1.13).

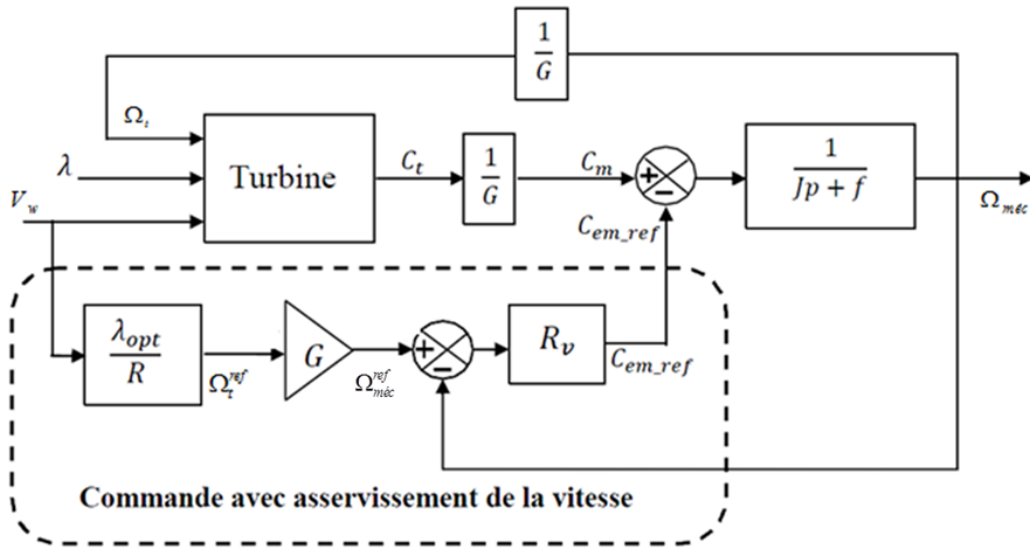


Figure (1.13): Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

Le couple électromagnétique de référence $C_{ém}$ permettant d'obtenir une vitesse de rotation $\Omega_{méc}$ égale à sa valeur de référence Ω_{min} . Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient C_p . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ_{est} égale à sa valeur optimale λ_{opt} , comme le montre la Figure (1.14).

La vitesse de rotation de référence de la turbine Ω_t^{ref} est obtenue par :

$$\Omega_t^{ref} = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \quad (1.12)$$

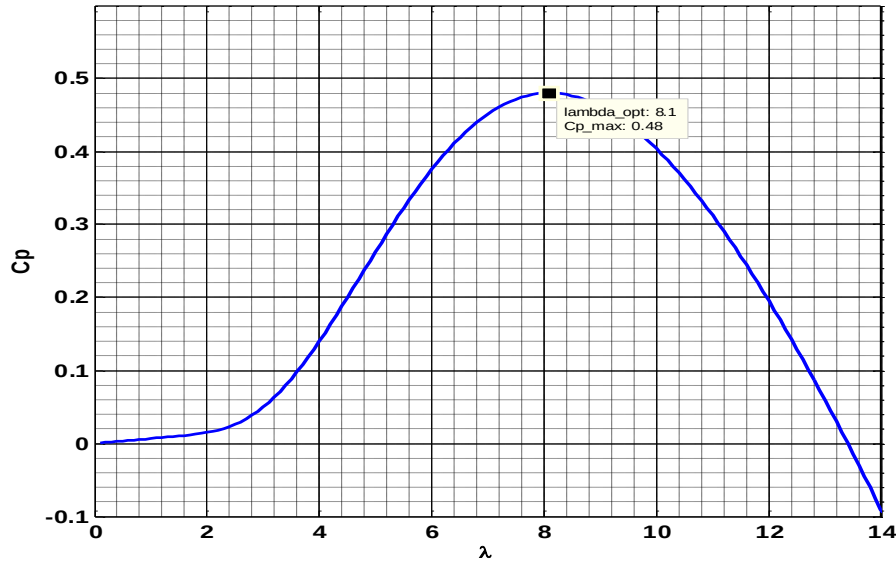


Figure (1.14) : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine.

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la génératrice en prenant en compte le gain du multiplicateur de vitesse par :

$$\Omega_{méc}^{ref} = G \Omega_t^{ref} \quad (1.13)$$

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation. Ce mode de contrôle est représenté à la section suivante. Il sera retenu dans la suite de nos travaux.

1.5.5. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient l'équation différentielle suivante [El-Aimani, 2004]:

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{ém} - f \Omega_{méc} = 0 \quad (1.14)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on peut écrire:

$$C_{ém} = f C_g \quad (1.15)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aéro} = C_p \frac{\rho S}{2\Omega_{t_est}} V_{w_est}^3 \quad (1.16)$$

$$V_{w_est} = \frac{\Omega_{t_est} R}{\lambda} \quad (1.17)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur C_{p_max} , qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p_max} et en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple électromagnétique de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{ém_ref} = \frac{C_{p_max}}{\lambda_{Cp_max}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \Omega_{méc}^2 \quad (1.18)$$

Si les caractéristiques mécaniques de la turbine sont connues et la vitesse est estimée, il est possible de déduire en temps réel la puissance mécanique optimale qui peut être générée en utilisant le MPPT.

La puissance mécanique optimale ($P_{méc_opt}$) peut être écrite comme suit :

$$P_{méc_opt} = \frac{C_{p_max}}{\lambda_{Cp_max}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{méc}^3}{G^3} \quad (1.19)$$

La Figure (1.15) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

Dans cette thèse, nous ne nous intéressons pas à la stratégie de la commande des convertisseurs, ainsi que le contrôle et la commande de l'éolienne, mais nous nous sommes plutôt intéressés au diagnostic de la partie électrique de la génératrice de l'éolienne.

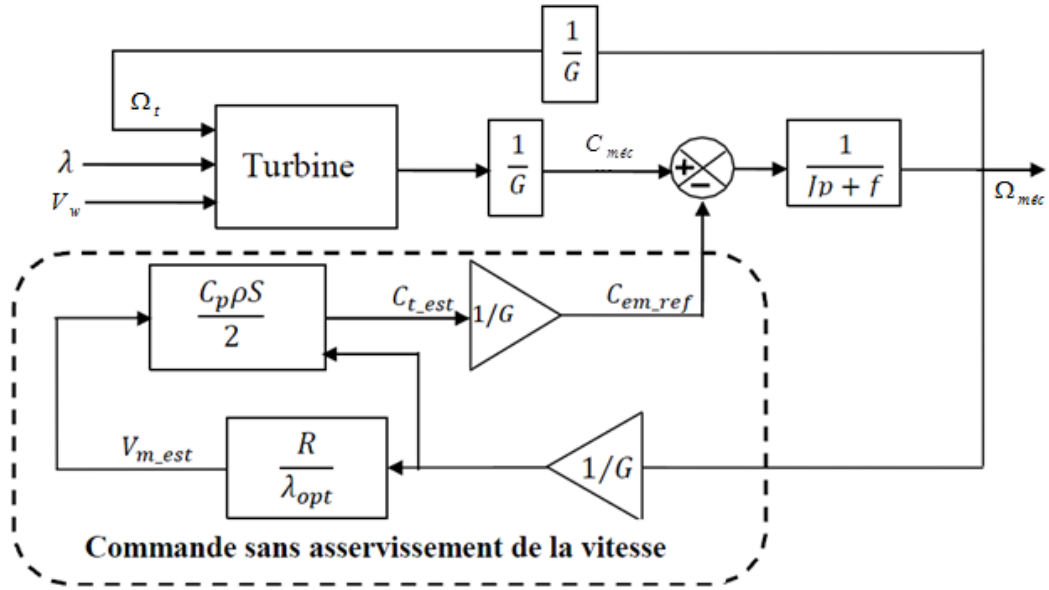


Figure (1.15) : Contrôle MPPT sans Asservissement de la vitesse mécanique.

1.6. GENERALITE SUR LES DEFAUTS AFFECTENT UN SYETEM EOLIEN

Vu l'importance de la GADA dans les systèmes éolienne modernes pour produire de l'énergie électrique. Cette dernière permet de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique pour fournir une alimentation d'une installation électrique. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, sa robustesse, sa puissance massique et son faible coût de maintenance s'accompagne par une complexité de son modèle d'état. Cependant, ces génératrices peuvent être affectées par des défauts internes (court-circuit entre spires d'enroulements) ou des défauts externes (creux de tension au niveau du réseau), pouvant altérer son bon fonctionnement en produisant des vibrations, bruits indésirables et réduisant sa durée de vie.

Pour cette raison, la sûreté de fonctionnement des génératrices devient un sujet très important et indispensable pour détecter les défauts et de les localiser, préalablement à toute action garantissant la continuité de service. Dans cette partie, nous présentons les différents types de défauts affectent le système éolien ainsi que la GADA, leurs origines et ses conséquences.

1.6.1. Différents types de défauts dans un système éolien

Une étude sur la répartition des défauts dans un système éolien de quatre parcs éoliens différents (deux parcs éoliens distincts de la Suède, de la Finlande, et une de l'Allemagne de

l'année 2006/2007) ont été élaborées par les auteurs [Bi *et al.*, 2014; Ribrant, 2006; Ribrant *et Bertling.*, 2007], comme le montre la Figure (1.16).

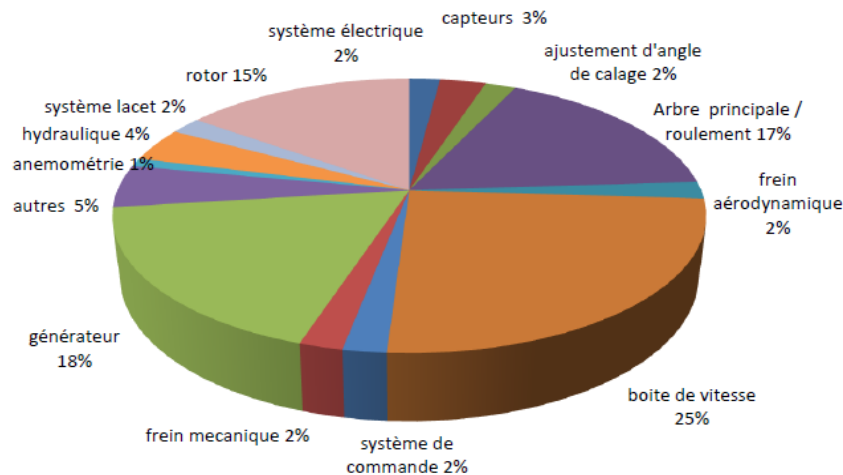


Figure (1.16) : Défauts d'un système éolien [Boudrim, 2015].

D'après cette étude, des défauts dans le générateur et l'arbre d'entraînement (boîte de vitesses, arbre principal et roulements) sont les défauts les plus cruciaux et largement observés, qui dominent plus de 60% des pannes dans les systèmes éoliens. Il est également connu que le défaut les plus fréquents dans les générateurs est le court-circuit entre spires d'enroulements. Il a été indiqué dans [Grubic *et al.*, 2008] que plus de 40% des défauts du générateur sont causés par ce type de défaut. Ce défaut est difficile à détecter, en particulier dans la phase initiale. Cependant, la non-détection des défauts de court-circuit peut conduire à des pannes catastrophiques et engendre des dégâts irréversibles au générateur.

1.6.2. Différents types de défauts qui affectent la GADA

Durant ces dernières années, l'intérêt porté à la GADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. Beaucoup de nouveaux parcs éoliens à grande puissance ont utilisé les GADA's pour la production d'électricité, qui offrent de nombreux avantages par rapport aux autres générateurs. En effet, cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Par ailleurs, les convertisseurs statiques utilisés pour le contrôle de cette machine peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une fraction de la puissance totale. Toutefois, cette machine est un système fortement non linéaire et complexe sujet à de nombreuses contraintes et défauts de différentes natures (thermiques,

électriques, mécaniques et d'environnement) qui peuvent dégrader son comportement, voir le déstabiliser [O'Donnell, 1985 ; Ceban, 2012].

D'autres classements des défauts d'après les auteurs [Casimir *et al.*, 2004 ; Al Kazzaz *et* Singh 2003], sont présentés, où les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique et entrefer mécanique). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans les figures (Figure (1.17) et Figure (1.18)).

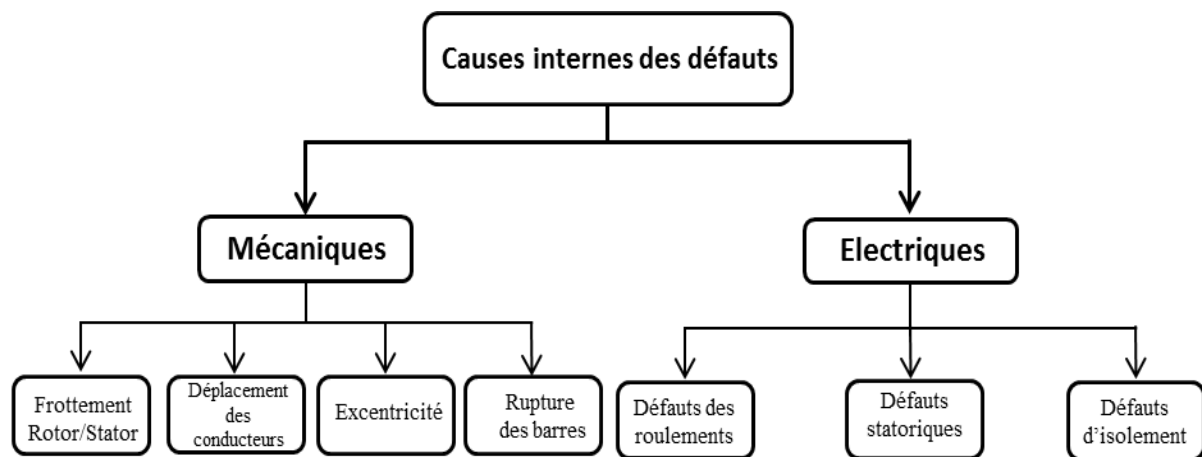


Figure (1.17): Causes internes des défauts de la machine asynchrone.

Une étude statistique récente faite par Bonnett [Bonnett *et* Yung, 2008] sur les machines asynchrones de grande puissance, a montré que les défauts majeurs sont distribués comme : 69% de pannes se situent sur les roulements, 21% au stator, 7 % au rotor et 3 % dans les autres régions de la machines (voir Figure (1.19)).

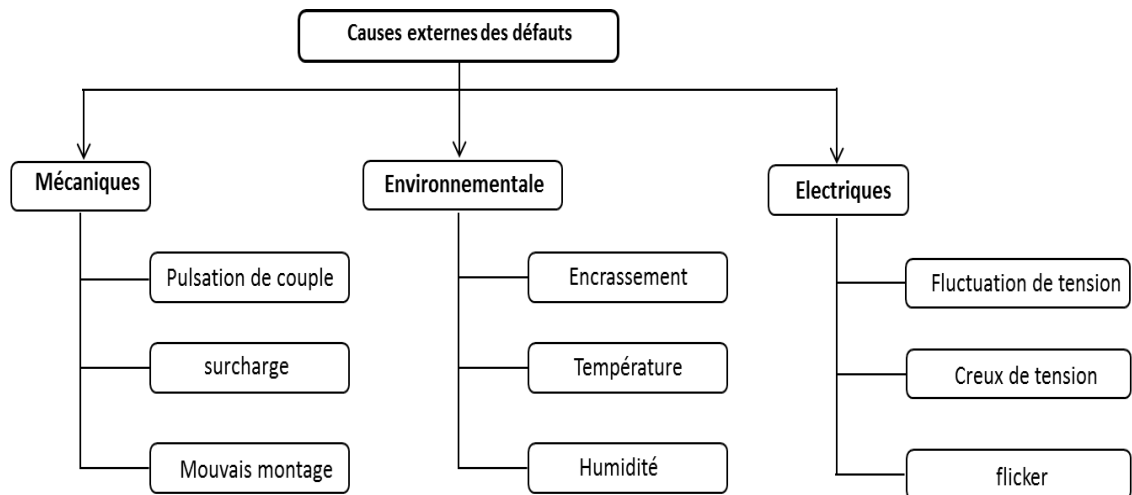


Figure (1.18): Causes externes des défauts de la machine asynchrone.

On voit sur la Figure (1.19) les défauts de la machine se divisent en quatre catégories :

- a- défauts statoriques ;
- b- défauts rotoriques ;
- c- défauts de roulement ;
- d- autres défauts.

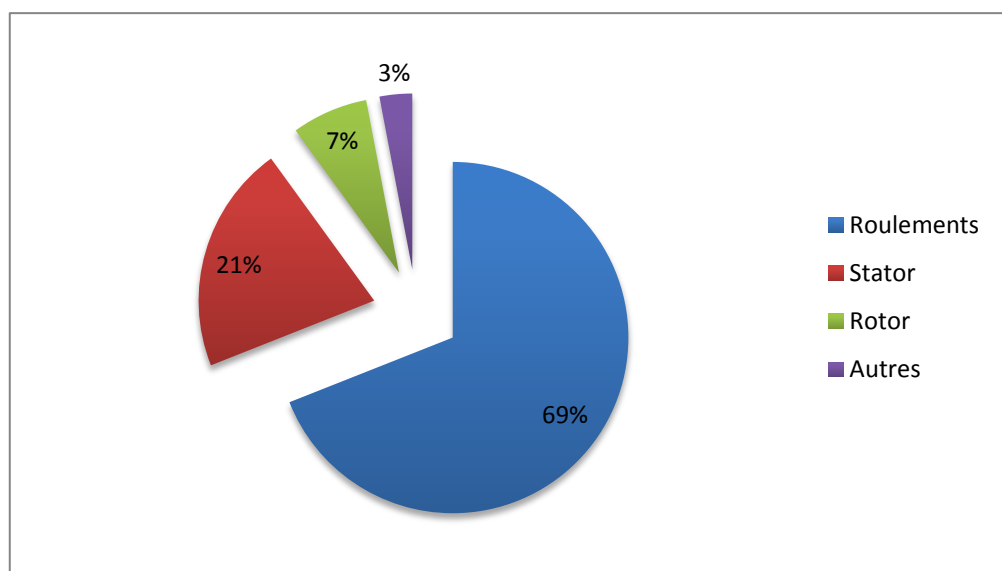


Figure (1.19) : pourcentage des défauts pendant une décennie [Bonnett et Yung, 2008].

1.6.2.1. Cause des défauts

Les causes des défauts sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [Vaseghi 2009]:

- a- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problème mécanique, rupture de fixation, problème d'isolation, survoltage d'alimentation, rupture de fixations, ...
- b- Les amplificateurs de défauts : survoltage fréquent, vibration mécanique, environnement humide, alimentation perturbé (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement,...
- c- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défaut de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.

1.6.2.2. Conséquences des défauts

Les défauts motionnés précédemment peuvent avoir de graves conséquences sur le comportement de la génératrice ainsi le système de conversion éolienne. L'évolution de la technologie et de l'électronique de puissance, a permis l'implantation des techniques de surveillance et de diagnostic de la génératrice. Cependant, plusieurs problèmes demeurent toujours présents soit au niveau de la génératrice elle-même ou bien au niveau des capteurs de courants de la génératrice. Parmi les défauts cités précédemment, nous trouvons aussi [Ouyessaad, 2014] :

- a- défauts systèmes, dus à la variation des paramètres de la génératrice;
- b- le fonctionnement en mode dégradé ;
- c- défauts liés aux capteurs ;
- d- défauts liés au réseau électrique.

La présence des défauts dans une génératrice d'une éolienne provoque des courts-circuits dans les composants électriques de la génératrice, qui peut s'aggraver et évoluer vers un endommagement et une dégradation totale de la génératrice, comme le montre la Figure (1.20). Ces défauts peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des défauts dans le stator et le rotor et occasionnent des pertes économiques considérables. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de surveillance et de diagnostic robuste pour détecter

de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines afin d'éviter les arrêts imprévus.



Figure (1.20): Conséquence des défaillances des génératrices des éoliennes [Ouyessaad, 2014].

Dans ce travail de thèse, nous nous concentrons sur l'étude des comportements de la GADA en présence de défauts capteur de courant causé par un court-circuit dans les spires statoriques dans une seule phase (a ou b), ainsi que deux phases statoriques (a et b). Dans les chapitres suivants, un modèle mathématique de la GADA soumis à ce type de défauts sera développé en se basant sur la technique multimodèles de type Takagi-Sugeno, et basé sur le modèle obtenu, le diagnostic et la commande tolérante aux défauts seront proposées dans les prochains chapitres.

1.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons d'abord défini l'aérogénérateur éolien, le principe de conversion de l'énergie éolienne ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur à vitesse variable. Ensuite, nous avons présenté les deux types aérogénérateurs à savoir les aérogénérateurs à axe vertical et celles à axe horizontal, puis passage en revue de ses avantages et ses inconvénients.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons présenté une description globale sur un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA, puis la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec cette machine. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité pour être exploité en simulation. Ensuite, nous avons montré les différentes zones de fonctionnement d'un aérogénérateur à base d'une GADA ainsi que les deux méthodes de

contrôle MPPT ont été présentées. Finalement, nous avons présente les scénarios des défauts d'un système éolien, ainsi que la GADA puis cité les différents types des défauts et ses causes suivies par les résultats statistiques des défauts cette dernière. Le chapitre suivant sera consacré principalement à la modélisation de la machine par multimodèle afin de pouvoir faire nos approches de diagnostic.

Chapitre 2

Modélisation et estimation d'états de la GADA par multimodèles de type T-S

2.1. INTRODUCTION

Les sciences de l'ingénieur font largement appel aux modèles non linéaires pour décrire les comportements dynamiques des systèmes physiques réels [Abbadi, 2013]. Si les modèles non linéaires sont en mesure de décrire correctement les comportements non linéaires d'un système, ils peuvent néanmoins s'avérer, en fonction de leur complexité mathématique, difficilement exploitables dans un contexte de synthèse d'une loi de commande et/ou de mise en place d'une stratégie de diagnostic du système. Il est alors possible d'envisager une étape de linéarisation du modèle non linéaire afin de réduire sa complexité mathématique et permettre d'utiliser des outils d'analyse et/ou de commande des systèmes linéaires. Cependant, cette hypothèse n'est vraie que pour les systèmes faiblement non linéaires [Hubert, 2008]. Par conséquent, le modèle linéarisé ne peut être considéré complètement représentatif du comportement global d'un système qui est dit complexe, couplé et fortement non linéaire tel que la GADA. Ce qui nous amène à rechercher un modèle apte à donner une bonne caractérisation globale du comportement dynamique du système, tout en permettant une utilisation aisée des techniques d'analyse et de commande des systèmes linéaires. Afin de répondre à ces attentes, de nouvelles techniques de modélisation ont vu le jour. Parmi elle, figure l'approche multimodèle de type T-S.

La technique multimodèle se révèle être une technique efficace pour la modélisation des systèmes non linéaires relativement complexes [Murray-Smith *et* Johansen, 1997; Leith *et* Leithead, 1999]. Dans la littérature plusieurs terminologies équivalentes sont utilisées pour définir ce type de modèles : multimodèle [Murray-Smith *et* Johansen, 1997; Leith *et* Leithead, 1999], modèle linéaire polytopique [Angelis, 2001], modèle flou de Takagi-Sugeno [Takagi *et* Sugeno, 1985].

L'idée de cette approche est l'approximation du comportement non linéaire d'un système par un ensemble de modèles locaux caractérisant le comportement du système dans différentes zones de fonctionnement. Ces modèles permettent de représenter d'une façon exacte et précise les systèmes non linéaires. Ils ont une structure simple présentant des propriétés intéressantes les rendant facilement exploitables du point de vue mathématique et permettant l'extension de certains résultats du domaine linéaire aux systèmes non linéaires. L'avantage majeur de cette technique réside dans sa simplicité, ainsi l'interpolation s'effectue à l'aide de fonctions de pondération non linéaires qui vérifient la propriété de somme convexe [Tanaka *et* Wang, 2001].

Le but de ce chapitre est de développer un modèle mathématique de la GADA par l'approche multimodèles de type T-S. Dans un premier temps, nous décrirons le modèle non

linéaire de la GADA. Ensuite, nous exposons tout d'abord la méthode d'approximation du modèle non linéaire de la dynamique de la GADA par un multimodèle de type T-S à deux modèles locaux. L'approche multimodèle de type T-S sera utilisée pour représenter le comportement de la GADA, qui en fait est un système multivariable fortement non linéaire et très couplé. Le multimodèle de T-S obtenu après une transformation polytopique à base de l'approche par secteur non linéaire. Elle permet d'obtenir une forme multimodèle équivalente au modèle non linéaire initial de la GADA, évitant ainsi une perte d'information par rapport à ce dernier. Le multimodèle développé sera exploité par la suite, pour l'observation d'états de la GADA ou pour construire un système de diagnostic et de commande tolérante aux défauts à base d'observateurs.

2.2. GENERALITES SUR LES MULTIMODELES (MM)

Dans le cadre de la modélisation par multimodèles de type T-S, il est indispensable de définir : les termes les plus souvent utilisées dans la description d'un multimodèle, le choix de la structure et la méthode d'obtention du multimodèle.

2.2.1. Terminologies et définitions

- a- Espace de fonctionnement:** est un espace vectoriel à l'intérieur duquel les variables d'un système évoluent.
- b- Fonction d'activation:** est une fonction, notée en général $\mu_i(z(t)) : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$, qui dépend des variables internes et/ou externes du système non-linéaire. Ces fonctions sont choisies en général de façon à vérifier la propriété de somme convexe suivante [Tanaka et Wang, 2001]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1 \\ 0 \leq \mu_i(z(t)) \leq 1 \end{cases} \quad \forall i = \{1, \dots, r\} \quad (2.1)$$

- c- Variables de prémisse** (variables de décision $z(t)$): est une variable vectorielle caractéristique du système qui peut être mesurable ou non mesurable. Elle peut être par exemple une variable d'état ou un signal de commande du système.
- d- Sous-modèle :** est un modèle généralement simple de structure quelconque, mais souvent linéaire et/ou affine, qui représente le comportement du système non linéaire dans une zone de fonctionnement spécifique.

e- **Zone de fonctionnement** : est un domaine issu du partitionnement de l'espace de fonctionnement du système.

Le multimodèle est basé sur la décomposition du comportement dynamique du système en plusieurs zones de fonctionnement (Figure (2.1)), chaque zone étant caractérisée par un sous-système. En fonction de la zone où le système évolue, chaque sous-système contribue plus ou moins à l'approximation du comportement global du système. En général, le système présente un comportement dynamique homogène à l'intérieur d'une zone de fonctionnement. Ainsi, la contribution de chaque sous-système au modèle global, qui est une combinaison convexe des sous-systèmes, est définie par une fonction de pondération.

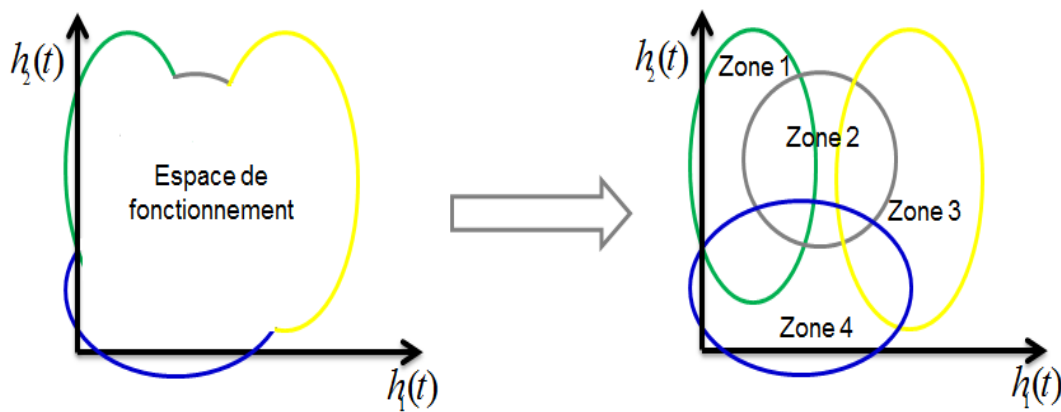


Figure (2.1) : représentation multimodèle.

2.2.2. Structures des multimodèles

Dans le contexte de modélisation sous forme multimodèles, deux grandes familles de multimodèles sont répertoriées selon que les sous-modèles sont homogènes dans le sens où ils partagent la même structure et le même espace d'état ou hétérogènes, c-à-d. que leur structure et leur espace d'état diffèrent. Deux structures essentielles de multimodèles peuvent être distinguées [Orjuela *et al.*, 2007]:

- a- **Multimodèle de T-S** : est constituée de sous-modèles partageant un vecteur d'état unique (sous modèles homogènes).
- b- **Multimodèle découplé** : les sous-modèles possèdent chacun un vecteur d'état indépendant (sous-modèles hétérogènes).

2.2.2.1. Multimodèles de Takagi-Sugeno (T-S)

Le modèle flou Takagi et Sugeno (T-S) [Takagi et Sugeno, 1985] est décrit par des règles "**Si-alors**" qui représentent des modèles Linéaires à Temps Invariant (LTI). Ainsi, tout modèle flou T-S d'un système non linéaire est structuré comme une interpolation de systèmes linéaires. Il est prouvé que les modèles flous T-S sont des approximateurs universels [Buckley, 1992 ; Castro, 1995]. Un modèle flou de type T-S utilise des règles comme suite [Tanaka et Wang, 2001; Takagi et Sugeno, 1985]:

La $i^{ème}$ règle du modèle flou s'écrit:

Si $z_1(t)$ est F_{i1} , Et..., Et $z_p(t)$ est F_{ip}

$$\text{Alors : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}, \forall i = \{1, \dots, r\} \quad (2.2)$$

Où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $\forall i = \{1, \dots, r\}$, r est le nombre de règles, F_{ij} sont les fonctions d'appartenance des ensembles flous, $j = \{1, \dots, p\}$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ est la matrice de commande, et $C_i \in \mathbb{R}^{q \times n}$. $z_1(t), \dots, z_p(t)$ sont les variables des prémisses qui représentent les termes non-linéaires.

Alors, le modèle global est défini comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \end{cases} \quad (2.3)$$

Chaque règle est attribué un poids $w_i(z(t))$ qui dépend du vecteur $z(t) = [z_1(t), \dots, z_p(t)]$ et du choix de l'opérateur logique. L'opérateur "et" est souvent choisi comme étant le produit, d'où :

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_{ij}(z_j(t)), \forall i = 1, \dots, r; w_i(z(t)) \geq 0, t \geq 0 \quad (2.4)$$

En posant,

$$\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^M w_i(z(t))} \quad (2.5)$$

Donc, le modèle T-S (2.3) s'écrit sous la forme [Tanaka et Wang, 2001; Takagi et Sugeno, 1985]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

La fonction $\mu_i(z(t))$ dite d'activation détermine le degré d'activation du i^{me} modèle local associe. Selon la zone ou évolue le système, cette fonction indique la contribution plus ou moins importante du modèle local correspondant dans le modèle global. Elle assure un passage progressif de ce modèle aux modèles locaux voisins. Ces fonctions dépendent généralement du vecteur d'état $x(t)$.

2.2.2.2. Multimodèles découplés

Une autre forme de multimodèles, proposée par [Filev, 1991], résulte de l'agrégation de modèles locaux décrits d'une façon découplée. La différence entre cette structure et celle présentée au paragraphe précédent réside dans le fait que chaque modèle local est indépendant de tous les autres (2.7) [Filev, 1991]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + E_i u(t) + N_i \end{cases} \quad (2.7)$$

Dans cette structure, la notion d'état local, correspondant à un domaine de fonctionnement, apparait beaucoup clairement.

Le multimodèle (modèle global) est ainsi donné par [Filev, 1991]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i \\ y_i(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(C_i x_i(t) + E_i u(t) + N_i) \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3. TECHNIQUES D'OBTENTION D'UN MODÈLE FLOU DE T-S

Ces dernières années, l'approche multimodèle de type T-S a connu un grand essor [Ying, 1998; Haiping *et* Zhang, 2008 ; Ning *et al.*, 2004 ; Georgieva *et al.*, 2001]. A cause de ses propriétés d'approximation universelle, cette approche se base sur l'appréhension du comportement non linéaire d'un système par un ensemble de modèles locaux caractérisant le comportement du système dans différentes zones de fonctionnement. En effet, les multimodèles s'écrivent sous forme d'interpolation entre des modèles LTI valide dans une zone de fonctionnement. Il s'agit d'une représentation polytopique. Trois techniques peuvent être employées pour l'obtention d'un multimodèle par identification, linéarisation et secteur non linéaire [Oudghiri, 2008].

2.3.1. Technique par identification

Cette technique permet, à partir des données sur les entrées et les sorties, d'identifier les paramètres du modèle local correspondant aux différents points de fonctionnement. Cette technique se justifie principalement lorsqu'une représentation analytique du système à partir des lois de la physique est inconnue ou complexe [Hou *et al.*, 2010]. En général, le problème de l'identification des systèmes non linéaires est réduit à l'identification des sous-systèmes définis par des modèles locaux linéaires et des fonctions d'activation. Des méthodes d'optimisation numérique sont alors utilisées pour estimer ces paramètres.

La forme générale d'un multimodèle décrivant un système dynamique non linéaire continu dans le temps est définie sous la forme suivante [Takagi *et* Sugeno, 1985]:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (2.9)$$

Où, $z(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur des variables de décision et $\mu_i(\cdot)$ sont les fonctions d'activation. Elles déterminent le degré d'activation du i^{me} modèle local associé.

Généralement la construction d'un multimodèles à partir des entrées/sorties exige :

- a- le choix de la structure de multimodèles et des fonctions d'appartenance ;
- b- l'estimation des paramètres des fonctions d'activation et des modèles locaux ;
- c- l'évaluation des performances du multimodèle.

Pour l'estimation des paramètres, plusieurs méthodes d'optimisation numérique peuvent être utilisées, selon les informations disponibles a priori. Elles sont généralement basées sur la minimisation d'une fonction de l'écart entre la sortie estimée du multimodèles ($y_m(t)$) et la sortie mesurée du système ($y(t)$). Le critère le plus utilisé est le critère qui représente l'écart quadratique entre les deux sorties indiquées.

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta)^2 = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (y_m(t) - y(t))^2 \quad (2.10)$$

Où N est l'horizon d'observation et θ est le vecteur de paramètres des modèles locaux et ceux des fonctions d'activation.

Les méthodes de minimisation du critère $J(\theta)$ s'appuient sur un développement limité du critère $J(\theta)$ autour d'une valeur particulière du vecteur de paramètres et d'une procédure itérative de modification progressive de la solution. Si l'on note k l'indice d'itération de la méthode de recherche et $\mu(\theta)$ la valeur de la solution à l'itération k , la mise à jour de l'estimation s'effectue de la manière suivante :

$$\theta(k+1) = \theta(k) - \eta D(k) \quad (2.11)$$

Où η représente un facteur d'ajustement permettant de régler la vitesse de convergence vers la solution. $D(k)$ est la direction de recherche dans l'espace paramétrique. Selon la façon dont $D(k)$ est calculée, on distingue différentes méthodes d'optimisation numérique dont les principales sont : Levenberg-Marquardt, Gradient, Newton, Gauss-Newton, ...etc

2.3.2. Technique par linéarisation

La seconde technique consiste à linéariser le modèle autour d'un ensemble de points de fonctionnement choisis judicieusement. Le système non linéaire peut être représenté par un ensemble de modèles où chaque modèle local est un système linéaire à temps invariant valide autour d'un point de fonctionnement ou défini dans une zone de fonctionnement caractérisée par un changement de mode dû à un événement interne.

Dans le cas où l'on dispose d'un modèle non linéaire du processus, ce passage n'est pas unique en fait, car les modèles locaux peuvent être obtenus par linéarisation autour de plusieurs points de fonctionnements [Chadli, 2002].

Considérons le système non linéaire suivant [Murray-Smith et Johansen, 1997]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) \\ y(t) = G(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (2.12)$$

Où $(F, G) \in \mathbb{R}^{2n}$ sont des fonctions non linéaires continues, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état et $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande.

Par la suite, nous représenterons le système non linéaire (2.12) par un multimodèles, compose de plusieurs modèles locaux linéaires ou affines obtenus en linéarisant le système non linéaire autour d'un point de fonctionnement arbitraire $(x_i, u_i) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ [Johansen et Foss, 1993 ; Murray-Smith et Johansen, 1997; Gasso, 2000; Hamdi, 2012]:

$$\begin{cases} \dot{x}_m(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x_m(t) + B_i u(t) + D_i) \\ y_m(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(C_i x_m(t) + E_i u(t) + N_i) \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec :

$$A_i = \left. \frac{\partial F(x, u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad (2.14)$$

$$B_i = \left. \frac{\partial F(x, u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad (2.15)$$

$$C_i = \left. \frac{\partial G(x, u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad (2.16)$$

$$E_i = \left. \frac{\partial G(x, u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad (2.17)$$

$$N_i = G(x_i, u_i) - C_i x - E_i u \quad (2.18)$$

$$D_i = F(x_i, u_i) - A_i x - B_i u \quad (2.19)$$

Notons que dans ce cas, le nombre de modèles locaux (r) dépend de la précision de modélisation souhaitée, de la complexité du système non linéaire et du choix de la structure des fonctions d'activation. Un choix adéquat du nombre des points de fonctionnements paraît alors nécessaire pour réaliser un compromis entre la représentation multimodèle d'un système non linéaire et la charge de calcul.

2.3.3. Technique de découpage par secteurs non-linéaires

La troisième, désignée par la technique de découpage par secteurs non linéaires est adaptée pour les systèmes non linéaires complexes [Tanaka et Wang, 2001; Ohtake *et al.*, 2001]. L'avantage de cette approche est de ne pas engendrer d'erreur d'approximation et de réduire le nombre de modèles locaux par rapport à la méthode de linéarisation. Cette technique de transformation exposée a été initiée par Tanaka et al [Wang *et al.*, 1996 ; Tanaka *et al.*, 1996]. Elle est basée sur une transformation des fonctions scalaires origines du non linéarité.

Considérons le cas général d'un système continu non linéaire :

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x)u(t) \quad (2.20)$$

Avec, $f(x(\cdot)) \in \mathbb{R}^n$ et $g(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$.

Lemme1 : soit $h(x(t))$ une fonction bornée de $[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ pour tout $x \in [a, b]$ avec $(a, b) \in \mathbb{R}^2$. Alors il existe deux fonctions :

$$\begin{aligned} F^i(\cdot) : [a, b] &\rightarrow [0, 1], i \in I_2 \\ x(t) &\rightarrow F^i(x(t)) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Avec $F^1(x(t)) + F^2(x(t)) = 1$ et deux scalaires α et β tels que

$$h(x(t)) = F^1(x(t))\alpha + F^2(x(t))\beta \quad (2.22)$$

Une décomposition de $h(x(t))$ est considérée sur $[a, b]$ comme suivant :

$$\alpha = \min_{x \in [a, b]}(h(x)) \quad \text{et} \quad \beta = \max_{x \in [a, b]}(h(x)) \quad (2.23)$$

$$F^1(x(t)) = \frac{h(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta} \text{ et } F^2(x(t)) = \frac{\alpha - h(x(t))}{\alpha - \beta} \quad (2.24)$$

Sous l'hypothèse de la continuité et la bornitude des fonctions $f(x(t))$ et $g(x(t))$ données en (2.20) avec $f(0) = 0$ et $g(0) = 0$, ces fonctions peuvent être réécrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} f(x(t)) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) A_i x(t) \\ g(x(t)) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (2.25)$$

Le modèle (2.20) devient:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) (C_i x(t) + D_i u(t)) \end{cases} \quad (2.26)$$

Dans ce cas, le multimodèle (2.26) obtenu représente de façon exacte le modèle non linéaire (2.20) sur l'intervalle compact considéré.

Dans la suite de cette thèse, l'intérêt est porté sur la troisième technique, puisqu'elle présente des avantages par rapport aux autres techniques :

- du point de vue précision et connaissance des fonctions d'appartenance assurant l'interconnexion des modèles locaux LTI ;
- de minimiser l'erreur lors du passage du modèle analytique non linéaire au modèle T-S,
- d'optimiser le nombre de modèles locaux ;

Il convient de souligner qu'il peut s'avérer difficile de trouver un secteur global pour un système non linéaire quelconque. Dans ce cas, il est nécessaire de considérer un secteur non linéaire local.

Les Figures (2.2) et (2.3) représentent respectivement les secteurs non linéaires global et local.

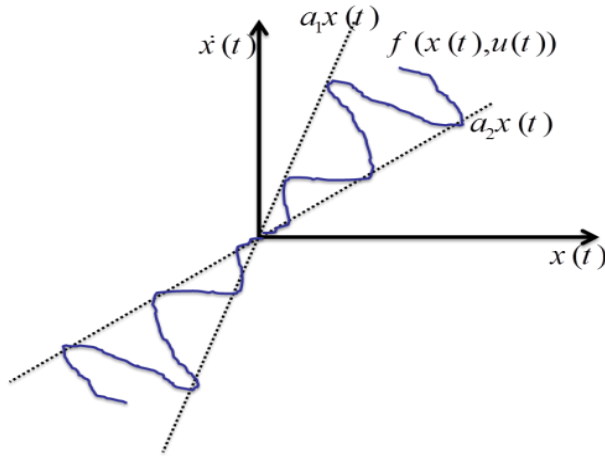


Figure (2.2) : Secteur non linéaire global.

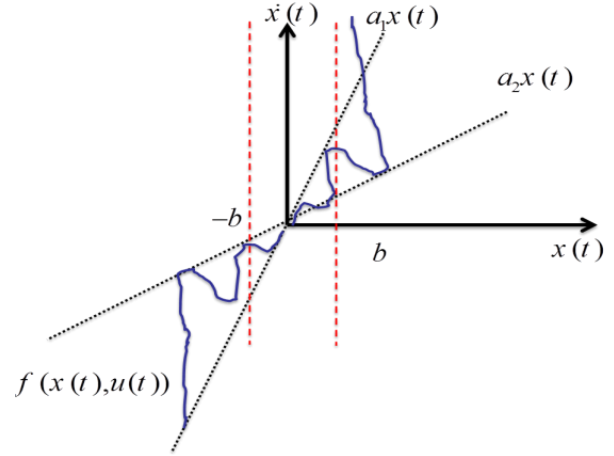


Figure (2.3) : Secteur non linéaire local.

Dans le travail présenté dans ce chapitre, nous allons utiliser la technique de découpage par secteurs non linéaires qui consiste, à partir d'un modèle non linéaire de la GADA, à obtenir un modèle T-S qui représente exactement le comportement du modèle non linéaire de la GADA dans un compact de l'espace d'état.

2.4. STABILITE DES SYSTEMES REPRESENTES PAR MULTIMODELES

La stabilité des multimodèles a été traitée dans divers travaux de recherches [Kardous, 2004 ; Chadli, 2002]. Elle dépend de l'existence d'une matrice commune, symétrique et définie positive, qui garantit la stabilité de tous les modèles locaux. Les conditions de stabilité peuvent être exprimées sous forme des LMIs.

2.4.1. Stabilité quadratique

Soit le système décrit par le multimodèle suivant [Hamdi, 2012]:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) A_i x(t) \quad (2.27)$$

Avec,

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1 \\ \mu_i(z(t)) \geq 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

Pour définir les conditions de stabilité quadratique pour le multimodèle défini par l'équation (2.27), le théorème suivant donne les conditions sous LMI pour garantir la stabilité quadratique de ce dernier.

Théorème 2.1 : *le multimodèle (2.27) est asymptotiquement stable s'il existe une matrice P symétrique et définie positive telle que les LMI suivantes sont vérifiées [Boyed, 1994]:*

$$A_i^T P + P A_i < 0, \forall i \in \{1, \dots, r\} \quad (2.29)$$

Ce théorème offre une condition suffisante pour assurer la stabilité asymptotique du multimodèle (2.27). L'inégalité matricielle (2.29) peut être résolue en utilisant des outils numériques LMI. Ce résultat est obtenu en dérivant, le long de la trajectoire du multimodèle (2.27), la fonction de Lyapunov $V(x(t)) = x^T(t) P x(t)$.

L'existence de la matrice de Lyapunov P dépend de deux conditions :

- La première est liée à la stabilité de tous les modèles locaux. Il est nécessaire que chaque matrice A_i pour $i \in \{1, \dots, r\}$ à des valeurs propres dans le demi-plan gauche du plan complexe.
- La deuxième condition est relative à l'existence d'une fonction de Lyapunov commune aux r modèles locaux.

2.4.2. Stabilité relaxée

Dans le paragraphe précédent, le Théorème 2.1 est utilisé pour étudier la stabilité du multimodèle (2.27). Il permet d'élaborer des conditions suffisantes mais pas nécessaires. Dans certains cas, ce résultat se montre très conservatif. En effet, le défaut majeur réside dans l'obligation de satisfaire r inégalités linéaires matricielles vis-à-vis de la même matrice P . C'est la raison pour laquelle certains systèmes sont stables alors qu'il n'existe pas de matrices symétrique définie positive commune [Hamdi, 2012].

Pour surmonter ce problème, de nombreux travaux ont été développés afin d'établir des conditions de stabilité relaxant certaines des contraintes précédentes. Par exemple, Johansen et al [Johansen *et al.*, 1998] considèrent une fonction de Lyapunov quadratique par morceaux. Jadbabaie [Jadbabaie, 1999] utilise une fonction de Lyapunov non quadratique. En utilisant la technique de Lyapunov et la formulation LMI, Chadli *et al* [Chadli, 2000 ; Chadli, 20001] ont également établi des conditions suffisantes de stabilité asymptotique du multimodèle (2.27). Afin de réduire le conservatisme de l'approche quadratique, Chadli *et al* [Chadli, 2002] ont présenté

d'autres conditions de stabilité en utilisant des fonctions de Lyapunov non quadratiques de la forme :

$$V_i(x(t)) = x^T(t)P_i x(t), \forall i \in \{1, \dots, r\} \quad (2.30)$$

$$V(x(t)) = \max(V_1(x(t)), \dots, V_r(x(t))) \quad (2.31)$$

Où P_i sont des matrices symétriques et définies positives. Le théorème 2.2 suivant est un des principaux résultats obtenus dans ce sens.

Théorème 2.2 [Chadli, 2002] : *supposons qu'il existe des matrices symétriques et définies positives P_i pour $i \in \{1, \dots, r\}$ et des scalaires positifs τ_{ijk} , vérifiant les inégalités suivantes :*

$$A_i^T P_j + P_j A_i + \sum_{k=1}^M \tau_{ijk} (P_j - P_k) < 0 \quad \forall i, j \in \{1, \dots, r\} \quad (2.32)$$

Alors le multimodèle (2.27) est globalement asymptotiquement stable.

2.5. MODELE MATHEMATIQUE DE LA GADA

Dans cette partie, avant de dériver le modèle mathématique de la GADA (Figure 2.4), certaines hypothèses ont été formulées :

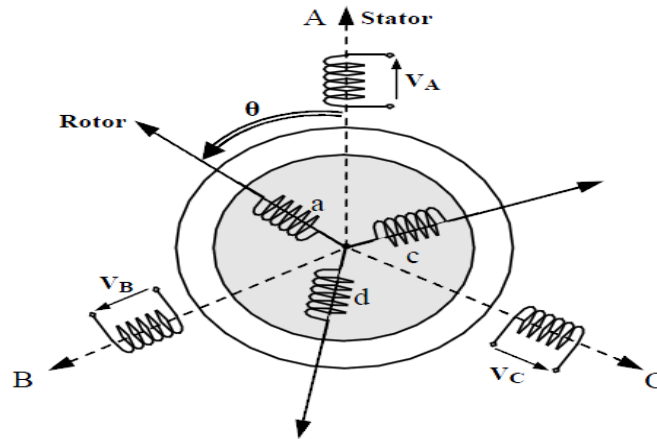


Figure (2.4) : Représentation schématique d'une GADA.

- a- les inductances propres sont constantes ;
- b- les résistances sont considérées comme constantes ;

- c- la machine à une parfaite symétrie de construction ;
- d- la construction mécanique est parfaitement équilibrée ;
- e- l'effet d'encochage ainsi que l'effet de peau sont négligeables ;
- f- un même nombre des phases entre le stator et le rotor ;
- g- un entrefer constant et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- h- les forces magnétomotrices sont à répartition sinusoïdales, il y a symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements ;

Les équations électriques et magnétiques dans le repère triphasé (abc) sous forme matricielle sont données par [Chatelain, 1987]:

$$\begin{cases} [u_s]_{abc} = [R_s]_{abc} [i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_{abc} \\ [u_r]_{abc} = [R_r]_{abc} [i_r]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_{abc} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} [\Phi_s]_{abc} = [L_s] [i_s]_{abc} + [L_{sr}] [i_r]_{abc} \\ [\Phi_r]_{abc} = [L_r] [i_r]_{abc} + [L_{rs}]^T [i_s]_{abc} \end{cases} \quad (2.34)$$

Avec:

$$[R_{s(r)}] = \begin{bmatrix} R_{s(r)} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s(r)} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s(r)} \end{bmatrix} \quad [L_{s(r)}] = \begin{bmatrix} L_{s(r)} & L_{sr(rs)} & L_{sr(rs)} \\ L_{sr(rs)} & L_{s(r)} & L_{sr(rs)} \\ L_{sr(rs)} & L_{sr(rs)} & L_{s(r)} \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr(rs)}] = [L_{rs(sr)}]^T = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En désignant par :

- $[u_s]_{abc} = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$ et $[u_r]_{abc} = [u_{ra} \ u_{rb} \ u_{rc}]^T$: vecteur des tensions statoriques et rotoriques.
- $[i_s]_{abc} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ et $[i_r]_{abc} = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

- $[\Phi_s]_{abc} = [\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T$ et $[\Phi_r]_{abc} = [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques.
- $[L_s]_{abc}$ $[L_r]_{abc}$ et $[L_{sr(rs)}]_{abc}$: matrices d'inductance statorique, rotorique et mutuelle :
- $R_s(r)$: résistance d'une phase statorique (rotorique).
- $L_s(r)$: inductance propre d'une phase du stator (rotor).
- $L_{sr(rs)}$: inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotoriques).
- θ : angle électrique entre les axes de la phase du rotor et du stator (position du rotor).
- Où les indices "s" et "r" désignent le stator et le rotor.

2.5.1. Modèle non linéaire dans le repère de Park

La transformation de Park permet de faire correspondre au système réel triphasé d'axes (abc) à un système biphasé équivalent, du point de vue électrique et magnétique, disposé selon deux axes (dq) lié au champs tournant ou ($\alpha\beta$) lié au stator représentés par la Figure (2.5). Cette transformation triphasée-biphasée se résume à:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Où les indices (a), (b) et (c) désignent la phase (a), (b) et (c).

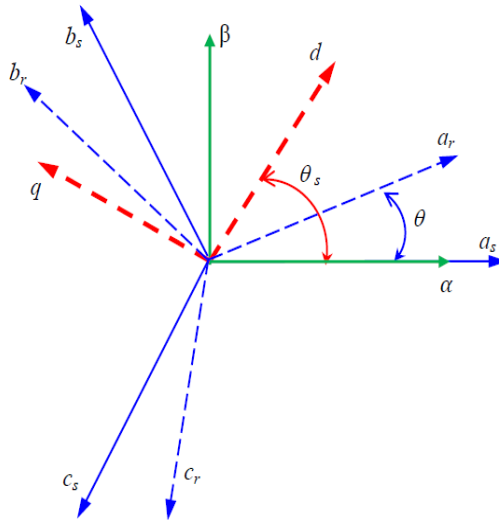


Figure (2.5) : Référentiels: triphasés (abc), biphasé fixe ($\alpha\beta$) et biphasé (dq) tournant.

La matrice de transformation de référence ($\alpha\beta$) vers référence (abc) est donnée par l'expression suivante:

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$[x_a \ x_b \ x_c]^T$ représente les grandeurs de chaque phase de la machine. La matrice de transformation inverse est donnée par $T_{32}^{-1} = T_{32}^T$ à cause de l'ortho-normalité de T_{32} .

Avec :

- (a_s, b_s, c_s) les axes du repère lié au stator.
- (a_r, b_r, c_r) les axes du repère lié au rotor.
- θ_s l'angle instantané entre la phase de l'axe a_s et le champs tournant.

Afin d'exprimer toutes les grandeurs dans un même repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont projetées dans un repère tournant (dq) décalé de θ_s par rapport au repère fixe ($\alpha\beta$). Cette transformation se fait à partir de la matrice de rotation $T_{dq}(\zeta)$ [Benderradji, 2013].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = T_{dq}(\zeta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad T_{dq}(\zeta) = \begin{bmatrix} \cos(\zeta) & \sin(\zeta) \\ -\sin(\zeta) & \cos(\zeta) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Où ζ : est l'angle entre le repère des grandeurs à transformer et le repère choisi de rotation ζ .

- pour les grandeurs statoriques, on prend : $\zeta = \theta_s$
- pour les grandeurs rotoriques, on prend : $\zeta = \theta_s - \theta = \theta_r$.

Dans le cas où le neutre de la machine n'est pas connecté, les composantes homopolaires sont nulles. Alors, les équations électriques de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère de Park sont écrites comme suit [Ghennam et Berkouk, 2010; Aouzellag et al., 2009].

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.38)$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \text{ et } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.39)$$

Où ω_r est la pulsation mécanique du rotor, et ω_s est pulsation de l'alimentation statorique.

Les flux du stator et du rotor peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2.40)$$

2.5.2. Modèle non linéaire dans le repère ($\alpha\beta$)

Le modèle suivant est obtenu en manipulant sur les équations de différentes tensions (2.38) et flux (2.40), on obtient les équations simplificatrices de la dynamique d'une GADA qui peuvent s'écrire de la manière suivante [Abdelmalek *et al.*, 2015(a)-(d)]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_s}{\sigma L_s} x_1 + (\omega_s + \frac{L_m^2 P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_s L_r}) x_2 + \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} x_3 + \frac{L_m P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_s} x_4 + \frac{1}{\sigma L_s} u_1 - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_3 \\ \dot{x}_2 = -(\omega_s + \frac{L_m^2 P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_s L_r}) x_1 - \frac{R_s}{\sigma L_s} x_2 - \frac{L_m P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_s} x_3 + \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} x_4 + \frac{1}{\sigma L_s} u_2 - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_4 \\ \dot{x}_3 = -\frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} x_1 - \frac{L_m P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_r} x_2 + \frac{R_r}{\sigma L_r} x_3 + (\omega_s - \frac{P \Omega_{mec}(t)}{\sigma}) x_4 - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_1 + \frac{1}{\sigma L_r} u_3 \\ \dot{x}_4 = \frac{L_m P \Omega_{mec}(t)}{\sigma L_r} x_1 + \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} x_2 - (\omega_s - \frac{P \Omega_{mec}(t)}{\sigma}) x_3 - \frac{R_r}{\sigma L_r} x_4 + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_1 + \frac{1}{\sigma L_r} u_4 \end{cases} \quad (2.41)$$

Avec,

- $x^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [I_{\alpha s} \ I_{\beta s} \ I_{\alpha r} \ I_{\beta r}]^T$ est le vecteur d'état.
- $u^T = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T = [u_{\alpha s} \ u_{\beta s} \ u_{\alpha r} \ u_{\beta r}]^T$ est le vecteur de commande.

Où, $u_{\alpha s}$, $u_{\alpha r}$, $u_{\beta s}$ et $u_{\beta r}$ sont respectivement, les tensions statoriques et rotoriques définies dans le repère ($\alpha\beta$). $I_{\alpha s}$, $I_{\alpha r}$, $I_{\beta s}$ et $I_{\beta r}$ sont les composantes du vecteur des courants. $\Phi_{\alpha s}$, $\Phi_{\alpha r}$, $\Phi_{\beta s}$ et $\Phi_{\beta r}$ sont les composantes du vecteur des flux statoriques, et $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ est le coefficient de dispersion de Blondel.

2.6. REPRESENTATION MULTIMODELES DE LA GADA

La GADA est un système multivariable, fortement couplé et non linéaire. Une façon pour tenir en compte les non linéarités et la complexité de la GADA est d'adopter la modélisation de type multimodèles de type T-S. Cette partie présente une procédure systématique de transformation du modèle non linéaire de la GADA en le réécrivant sous une forme multimodèle de type T-S représentant exactement le modèle non linéaire de la GADA. Cette dernière évite les inconvénients majeurs des méthodes classiques (identification et linéarisation): la transformation est réalisée sans perte d'information, le choix de différents points de fonctionnement n'est plus nécessaire, le choix des variables de prémisse est réalisé d'une façon systématique.

2.6.1. Méthodologie d'obtention du multimodèles [Abdelmalek *et al.*, 2016(a)]

Le système non linéaire (2.41) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = A(z(t))x(t) + Bu(t) \quad (2.42)$$

Où la matrices $A(z(t))$ est fonction de variable de prémisse $z(t)$, définies par :

$$A(z(t)) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & (\omega_s + \frac{L_m^2 P z(t)}{\sigma L_s L_r}) & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m P z(t)}{\sigma L_s} \\ -(\omega_s + \frac{L_m^2 P z(t)}{\sigma L_s L_r}) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{L_m P z(t)}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{L_m P z(t)}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & (\omega_s - \frac{P z(t)}{\sigma}) \\ \frac{L_m P z(t)}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -(\omega_s - \frac{P z(t)}{\sigma}) & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

Et la matrices B est donnée par :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

Le modèle (2.42) est un système non linéaire à paramètre variant (LPV system) en fonction du temps en raison de l'existence du terme $(z(t))$. Nous pouvons noter aussi que les non-linéarités dans la forme d'état (2.42) sont dues au couplage entre les courants (statoriques et rotoriques)

ainsi que la vitesse de rotation de la génératrice ($\Omega_{mec}(t)$), comme le montre dans le système d'équations (2.41), ce qui rend le modèle plus complexe et difficile à manipuler. Cependant, cette forme n'est pas pratique pour le diagnostic du défaut à base de modèles. Par conséquent, il est nécessaire de le convertir en une représentation simple. Pour cette raison, notre but ici est de développer un multimodèle de type T-S pour représenter le comportement exacte de la génératrice, en employant la technique de découpage par secteurs linéaires.

Dans ce cas, l'examen des équations (2.42), incite à considérer la variable de prémisse suivante :

$$z(t) = \Omega_{mec}(t) \quad (2.43)$$

En utilisant l'approche de découpage par secteurs linéaires sur la variable de prémisse (2.43) choisi $z(t)$, on obtient la forme du multimodèle de type T-S suivante:

$$\text{R\`egle } i, \text{ Si } z(t) \text{ est } M_i, \text{ Alors : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t), i = 1, 2 \end{cases} \quad (2.44)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^4$ est le vecteur d'état, $i = 1, 2$. $r = 2$ est le nombre de règles, M_i sont les fonctions d'appartenance des ensembles flous, $u(t) \in \mathbb{R}^4$ est le vecteur d'entrée, $y(t) \in \mathbb{R}^2$ est le vecteur de sortie. $A_i \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ et $B_i \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ sont respectivement les matrices d'état et de sortie. $z(t)$ est la variable de prémisse. La matrice de sortie est telle que :

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Donc, le modèle global de T-S représentant le fonctionnement de la GADA s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B u(t)) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (2.46)$$

La variable de prémisse $z(t)$ est bornée telle que $z(t) \in [z_{\min}; z_{\max}]$.

Dans la zone de fonctionnement (II) (chapitre 1), V_w est bornée comme suit :

$$V_{\min} \leq V_w \leq V_{\max} \quad (2.47)$$

Alors, la variable de prémisse choisie est donnée par:

$$\Omega_{mec} = \frac{G \lambda_{opt}}{R} V_w \quad (2.48)$$

Basé sur la borne minimale et maximale de l'équation (2.47), la variable de prémisse proposée (Ω_{mec}) est bornée comme suit:

$$\Omega_{\min} \leq \Omega_{mec} \leq \Omega_{\max} \quad (2.49)$$

Où $\Omega_{\min}$ et $\Omega_{\max}$ sont les limites de Ω_{mec} .

$$\begin{cases} \Omega_{\min} = \frac{G \lambda_{opt}}{R} V_{\min} \\ \Omega_{\max} = \frac{G \lambda_{opt}}{R} V_{\max} \end{cases} \quad (2.50)$$

Alors, la borne minimale et maximale de la variable de prémisse, s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} z_{\min} = \min (z(t)) = \frac{G \lambda_{opt}}{R} V_{\min} \\ z_{\max} = \max (z(t)) = \frac{G \lambda_{opt}}{R} V_{\max} \end{cases} \quad (2.51)$$

Le terme non linéaire $z(t)$, s'écrit alors de la façon suivante :

$$z(t) = M_1 z_{\min} + M_2 z_{\max} \quad (2.52)$$

Avec;

$$M_1 + M_2 = 1 \quad (2.53)$$

D'où les fonctions d'appartenance $\mu_i(t)$:

$$\begin{cases} \mu_1(t) = M_1 = \frac{z(t) - z_{\max}}{z_{\max} - z_{\min}} \\ \mu_2(t) = M_2 = 1 - M_1 \end{cases} \quad (2.54)$$

Les matrices d'état sont alors :

$$A_1 = A(z_{\min}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & (\omega_s + \frac{L_m^2 P z_{\min}}{\sigma L_s L_r}) & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m P z_{\min}}{\sigma L_s} \\ -(\omega_s + \frac{L_m^2 P z_{\min}}{\sigma L_s L_r}) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{L_m P z_{\min}}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{L_m P z_{\min}}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & (\omega_s - \frac{P z_{\min}}{\sigma}) \\ \frac{L_m P z_{\min}}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -(\omega_s - \frac{P z_{\min}}{\sigma}) & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = A(z_{\max}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & (\omega_s + \frac{L_m^2 P z_{\max}}{\sigma L_s L_r}) & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m P z_{\max}}{\sigma L_s} \\ -(\omega_s + \frac{L_m^2 P z_{\max}}{\sigma L_s L_r}) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{L_m P z_{\max}}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{L_m P z_{\max}}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & (\omega_s - \frac{P z_{\max}}{\sigma}) \\ \frac{L_m P z_{\max}}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -(\omega_s - \frac{P z_{\max}}{\sigma}) & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

2.6.2. Résultats de simulation et interprétations

Pour évaluer les résultats obtenus, nous simulons en parallèle deux modèles : le modèle non linéaire (2.41) et le multimodèle de type T-S (2.46). Les études de simulations sont effectuées dans Matlab/Simulink. Les paramètres et caractéristiques de la GADA sont donnés dans l'annexe B. Les simulations sont réalisées dans les mêmes conditions initiales.

Les résultats obtenus pour ce cas sont illustrés par les figures (Figure (2.6) et (2.7)).

- Les figures (Figure (2.6) et Figure (2.7)) montrent l'évolution des variables d'états de la GADA (des composantes du courant statorique et rotorique [$i_{\alpha s_sys}$ $i_{\beta s_sys}$ $i_{\alpha r_sys}$ $i_{\beta s_sys}$]) et leurs approximations par le multimodèle de T-S (2.46) ([$i_{\alpha s_TS}$ $i_{\beta s_TS}$ $i_{\alpha r_TS}$ $i_{\beta s_TS}$]).
- Les figures (Figure (2.8) et Figure (2.9)) illustrent l'évolution des erreurs entre les variables d'états du modèle non-linéaires de la GADA et le multimodèle de type T-S.

- La Figure (2.10) présente l'évolution des deux fonctions d'activations choisies pour construire le multimodèle de T-S.
- Nous pouvons remarquer que le multimodèle de T-S (2.45) reproduit correctement le modèle non linéaire de la GADA donné par (2.40). Donc, les résultats de simulation obtenus permettent donc de confirmer les approximations faites sur les non-linéarités et de valider la représentation multimodèle de T-S. Enfin, on peut conclure que l'approche multimodèle est une technique utile dans l'approximation des modèles non linéaires par des modèles locaux. Elle offre aussi la possibilité d'étendre les techniques de commande, estimation d'états et de diagnostic de défauts des systèmes linéaires aux systèmes non linéaires.

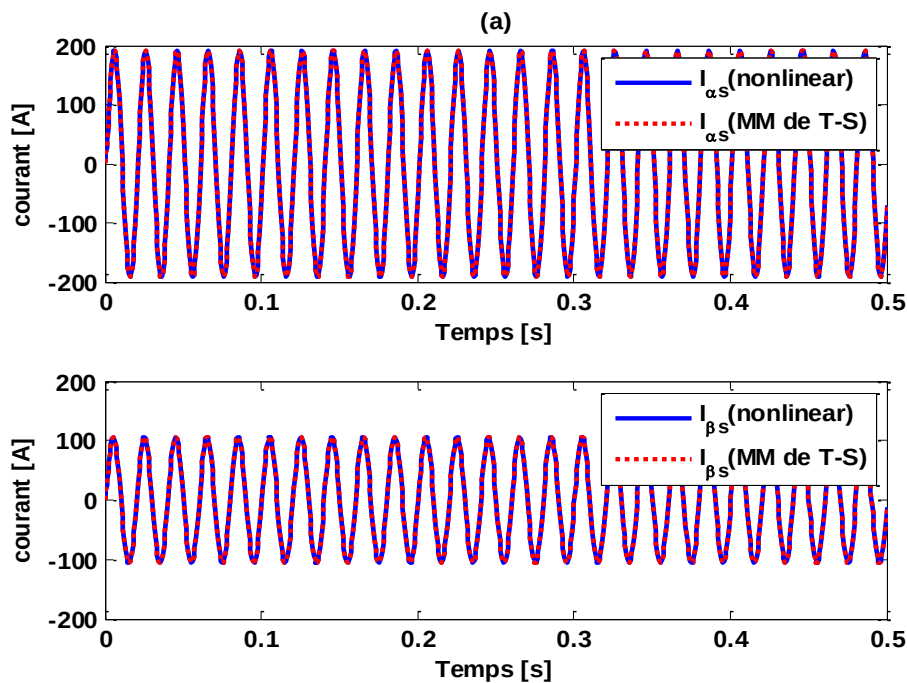


Figure (2.6) : Evolution des variables d'états ($x_1(t)$ et $x_2(t)$) du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S.

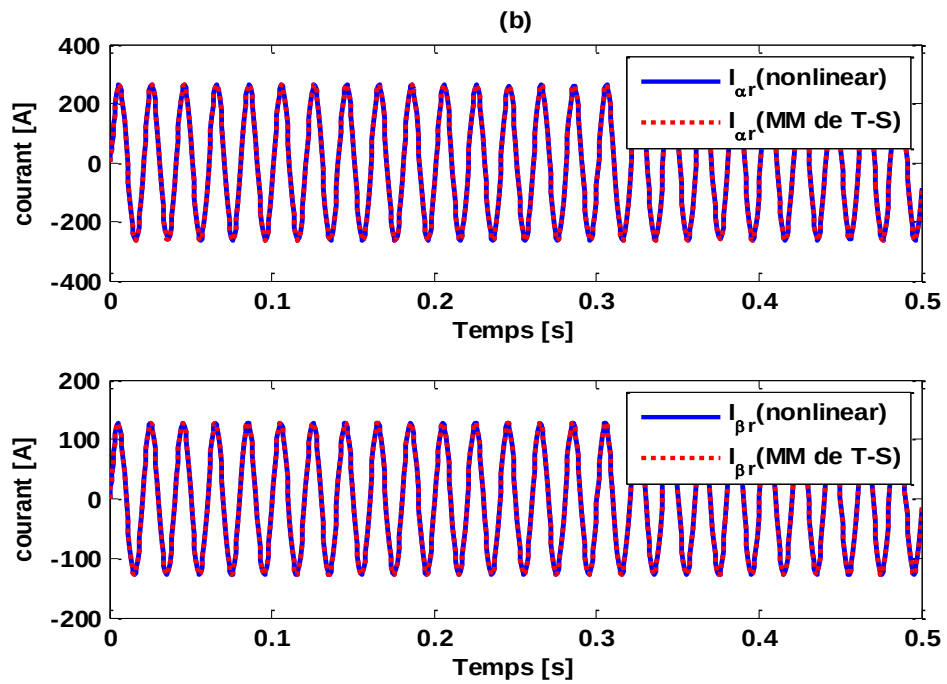


Figure (2.7) : Evolution des variables d'états ($x_3(t)$ et $x_4(t)$) du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S.

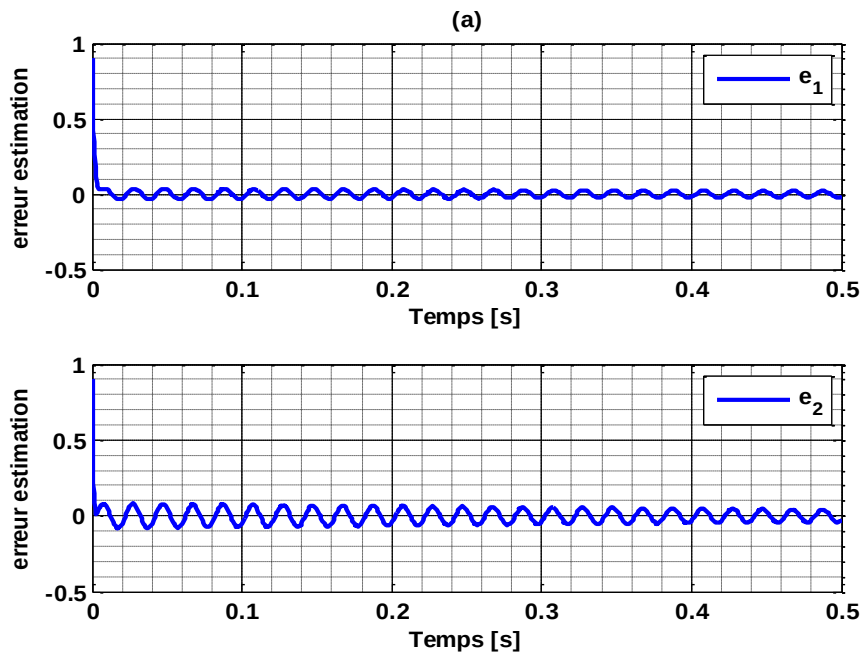


Figure (2.8) : Evolutions des erreurs (e_1 et e_2) entre les variables d'états du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S.

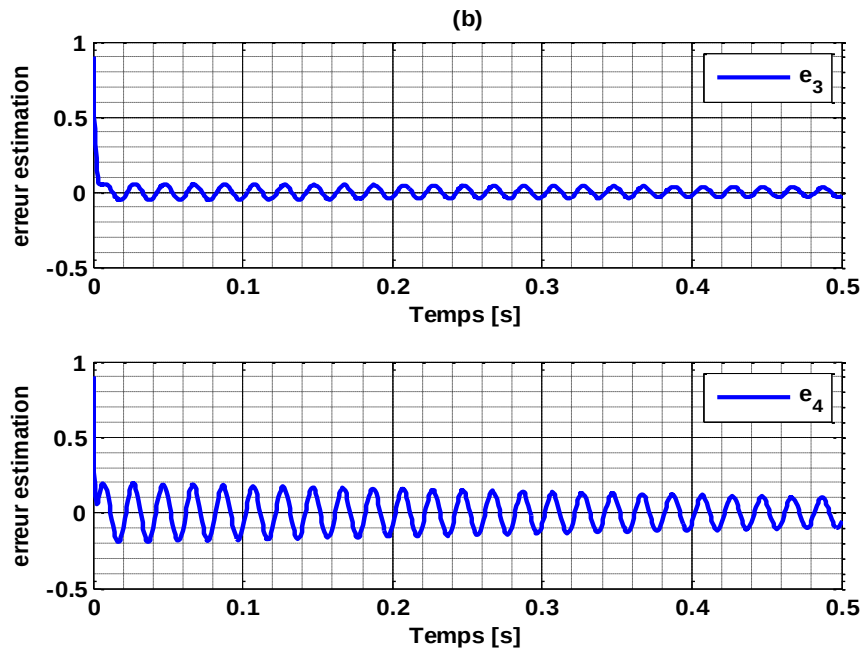


Figure (2.9) : Evolutions des erreurs (e_3 et e_4) entre les variables d'états du modèle non-linéaire et ceux du multimodèle de T-S.

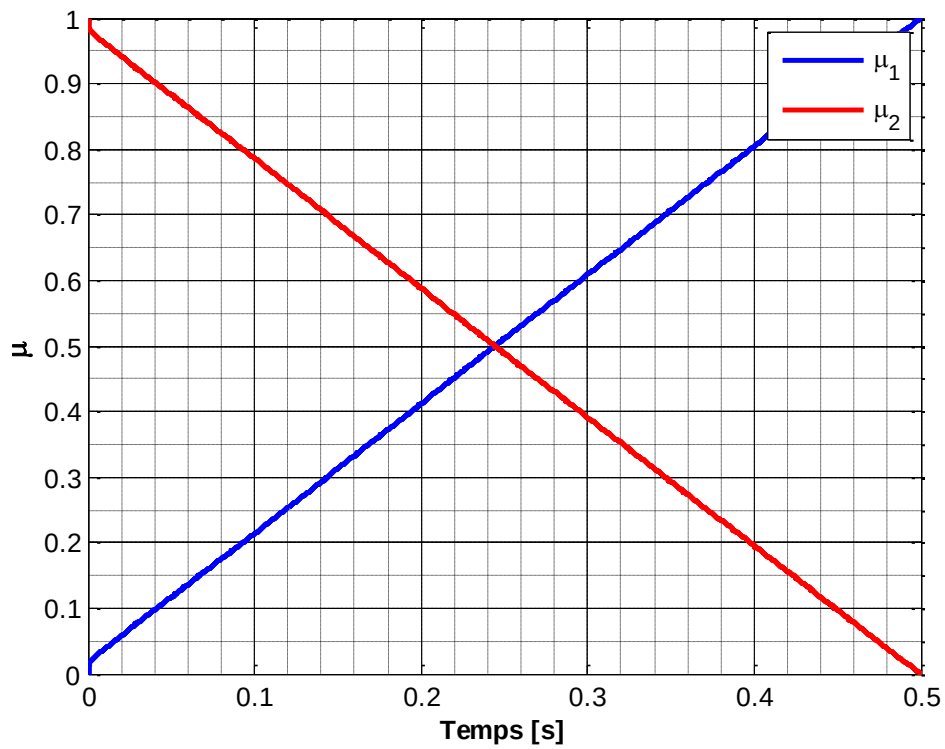


Figure (2.10) : Évolutions des fonctions d'activation.

2.7. ESTIMATION D'ETAT A BASE D'OBSERVATEURS DES SYSTEMES T-S

La disponibilité des toutes les variables d'états pour la mesure directe est rarement vérifiée dans la pratique. Ceci est motivé par le fait que l'estimation de l'état est une étape importante voir indispensable pour la synthèse de lois de commande, pour la surveillance et le diagnostic des processus industriels. En effet, l'état d'un système peut correspondre à une grandeur physique que l'on ne peut pas toujours mesurer directement; l'élaboration d'une loi de commande ou la détermination d'une défaillance d'un composant d'un système passent souvent par l'accès à la valeur d'un ou plusieurs de ses états. Pour cela, il s'avère nécessaire de concevoir un système auxiliaire appelé, observateur, qui se charge de reconstruire les états non mesurables en exploitant les informations disponibles, à savoir le modèle dynamique du système, ses sorties mesurées et éventuellement ses entrées [Nagy Kiss, 2010].

Le cas des systèmes non linéaires est plus difficile et beaucoup moins systématique. C'est la raison pour laquelle, plusieurs travaux dans la littérature scientifique ont abordé ce problème, en se basant sur des classes spécifiques de systèmes non linéaires. Dans le cas des systèmes représentés par des multimodèles, la conception d'un observateur suppose que les modèles locaux sont localement observables. Plusieurs méthodes ont été développées pour la synthèse des observateurs pour des multimodèles avec et sans incertitudes [Patton *et al.*, 1998].

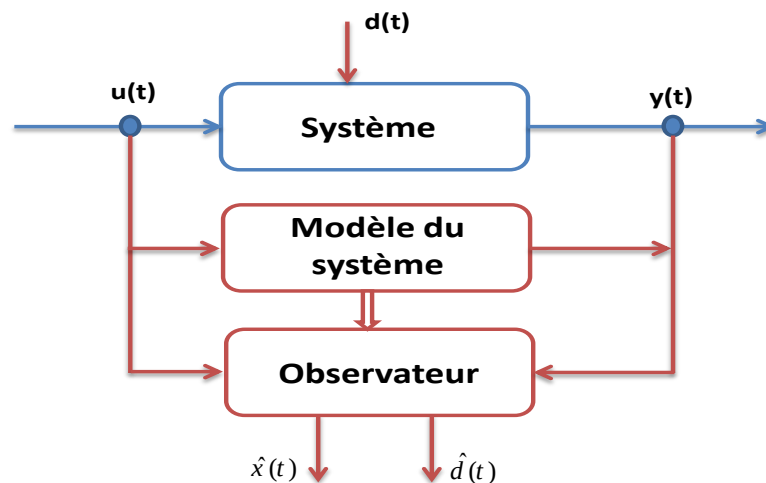


Figure (2.11) : Principe de d'estimation d'état.

La reconstruction d'état dont le principe est présentée à la Figure (2.11) se propose de fournir des estimations des variables d'état en utilisant des grandeurs connues, comme les

entrées et les sorties du système. La structure de l'observateur est réalisée en se basant sur un modèle du système réel [Aouaouda, 2012].

2.7.1. Multiobservateur basé sur la structure multimodèle de T-S

Considérons un système dynamique non linéaire représenté par le multimodèle de T-S pour lequel la sortie est une fonction linéaire de l'état [Tanaka et Wang, 2001; Takagi et Sugeno, 1985]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.55)$$

Ce choix s'avère naturel sachant que la structure multimodèle est une combinaison linéaire de sous-modèles linéaires [Nagy Kiss, 2010]. La structure d'un multiobservateur de Luenberger pour les systèmes représentés par multimodèles (2.55) est donnée par la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t))) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (2.56)$$

où $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état estimé, $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur des sorties estimées, et L_i est la matrice des gains du multiobservateur.

La forme du système représenté par les équations différentielles (2.56) est une extension de celle de l'observateur de Luenberger utilisée pour les systèmes linéaires [Luenberger, 1971]. Ce type de multiobservateur sera utilisé par la suite pour le diagnostic de défauts capteurs de courant dans la GADA. Pour déterminer les gains L_i du multiobservateur (2.56), une étude de stabilité du système générant l'erreur d'estimation d'état $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ doit être réalisée.

L'évaluation de la dynamique de l'erreur et le système (2.56) devient :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i - L_i C)e(t) \quad (2.57)$$

En choisissant une fonction quadratique de Lyapunov $V(e(t)) = e^T(t)P e(t)$. Avec $P = P^T > 0$, pour montrer les conditions de stabilité comme le montre par le théorème suivante :

Théorème 2.3. *L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro s'il existe une matrice $P = P^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et des matrices $K_i \in \mathbb{R}^{n \times l}$ telles que les conditions suivantes soient satisfaites [Patton et al.,1998]:*

$$PA_i + A_i^T P - K_i C - C^T K_i^T < 0, \forall i \in \{1, \dots, r\} \quad (2.58)$$

Les gains de l'observateur sont obtenus à partir de l'équation :

$$L_i = P^{-1} K_i \quad (2.59)$$

Démonstration du Théorème 2.3: en considérant la fonction candidate quadratique de Lyapunov $V(e(t)) = e^T(t) P e(t)$, le multimodèle de T-S (2.57) est stable si [Patton et al.,1998]:

$$\dot{V}(e(t)) = \dot{e}^T(t) P e(t) + e^T(t) P \dot{e}(t) < 0 \quad (2.60)$$

C'est-à-dire si :

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{e}^T(t) \left(\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (A_i - L_i C)^T P + P (A_i - L_i C) \right) e(t) < 0 \quad (2.61)$$

Qui vérifiée si les conditions suffisantes du **Théorème 2.3** le sont.

2.7.2. Résultats de simulation et interprétations

Dans cette partie, nous allons présenter l'utilisation du multiobservateur pour la surveillance de la GADA. Contrairement à la commande, où les observateurs sont utilisés uniquement pour estimer le vecteur d'état (ou une partie du vecteur d'état), les multiobservateur utilisés pour la surveillance estiment les sorties du système et les variables d'état.

Les résultats de simulation obtenus pour estimer les variables état du système (2.46) à base d'observateur de Luenberger (2.55) ainsi les erreurs d'estimation d'états sont représentées par les figures (Figure (2.12) et (2.13)).

- Les figures (Figure (2.12) et (2.13)), montrent que les états estimés convergent rapidement vers leurs états réels correspondants.
- D'après les figures (Figure (2.13) et (2.12)), on remarque que l'erreur d'estimation d'état presque tend vers zéros, ce qui justifier le meilleur choix des gains d'observateur qui sont calculés par la résolution des LMIs (2.58) à l'aide du toolbox YALMIP.

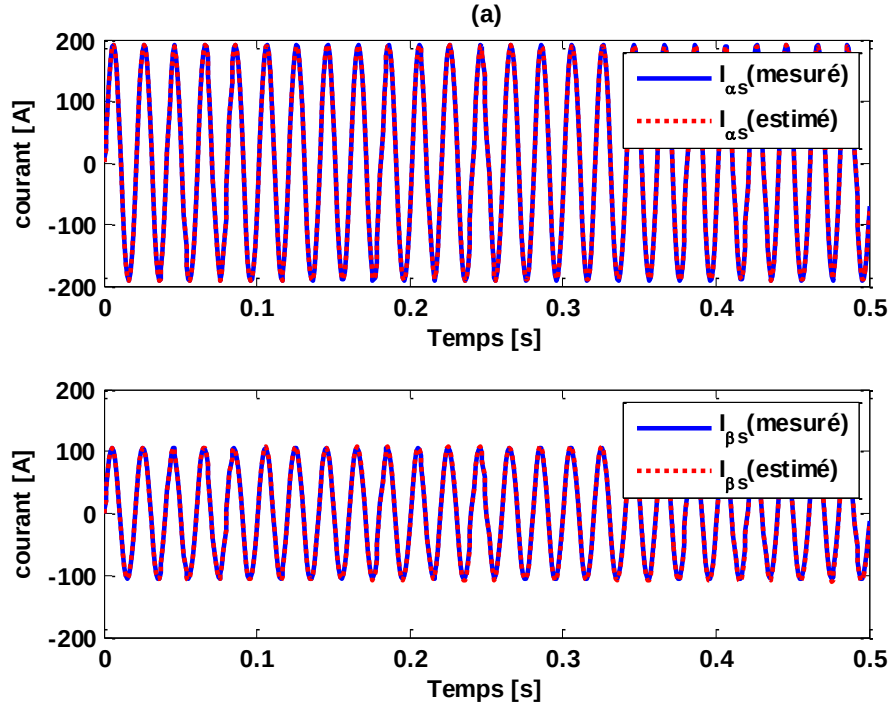


Figure (2.12) : Evolution des variables d'états ($x_1(t)$ et $x_2(t)$) du MM-TS de la GADA et leurs estimations ($\hat{x}_1(t)$ et $\hat{x}_2(t)$).

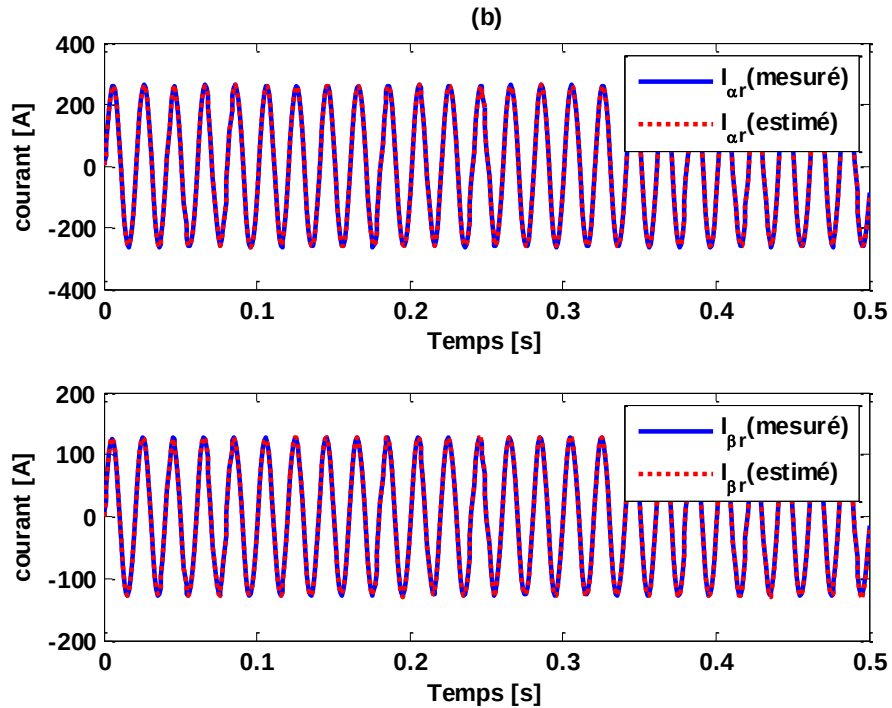


Figure (2.13) : Évolution des variables d'états ($x_3(t)$ et $x_4(t)$) du MM-TS de la GADA et leurs estimations ($\hat{x}_3(t)$ et $\hat{x}_4(t)$).

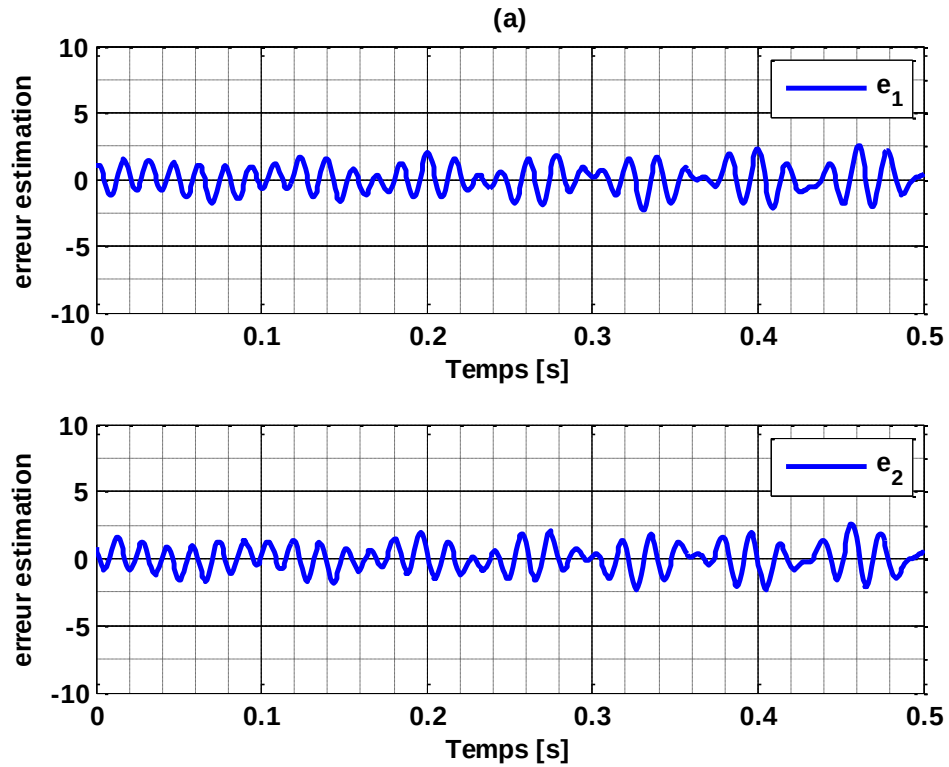


Figure (2.14) : Évaluations des erreurs d'estimation d'états (e_1 et e_2).

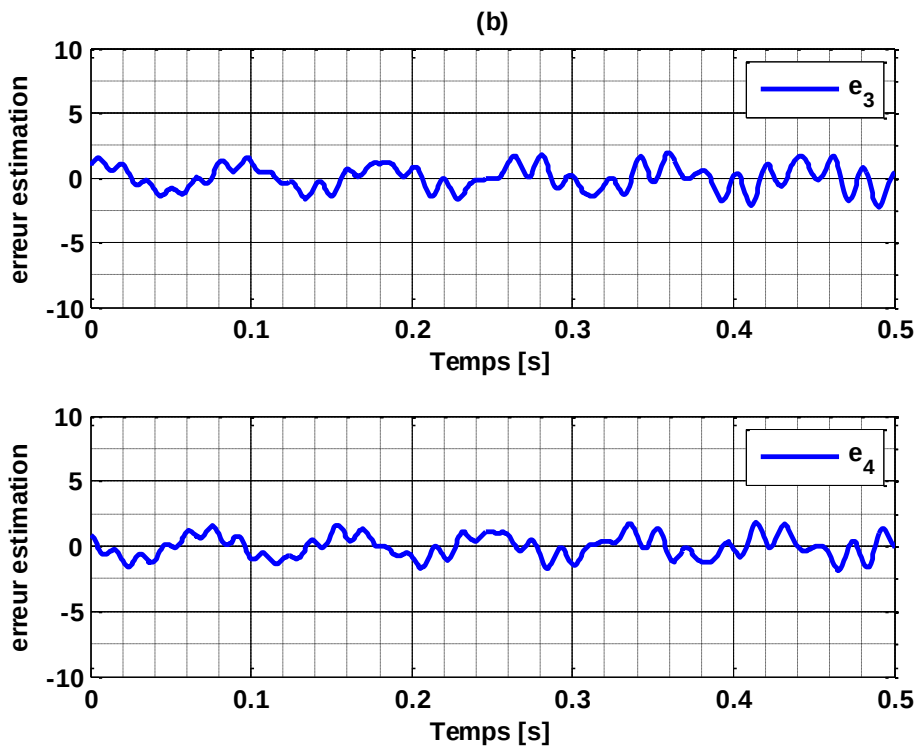


Figure (2.15) : Évaluations des erreurs d'estimation d'états (e_3 et e_4).

2.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur la théorie du multimodèle et les techniques d'obtention d'un multimodèle pour les systèmes non linéaires relativement complexes. Cette approche consiste à représenter un système réel compliqué par un modèle résultant de l'assemblage d'un nombre fini de modèles simples. Ensuite, la procédure et les hypothèses simplificatrices pour l'obtention du modèle de la GADA qui sont ainsi présentées. Cependant, le modèle de la GADA est fortement non linéaire et couplé. Pour cette raison, nous avons utilisée l'approche de découpage par secteurs non-linéaires des non linéarités dans le modèle de la GADA, pour construire un multimodèle de T-S.

Le modèle obtenu a été simulé et les résultats de simulations du modèle non linéaire et multimodèle de T-S de la GADA coïncident parfaitement. En effet, le multimodèle ainsi obtenu été plus facilement exploité pour l'estimation d'états (courants statoriques et rotoriques) de la GADA par un type classique d'observateurs qui est l'observateur de Luenberger comme nous avons déjà présenté, pour élaborer des techniques de diagnostic et commande tolérante aux défauts, que nous développerons dans les chapitres suivants.

Chapitre 3

Diagnostic des défauts statoriques à base d'observateurs

3.1. INTRODUCTION

Le diagnostic des machines électriques tournantes, en particulier de la GADA, a été attiré aujourd'hui par un nombre important de chercheurs. En effet, en raison de sa fiabilité, sa robustesse, son coût relativement faible et sa simplicité de conception, la GADA bénéficie d'une attention particulière intégrant ainsi différentes applications industrielles, en particulier dans les applications comme génératrice dans les systèmes à énergies renouvelables. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces machines présentent quelques défaillances.

L'un des défauts les plus communs dans les machines électriques y compris bien sûr la GADA est le défaut de court-circuit entre-spores qui est causé par de nombreuses raisons comme le bruit mécaniques, dégradation de l'isolant du bobinage qui peut conduire à un amorçage, un contact entre spores et les surtensions transitoires. Ce défaut peut se produire dans une phase ou parfois dans plusieurs phases simultanément, ce qui engendre une dégradation ou une défaillance dans les capteurs de courants correspond à la phase affectée par ce dernier. En effet, le besoin de surveillance et de diagnostic se fait alors, de plus en plus, sentir pour tendre vers une maintenance prédictive où l'arrêt d'urgence ou forcé, qui provoque des pertes de production et des réparations coûteuses.

Aujourd'hui, de nombreux chercheurs ont abordé la problématique du diagnostic des machines électriques, mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant, manifesté par la communauté scientifique et les industriels par rapport à cette problématique [Bonnett *et* Soukup, 1988; Bonnett *et* Soukup, 1992 ; Boumegoura, 2001; Didier, 2004 ; Ibrahim, 2006 ; Medoued, 2012 ; Kaikaa, 2010 ; Rangarajan *et al.*, 2007 ; Arfat *et al.*, 2005 ; Ramahaleomiarantsoa, 2013; Boudrim, 2015; Ouyessaad, 2014].

Dans ce contexte, nous allons, dans un premier temps, définir quelques notions fondamentales en expliquant les tâches du diagnostic et le principe de base de la détection des défauts, ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine. D'autre part, nous allons présenter la procédure générale de détection et d'isolation des défauts par les méthodes à base de modèle vecteur résidu. Puis, nous aborderons également les critères de performance d'un système de diagnostic. Dans la deuxième partie de ce travail, nous proposons une nouvelle méthodologie de diagnostic à base de modèle visant à la détection, la localisation de défauts capteurs de courant dans les phases statoriques de la GADA. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un banc de multiobservateur de Luenberger (voir le chapitre 2). Ce type de multiobservateur sera utilisé pour concevoir des générateurs de résidus permettant la détection des défauts. Enfin, pour l'étape de localisation, nous introduisons une dynamique virtuelle basée

sur la transformation de Clark sur les résidus obtenus dans l'étape de détection, ainsi un autre vecteur résidu à base d'une logique mathématique de décision sera proposé pour localiser exactement le défaut capteur de courant seulement dans la phase (b) de la GADA. Parmi les avantages de la méthode proposée nous pouvons citer:

- a- La possibilité de détecter et localiser les défauts des capteurs de courants dans une seule phase et multi-phases;
- b- Un nouveau résidu est proposé pour surmonter le problème de couplage ;
- c- Des conditions de stabilité sont développées en termes des LMI's.

3.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS

Cette partie est consacrée à la définition des mots clés les plus utilisés dans le domaine du diagnostic de défauts.

- a- **Défaillance** c'est l'altération de l'aptitude d'un ensemble de composants à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances désirées dans les spécifications techniques [Kouchih 2015; Benzineb 2010].
- b- **Défaut** est une déviation non permise d'au moins d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normales de fonctionnement [Loures 2006].
- c- **Panne** est l'incapacité d'un dispositif à accomplir sa fonction.
- d- **Symptôme** est un changement d'une quantité observable par rapport à un comportement normal [Loures 2006].
- e- **Résidu** est un signal conçu comme un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

3.3. PROCEDURE DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS

D'une manière générale, un système de diagnostic réalise les tâches principales suivantes:

- a- **détection d'un défaut** : cette opération permettant de décider si le système est ou n'est pas en état de fonctionnement normal ; il s'agit d'une opération logique dont la réponse doit être binaire (*oui* ou *non*). La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.
- b- **localisation et estimation d'un défaut** : le but fondamental de cette opération est de déterminer l'endroit exact du système où se trouve le défaut, d'en déterminer sa cause, ainsi que sa sévérité.

- c- **identification de défaut**: cette phase a pour déterminer de l'amplitude du défaut.
- d- **reconfiguration du système**: c'est une opération permettant, à partir des informations fournies par les étapes précédentes, d'appliquer les actions correctrices au système afin de lui permettre de retrouver un fonctionnement normal, ou de le mettre en mode dégradé ou arrêté afin de préserver son intégrité et/ou son environnement. La structure générale d'une procédure de diagnostic est montrée par la Figure (3.1).

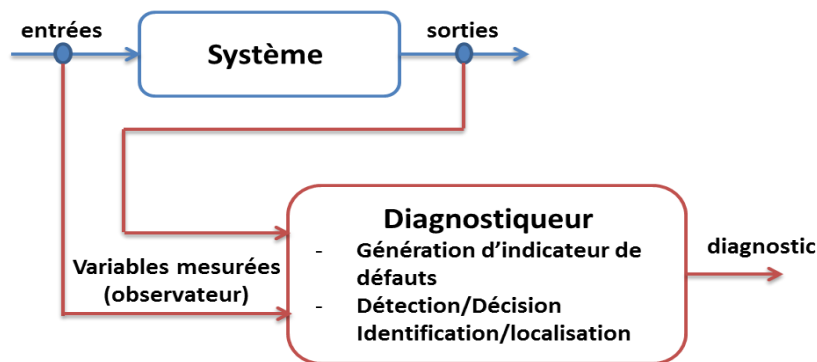


Figure (3.1) : Structure générale d'une procédure de diagnostic.

3.4. CLASSIFICATION ET CARACTERISTIQUES TEMPORELLES DES DEFAUTS

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation. Pour bien reconnaître la présence de l'un des trois types de défaut comme illustré à la figure (3.2), il faut une connaissance approfondie de l'installation dont la connaissance de son comportement sain et de son comportement défaillant [Staroswiecki *et* Gehin, 2001 ; Blanke *et al.*, 2003].

- a- **Défaut capteur** : un défaut capteur produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la grandeur physique à mesurer. Une des solutions pour améliorer la tolérance vis-à-vis de ce défaut est de multiplier les capteurs. Cette solution s'avère extrêmement fiable et simple à implémenter, mais entraîne un coût important en instrumentation. Elle est mise en œuvre essentiellement sur les systèmes à haut risque telles que les centrales nucléaires ou les systèmes aéronautiques [Blanke *et al.*, 2003 ; Rodrigues 2005].

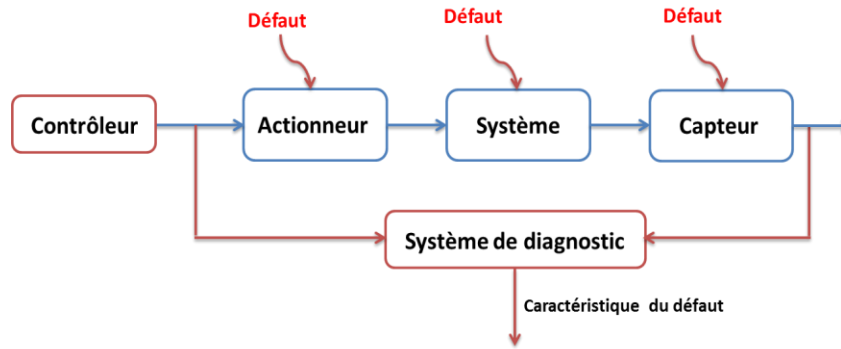


Figure (3.2) : Différent types de défauts.

- b- Défauts actionneurs :** les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système.
- c- Défauts sur le système :** ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit [Blanke *et al.*, 2003].

3.5. DIFFERENTES METHODES DE DIAGNOSTIC DE DEFAUTS

Lors de l'apparition d'un défaut dans un system réel, la topologie de ce dernier sera modifiée, ce qui implique la modification de certaines grandeurs caractérisant l'état de ce système. Les manifestations de ces défauts sont perceptibles soit par l'intermédiaire [Khov, 2009]:

- a- des changements des propriétés de certains signaux que l'on peut capter sur le dispositif à contrôler,
- b- de modifications de certains paramètres physiques de ce système.

Ces deux possibilités conduisent à définir plusieurs méthodes de surveillance et de diagnostic de système en défaut, on distingue deux catégories principales :

- a- La première catégorie utilise le modèle mathématique du système à surveiller, et est utilisée généralement dans les domaines de l'automatisme. Souvent la méthode est appelée «méthode à base de modèle»,
- b- La deuxième catégorie basée sur les données acquises sur les systèmes, l'observation des données avant et après la prise en considération des anomalies permet de caractériser le mode de fonctionnement, appelée aussi « méthode sans modèle à priori».

Ces deux catégories d'approches de diagnostic ont deux sous familles; celles utilisant le modèle qualitatif et celles faisant appel au modèle quantitatif. Il est possible de les classer selon le schéma de la Figure (3.3) [Gaeid *et al.*, 2011].

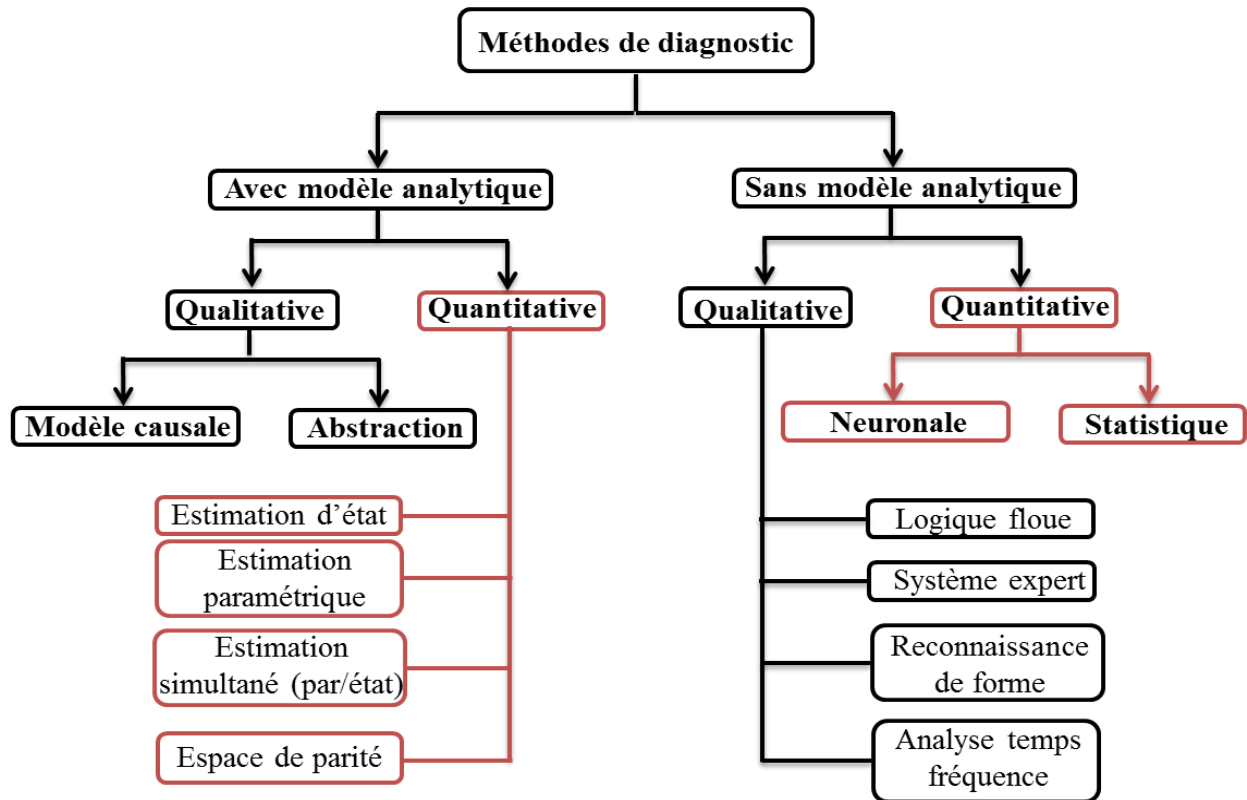


Figure (3.3) : Différentes méthodes de diagnostic.

3.5.1. Principe de l'approche qualitative

Le principe de cette approche est basé sur l'utilisation des techniques informatiques, relevant de l'intelligence artificielle, exprimée avec des symboles, traitée et simulée avec un raisonnement logique humain [Boudrim, 2015], pour but de construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques. L'intelligence artificielle s'intéresse au raisonnement qualitatif.

3.5.2. Principe de l'approche quantitative

Cette approche repose sur la comparaison du comportement réel du système caractérisé par les données de sorties au comportement théorique fournies par le modèle analytique. Le résultat obtenu de cette comparaison est généré par un ensemble de signaux indicateurs de défauts (résidus), ces résidus sont ensuite traités par le bloc de diagnostic pour la détection, la

localisation et l'identification. Une stratégie permet d'évaluer ces résidus et de décider du caractère significatif ou non des défauts qui se produisent dans le système [Menighed, 2010].

La mise en œuvre d'un système de surveillance basée sur l'utilisation de modèles peut être divisée en deux étapes voir (Figure (3.4)) [Isermann, 1997; Chen *et* Patton, 1999 ; Blanke *et al.*, 2003]:

- **La génération des résidus** : idéalement, un résidu doit rester à zéro en l'absence de défauts et s'éloigner significativement de zéro en présence de défauts.
- **le diagnostic du défaut** (évaluation des résidus grâce à un système de décision).

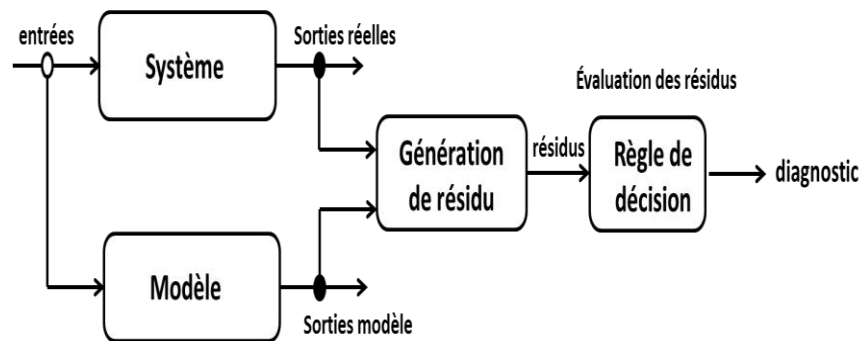


Figure (3.4) : Etapes principales du diagnostic des défauts à base de modèle

3.5.3. Diagnostic à base de modèles

Le diagnostic à base de modèles consiste à étudier les contraintes liant les différentes variables du système. Ces relations peuvent souvent être sous la forme de relations analytiques liant les variables connues. Les diagnostics à base de modèle sont:

- a- **Redondance analytique**: consiste à utiliser des informations supplémentaires du modèle permettant l'élaboration de grandeurs de même nature que celles issus des capteurs. Dans cette méthode, on remplace les capteurs physiques par des capteurs logiciels. L'idée de base est de comparer le comportement observé et le comportement attendu. Si le comportement observé ne vérifie pas les équations du modèle alors on en déduit que le système ne fonctionne pas normalement.
- b- **Estimation paramétrique**: supposent l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système et la connaissance des paramètres en fonctionnement nominal. La méthode consiste à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir des mesures des entrées et sorties du système [Adrot *et al.*, 2000 ; Gaeid *et al.*, 2011]. Avec cette méthode, la détection d'apparition de défaut s'effectue par

comparaison entre les paramètres théoriques et ceux estimés. La Figure (3.5) illustre le principe de la génération de résidus par estimation paramétrique.

- c- **Observateur**: reposant sur l'estimation d'état, il est parmi les méthodes les plus utilisées pour la génération de résidus. Le signal résidu est alors obtenu en faisant la comparaison entre les sorties réelles et les sorties estimées. Dans ce cas, l'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Plusieurs techniques existent pour la synthèse d'un générateur de résidus par exemple: Observateur de Luenberger, observateurs à entrées inconnue [Henry, 1999], Observateur Proportionnel Intégral. Les résidus ainsi générés sont exploités par un système de décision permettant de déterminer l'action à mener en fonction des propriétés du résidu.

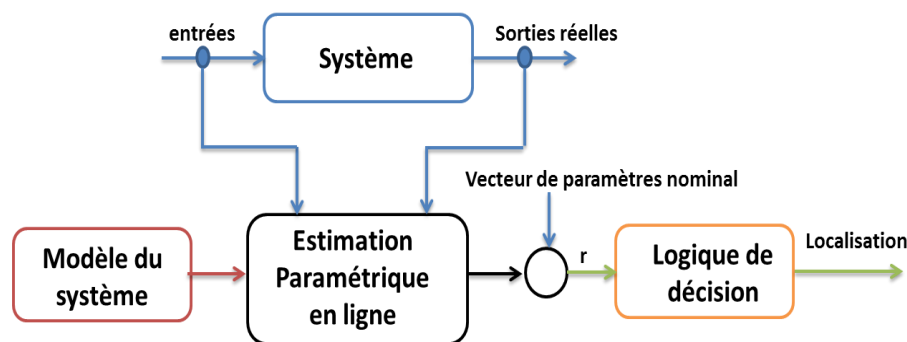


Figure (3.5) : Principe de la génération de résidus par estimation paramétrique.

- d- **Filtre**: utilise une formulation similaire au problème d'estimation et s'appuie sur des modèles stochastiques. Le plus connu est celui de Kalman. Le but de ce type de filtre est d'obtenir un estimateur non-biaisé et une variance de l'erreur d'estimation minimale [Adrot *et al.*, 2000] utilisent le filtre de Kalman pour détecter et localiser des défauts de capteurs pour les systèmes linéaires à temps variant. Cette technique est couplée avec le module de moindres carrés et permet de considérer des défauts multiples et d'occurrence simultanée. Ces méthodes de filtrage sont très utilisées pour le diagnostic robuste des systèmes linéaires en permettant de maximiser les effets des défauts sur des résidus et en même temps de minimiser les effets des incertitudes sur les résidus étant créé par des entrées inconnues [Rambeaux *et al.*, 2000 ; Henry *et Zolghadri*, 2006].
- e- **Espace de parité**: la philosophie de cette approche est de transformer les équations du modèle de manière à obtenir des relations particulières appelées des relations de redondance analytique. Ces relations n'utilisent que des grandeurs connues et disponibles

(consignes, signal de commande,... etc) en ligne du système et les résidus sont alors obtenus en substituant dans ces relations les variables connues par leurs valeurs réelles. L'ensemble des valeurs que peuvent prendre les résidus compose alors un espace appelé espace de parité, comportant autant de dimensions qu'il existe de résidus [Batteux, 2011]. Dans cet espace, le vecteur de parité y est défini comme la valeur des résidus à un instant donné et prend alors une direction dans le cas de l'apparition d'un défaut. Cette méthode est utilisée uniquement pour les systèmes linéaires, en effet, elle est inexploitable pour les systèmes non linéaires [Roth, 2010].

3.5.4. Diagnostic sans modèle à priori

Contrairement aux méthodes à base de modèles, celles à base de données reposent sur un nombre important de données qui sont supposées représenter convenablement le système. Le but primordial de ces approches est alors de construire un modèle ajusté sur les données collectées. Néanmoins, la majeure difficulté qui en découlera réside dans le fait de définir non seulement la structure appropriée du modèle, mais aussi le calage approprié entre ce modèle et le système [Batteux, 2011]. Les méthodes de diagnostic de défauts sans modèle sont les suivantes:

- a- **Redondance matérielle:** consiste à multiplier le nombre de capteurs, actionneurs, processeurs critiques sur l'installation. Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche se limite à la surveillance des éléments redondants. La méthode est très couteuse suite aux puissances consommées, aux poids et aux achats des capteurs, et aussi en maintenance [Khair et Hemsas, 2007], mais s'avère néanmoins extrêmement fiable et simple à implanter. L'inconvénient majeur de la redondance physique, est qu'elle ne détecte pas des pannes venant des éléments non redondants.
- b- **Seuillage:** consiste à comparer les variables mesurées avec des limites constantes ou adaptatives. Le premier niveau de comparaison indique la présence probable de défauts et le second caractérise leur gravité. Si les signaux franchissent le seuil, ceci représente la présence d'anomalie. L'inconvénient de cette méthode est son aspect catégorique. Le résultat issu de cette méthode peut être remis en question si la grandeur testée est proche du seuil à cause du bruit. Celle-ci peut être considérée comme un défaut alors que c'est seulement une fausse alarme.
- c- **Traitement statistique:** dans cette méthode on peut détecter la présence ou non de défaillance en analysant l'évolution de la moyenne ou de la variance d'un signal. Le test d'hypothèse ou des hypothèses représentant le fonctionnement sain et le fonctionnement

défaillant du système permet d'effectuer la prise de décision. Le test d'hypothèse le plus utilisé et le plus connu est celui de Willsky [Willsky, 1976] et [Khair et Hemsas, 2007] basé sur le maximum de vraisemblance généralisée et minimiser le nombre d'observations nécessaires à la prise de décision.

d- Modèle de connaissance: pour avoir le modèle de connaissance, on peut exploiter la connaissance heuristique du domaine. On peut collecter les données des experts humains pour formaliser le principe, souvent exprimé sous forme qualitative. Le modèle de connaissance est proche des méthodes utilisées par les humains [Boudrim, 2015]. Dans la littérature on trouve deux modèles de connaissance :

- Les systèmes experts qui modélisent l'expertise et les capacités des spécialistes dans le domaine.
- Le raisonnement à partir de cas est un raisonnement qui résout le problème à partir des expériences passées. Dans ce cas les connaissances sont conservées sous forme de cas. C'est un raisonnement par analogie. L'inconvénient de ce modèle consiste à la détermination des cas nécessaires pour décrire l'état du système.

e- Reconnaissance de forme: l'approche consiste à modéliser le mode de fonctionnement par la méthode analytique, mais avec des ensembles de mesures. La méthode est présentée comme l'alternative à l'approche avec modèle [Vellemans *et al.*, 2006].

3.6. GENERATION DES RESIDUS POUR LE DIAGNOSTIC DE DEFAUTS

La procédure de détection a pour objectif de déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence de tout phénomène anormal affectant le comportement du système surveillé. Pour parvenir à cet objectif, des résidus qui sont obtenus en comparant le comportement du modèle du système à celui du système réel sont utilisés. Plusieurs méthodes pour la génération de résidus seront données dans la section suivante.

3.6.1. Génération de résidus à base d'observateurs

Le principe de génération de résidu à base d'observateur consiste à estimer une partie ou l'ensemble des grandeurs mesurables du système à surveiller. Le vecteur résidu est calculé alors en faisant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties réelles et celles estimées. L'observateur revient alors à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la Figure (3.6). Cette approche offre des propriétés très intéressantes, car elle donne lieu à des résidus très flexibles. Par conséquent, cette souplesse, dans le choix des paramètres, permet de s'affranchir de certaines entrées inconnues,

améliorant ainsi les caractéristiques des résidus telles que leur robustesse vis à vis des perturbations et leur sensibilité aux défauts.

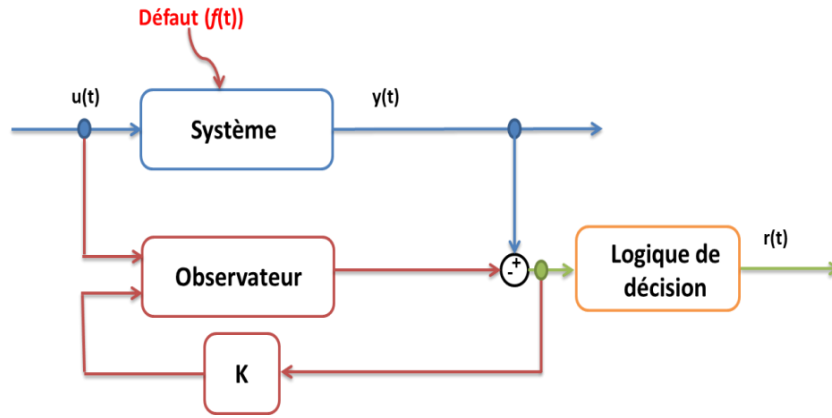


Figure (3.6) : Schéma de principe du diagnostic de défauts à base d'observateur.

Le résidu doit contenir une information sur l'instant d'apparition du défaut mais aussi sur sa provenance. Dans la pratique, le résidu n'a pas exactement une valeur nulle en l'absence de défauts car, lors de la phase de modélisation, plusieurs hypothèses simplificatrices sont introduites conduisant à un modèle qui ne reflète pas fidèlement le système réel. De plus, les mesures effectuées sur le système sont le plus souvent entachées de bruits de mesure et des entrées inconnues qui engendrent des fausses alarmes. C'est pour cette raison, qu'en général, des seuils de détection sont introduits.

Si l'on note $r(t)$ la fonction de décision et th le seuil de détection alors la détection de l'apparition du défaut s'effectue selon :

$$\begin{cases} r(t) \leq th \Leftrightarrow f(t) = 0 \\ r(t) > th \Leftrightarrow f(t) \neq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Où : $f(t)$ représente le vecteur des défauts, th est le seuil de détection.

3.6.2. Structuration et évaluation des résidus générés à base d'observateurs

Il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés. Cependant, même si l'apparition de défauts multiples est peu probable, les résidus doivent être capables de situer chacun des défauts arrivant simultanément, en occurrence, il devrait être garanti que le recouvrement des effets résultants de la combinaison des défauts ne

mène pas à une décision fausse, par exemple détection manquée d'un défaut ou mauvaise isolation du défaut. Il existe plusieurs manières de définir les résidus structurés afin de parvenir à une évaluation correcte du résidu. Ces résidus structurés sont conçus de manière à être chacun affecté par un sous ensemble de défaut et robuste (non affecté) par rapport aux défauts restant. Ainsi, lorsqu'une défaillance apparaît, seul un sous ensemble de résidus réagit. Le résidu est dit structuré par rapport à un vecteur de défaillances f s'il n'est affecté que par les défaillances f et s'il est robuste aux autres. Dans la littérature, nous distinguons trois structures de génération de résidus à base d'observateur :

3.6.2.1. Structure d'observateurs simplifiés

Dans cette structure la détection consiste à estimer complètement le vecteur de sortie $y(t)$ à l'aide d'un seul observateur pilote par une seule mesure (Figure (3.7)). Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraires, elles seront exactes.

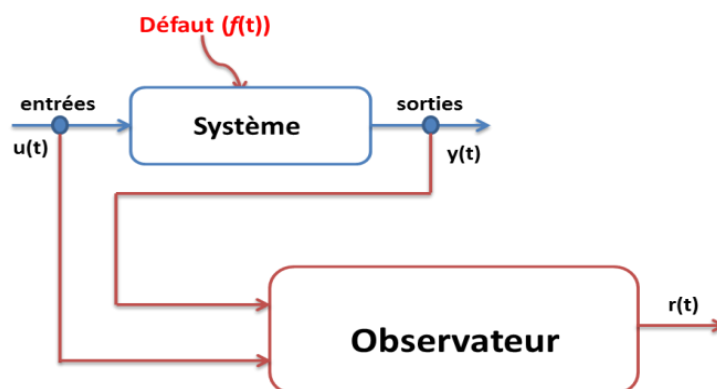


Figure (3.7) : Structure d'observateur simple.

3.6.2.2. Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Une architecture en bancs de multiobservateur dédiés DOS [Alcorta *et* Frank 1996]. Dans ce type de structure, il est question de construire autant de multiobservateur que de défauts à détecter, chacun d'entre eux génère un résidu insensible à tous les défauts sauf un [Hamdi, 2012]. La structure DOS définit une matrice d'incidence équivalente à une matrice d'identité permettant l'isolation de multiples défauts simultanés, chaque observateur étant insensible à $(p-1)$ défauts. Ainsi le multiobservateur recevant une mesure défaillante fournit une mauvaise estimation des variables estimées, tandis que les estimations des autres multiobservateur convergent vers les

sorties correspondantes sauf sur la sortie erronée [Hamdi 2012]. Cette architecture reste valable même dans le cas de plusieurs défauts simultanés.

3.6.2.3. Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Une architecture en bancs de multiobservateur généralisés GOS [Chen *et* Patton, 1999]. Dans ce genre de structure, il s'agit de synthétiser un certain nombre de multiobservateur où chacun d'entre eux est insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît alors, toutes les estimations d'états seront erronées sauf celles issues du multiobservateur insensible à ce seul défaut. La structure GOS définit une matrice unitaire avec des termes diagonaux nuls conduisant à l'isolation d'un unique défaut. Cette architecture offre plus de degrés de liberté pour la conception du multiobservateur et permet d'augmenter la robustesse.

3.6.3. Localisation des défauts

Lorsqu'un défaut est détecté, une procédure de localisation est utilisée pour déterminer l'origine de celui-ci. A la différence de la détection où un seul résidu est à la limite nécessaire, la procédure de la localisation nécessite un ensemble de résidus. Pour pouvoir localiser efficacement le ou les défauts, on dispose d'un banc de multiobservateur plutôt qu'un seul [Chen *et* Patton, 1999].

L'étape d'isolation doit permettre, à partir des résidus détectés non nuls statistiquement, de localiser les défauts, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défaillants. La signature d'un défaut représente l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus. Si l'on dispose de la signature de chacun des défauts à détecter, il est possible de remonter des effets (résidus non nuls) aux causes (les éléments défaillants). L'élaboration de résidus structurés facilite cette étape. La tâche d'isolation peut être alors, accomplie selon deux architectures :

3.6.3.1. Localisation des défauts actionneurs

Les défauts actionneurs sont modélisés par un terme additif sur les composantes de la matrice de commande. Deux configurations sont envisagées :

- a- **Défauts uniques:** Dans ce cas, le banc de multiobservateur peut être construit suivant l'architecture GOS présentée sur la Figure (3.8). Chaque résidu issu d'un multiobservateur est insensible à un défaut actionneur particulier et sensible à tous les autres. Il est donc possible de détecter et localiser les défauts actionneurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.

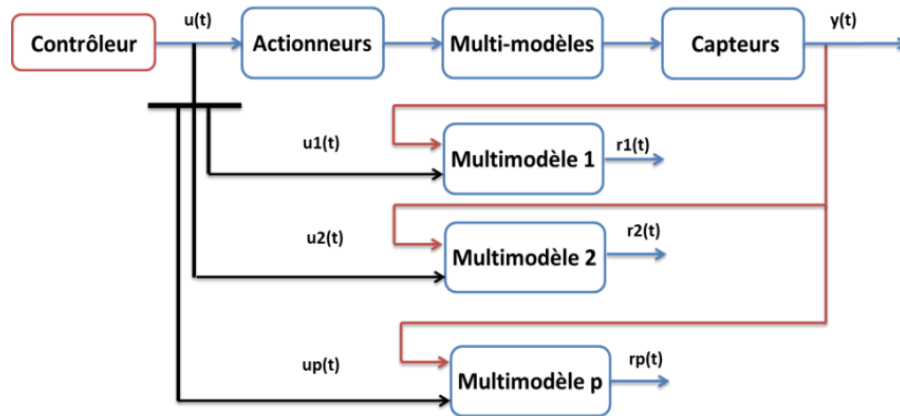


Figure (3.8) : Localisation des défauts actionneurs par la structure GOS.

b- Défauts multiples: le banc de multiobservateur pourra être construit suivant l'architecture DOS présentée sur la Figure (3.9). Chaque résidu issu d'un multiobservateur est sensible à un seul défaut actionneur ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent simultanément.

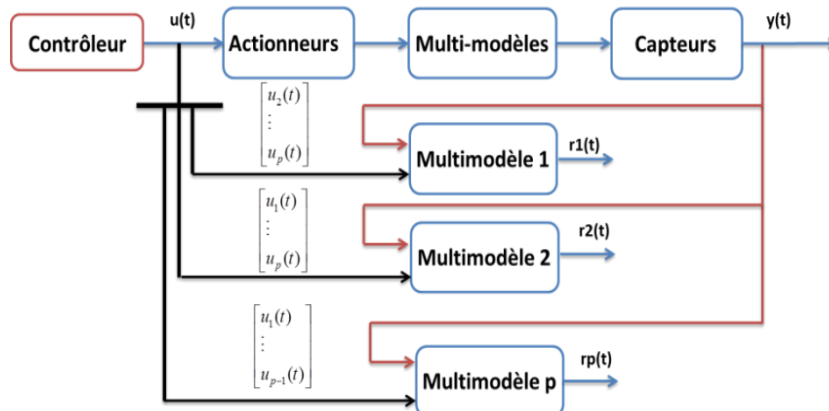


Figure (3.9) : Localisation des défauts actionneurs par la structure DOS.

3.6.3.2. Localisation des défauts capteurs

Les défauts capteurs sont modélisés par des termes additifs sur les composantes de la matrice de sortie. Deux hypothèses sont encore envisageables pour la construction d'un banc de multiobservateur suivant que les hypothèses de défauts uniques ou défauts multiples soient retenues :

a- Défaut unique : dans ce cas, le banc de multiobservateur peut être construit selon l'architecture GOS. Chaque résidu est insensible à un défaut capteur particulier et sensible

à tous les autres. Il est donc possible de détecter et d'isoler les défauts capteurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.

- b- Défauts multiples :** le banc de multiobservateur peut être construit selon le schéma DOS. Dans cette architecture, chaque résidu est sensible à un seul défaut capteur ce qui permet de détecter et d'isoler les défauts capteurs même lorsqu'ils surviennent de façon simultanée.

3.7. STRATEGIE PROPOSEE DE DIAGNOSTIC DE DEFAUTS CAPTEURS DE COURANT DE LA GADA [Abdelmalek *et al.*, 2016(a)-(b)]

L'intérêt grandissant porté à la détection des défauts de court-circuit entre spires statoriques de la GADA est dû essentiellement aux dégâts importants causés par l'apparition d'une panne au niveau de celles-ci. Il est primordial, non seulement de détecter l'apparition des défauts mais de les détecter de façon précoce afin d'y remédier dans les délais les plus brefs pour minimiser ces dégâts. A cet effet, dans ce chapitre, nous proposons une stratégie robuste de diagnostic à base de modèles visant à la détection et la localisation des défauts de court-circuit entre spires affectant le stator d'une GADA décrit par un multimodèle de T-S (Figure (3.10)). Les défauts de court-circuit entre spires statorique induisent des courants de court-circuit, ces derniers se comportent comme des défauts capteurs dans les équations du modèle (défauts capteurs de courants). Ainsi, ces courants de court-circuit sont considérés comme des biais qui s'ajoutent aux courants de sortie du multimodèle de T-S.

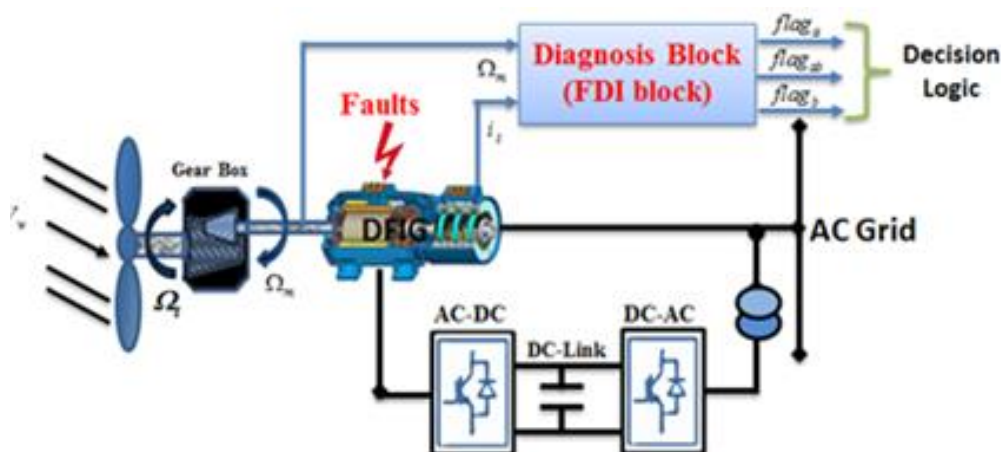


Figure (3.10) : Schéma block de la stratégie de diagnostic proposée.

La stratégie développée pour concevoir des générateurs de résidus permettant la détection des défauts est basée sur l'utilisation d'un banc de multiobservateur de Luenberger que nous

avons présenté dans le chapitre précédent. Ensuite, afin d'isoler un défaut sur le capteur de courant dans les phases statoriques de la GADA, il est nécessaire de déterminer la phase sur laquelle le défaut est apparu. Pour cela, nous proposons une technique qui repose sur l'utilisation des résidus générés à base d'un banc de multiobservateur combiné avec un autre vecteur résidu qui est proposé pour résoudre le problème de couplage entre les résidus et isoler le défaut du capteur de courant qui correspond à la phase (b) affectée par un court-circuit.

3.7.1. Modèle défaillant de la GADA

Ce paragraphe présente le modèle mathématique de type T-S de la GADA en présence de défauts capteurs de courants dans les phases statoriques. Considérons la représentation multimodèle de type T-S de la GADA (2.45) établie dans le chapitre précédent. En présence des défauts capteurs le modèle de la GADA (2.45) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = C x(t) + f_i \end{cases} \quad (3.2)$$

Où $f_i = [f_{as} \ f_{\beta s}]^T$ est un vecteur de défauts dans le référentiel ($\alpha\beta$), qui correspondent aux défauts sur l'un des capteurs de courants dans les phases statoriques (a), (b) et (a et b), respectivement.

En absence de défauts, f_i est identiquement nul. Ce dernier est obtenu en utilisant la transformation (2.35) et est donné par:

$$\begin{pmatrix} f_{as} \\ f_{\beta s} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

En appliquant cette transformation, le vecteur de défauts f_i peut être donné par la formule suivante:

$$\begin{cases} f_{as} = f_{as} \\ f_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}} f_{as} + \frac{2}{\sqrt{3}} f_{bs} \end{cases} \quad (3.4)$$

Cette représentation sera utilisée dans le paragraphe suivant pour développer la stratégie de diagnostic de défaut.

3.7.2. Procédure proposée de diagnostic de défauts

Le but principal de cette partie est de concevoir une méthode de diagnostic des défauts capteurs à base d'un banc de multiobservateur de Luenberger. La procédure de diagnostic de défauts proposée est basée sur la création d'un banc d'observateurs afin de générer des résidus structurés, est conçu afin de détecter et localiser les défauts capteurs. Ce banc est composé d'un ensemble de multiobservateur de Luenberger. Chaque multiobservateur est sensible à un seul défaut.

3.7.2. 1. Phase de génération des résidus

La génération des résidus à base d'un banc de multiobservateur consiste tout d'abord à reconstruire les sorties du système à partir des mesures et du modèle du système, puis à comparer les signaux mesurés à leurs estimées, et enfin à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. La stratégie proposée dans cette partie pour la détection de défauts de capteurs de courant, est de concevoir un banc de multiobservateur de Luenberger avec différentes combinaisons des sorties mesurées du système à surveiller, selon la structure d'observateurs dédiés DOS présenté sur la Figure (3.11).

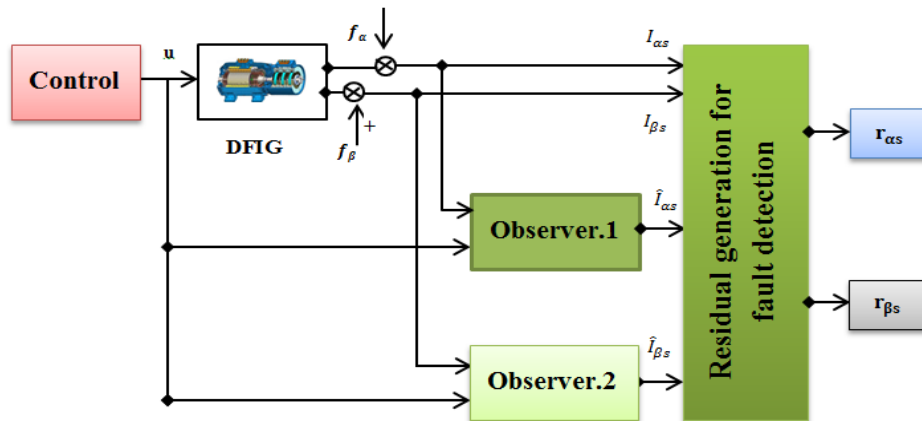


Figure (3.11) : Banc de multiobservateur de Luenberger (DOS) pour la génération de vecteur de résidus.

Le nombre de ces multiobservateur est égal au nombre de sorties mesurées. Ainsi, le $i^{ème}$ multiobservateur est piloté par la $i^{ème}$ sortie et toutes les entrées. La sortie de ce $i^{ème}$ multiobservateur est insensible aux défauts des sorties non utilisées donc chaque résidu issu d'un

multiobservateur est par conséquent, sensible à un seul défaut capteur, ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent simultanément.

On notera par la suite r_j le signal résidu calculé à partir de la différence entre la $i^{\text{ème}}$ sortie du système et la $i^{\text{ème}}$ sortie estimée avec le multiobservateur j . La forme du $j^{\text{ème}}$ multiobservateur s'explique :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}^j(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(\xi(t)) (A_i \hat{x}^j(t) + B_i u(t) + K_{pi}^j (y^j(t) - \hat{y}^j(t))) \\ \hat{y}^j(t) = C^j \hat{x}^j(t), \quad j = \{1, 2\} \end{cases} \quad (3.6)$$

où $\hat{x}^j(t)$: (respectivement $\hat{y}^j(t)$) représente le vecteur d'état estimé (respectivement le vecteur de sortie estimé) par le $j^{\text{ème}}$ observateur, C^j la matrice d'observation construite à partir de C (détermine les sorties utilisées par le $j^{\text{ème}}$ multiobservateur). Le vecteur de sortie $y^j(t)$ représente les sorties utilisées pour chaque observateur. Les matrices K_{pi}^j de dimensions appropriées sont à déterminer de telle sorte que l'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro.

Pour le diagnostic des défauts capteurs, nous avons deux sorties (y_1, y_2) . Le nombre de multiobservateur que l'on peut élaborer est égal à deux (nombre de sorties de capteurs) :

- l'observateur 1 est piloté par la première sortie (y_1) ;
- l'observateur 2 par la deuxième sortie (y_2).

Soit r_i les résidus calculés à partir de la différence entre l' $i^{\text{ème}}$ sortie du système et l' $i^{\text{ème}}$ sortie estimée avec multiobservateur j . Alors, le banc de multiobservateur permet d'engendrer différents résidus :

$$r_i(t) = |y_i(t) - \hat{y}_i| \quad (3.6)$$

Où ;

$$\begin{cases} r_1(t) = |I_{\alpha s} - \hat{I}_{\alpha s}| \\ r_2(t) = |I_{\beta s} - \hat{I}_{\beta s}| \end{cases} \quad (3.7)$$

Où

$y_i(t)$: représente les sorties du système réel, et $\hat{y}_i$ sont les sorties estimées à base du banc de multiobservateur.

3.7.2. 2. Phase de détection de défauts

Après la génération des résidus, la deuxième étape d'une procédure de FDI est la détection de défaut et l'évaluation des résidus. En théorie, un résidu doit être nul en l'absence de défaut et significativement différent de zéro dans le cas contraire. Cependant en pratique, cette condition n'est pas tout à fait satisfaite, car les signaux mesurés sont entachés de bruits et affectés par des perturbations. Il est alors nécessaire d'introduire des seuils de détection afin d'éviter de fausses alarmes. Ces seuils peuvent être fixés par l'utilisateur à partir d'une étude statistique des résidus et en prenant en compte les incertitudes de modélisation. En effet, une comparaison entre une fonction d'évaluation de résidu $r_i(t)$ avec des seuils fixes (th_i) pour détecter la présence ou non d'un défaut capteur.

D'une manière générale, et en se basant sur l'évaluation de vecteur de résidus, il est possible de représenter la logique de décision sous forme booléenne comme suit :

$$flag_i = \begin{cases} 0, & \text{if } |r_i(t)| \leq th_i \\ 1, & \text{if } |r_i(t)| > th_i \end{cases} \quad (3.9)$$

Où $flag_i$ la variable de décision (drapeau i) et th_i le seuil de détection.

- Si $flag_i = 1$: présence d'un défaut.
- si $flag_i = 0$: absence de défaut.

3.7.2. 3. Phase d'isolation de défauts

Dans cette partie, nous avons proposé une stratégie robuste qui sert à isoler le défaut capteur et déterminer par conséquent la phase sur laquelle le défaut est apparu (la phase affectée par le défaut de court-circuit). Comme nous avons déjà mentionné dans l'étape de détection, un défaut affectant un capteur de courant dans les phases réels (abc) est détecté sur l'un des axes virtuel ($\alpha\beta$) (capteur 1 ou 2 (Figure (3.11))). Ces derniers indiquent la présence d'un défaut au niveau des capteurs de courant dans les phases réels (abc) du stator. Cependant, cette conception ne donne pas une information plus précise (Figure (3.11)), c'est-à-dire ; si le défaut du capteur de courant est en phase (a) ou (b) ou (a et b), à cause du couplage entre les phases statoriques exprimé comme suit :

$$I_{\alpha s} = I_{as} \quad (3.10a)$$

$$I_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{as} + \frac{2}{\sqrt{3}} I_{bs} \quad (3.10b)$$

Si ce problème du couplage des phases est rencontré, la tâche d'isolation sera vraiment difficile, ce qui nécessite une procédure systématique permettant de surmonter ce problème typique.

Par ailleurs, en exploitant la transformation (3.10), on peut avoir les différents cas suivants:

- a- Si un défaut affecte seulement le capteur de courant dans la phase statorique (a), il influencera sur les deux composants dans le repère ($\alpha\beta$) du courant statorique (3.10a), ce qui conduit à un changement dans les deux résidus r_1 et r_2 (3.7).
- b- Si un défaut affecte uniquement le capteur de courant dans la phase (b) du stator, il influencera seulement sur la composante (β) du courant statorique (3.10b) et par conséquent, on aura uniquement un changement dans le vecteur de résidu r_2 (3.7).
- c- Si un défaut affecte les deux capteurs de courant dans les phases (a) et (b), il influencera sur les deux composants dans le repère ($\alpha\beta$) du courant statorique (3.10), ce qui implique qu'une légère augmentation va être détectée au niveau des deux résidus r_1 et r_2 .

Par conséquent, d'après ce dernier cas on peut dire que, le problème de couplage sera maintenu en introduisant un nouveau vecteur résidu (r_b) sensible uniquement au défaut du capteur de courant dans la phase (b) et sera calculé à partir des deux vecteurs résidus (r_1 et r_2) définis précédemment (3.7). Ce dernier sera ensuite utilisé pour indiquer la présence d'un défaut uniquement sur le capteur de courant dans la phase (b).

Le nouveau résidu que nous avons proposé aura la forme suivante:

$$r_b = \left| r_2 - \frac{1}{\sqrt{3}} r_1 \right| \quad (3.11)$$

Nous avons combiné le vecteur r_b avec les deux autres résidus définis précédemment (r_1 et r_2) pour le diagnostic des défauts capteurs dans les phases statoriques (abc) de la GADA. En effet, les résidus qui localiseront les défauts sont choisis comme suit :

- $r_1 = r_{as}$ sensible au défaut capteur dans la phase (a).
- $r_2 = r_{\beta s}$ sensible au défaut capteur dans les phases (a), (b), (a et b).
- $r_3 = r_b$ sensible au défaut capteur dans la phase (b).

A présent, nous avons défini uniquement les trois combinaisons logiques pour la localisation des défauts soit dans une seule phase (a ou b) ou les deux phases simultanément (a et b):

- Si $|r_1| > th_1$ et $|r_2| > th_2$ et $|r_3| < th_3 \Leftrightarrow X = (1\ 1\ 0) \Rightarrow$ défaut capteur de courant (phase a).
- Si $|r_1| < th_1$ et $|r_2| > th_2$ et $|r_3| > th_3 \Leftrightarrow X = (0\ 1\ 1) \Rightarrow$ défaut capteur de courant (phase b).
- Si $|r_1| > th_1$ et $|r_2| > th_2$ et $|r_3| > th_3 \Leftrightarrow X = (1\ 1\ 1) \Rightarrow$ défaut capteur de courant (phases a et b).

A base de cette logique de décision, la localisation des défauts est bien assurée.

3.7.3. Résultats de simulations et interprétations

Dans cette section, le comportement des courants statoriques de la GADA sont étudiés en présence de différents défauts capteurs de courants dans les phases statoriques. Ces défauts sont causés par un court-circuit entre spires. A cet effet, nous avons créés des défauts de court-circuit entre spires dans les phases statoriques (abc) avec des valeurs différentes pour l'amplitude de défauts et aussi à des instants différents. Les études de simulations sont effectuées dans l'environnement Matlab/Simulink. Les paramètres de la GADA utilisée sont donnés en annexe B.

a- Défaut de court-circuit dans la phase «a» sur l'intervalle [0.1-0.25 s]

- La Figure (3.12) représente le comportement des signaux de sorties (y_1 et y_2) issue des capteurs de courants statoriques en présence de défaut.
- La Figure (3.13) indique un zoom des sorties (y_1 et y_2) dans le cas de la présence de défaut.
- La Figure (3.14) illustre l'évolution des résidus (r_1 et r_2) générés à partir d'un banc de multiobservateur de Luenberger (3.5) selon la structure DOS, ainsi que le résidu proposé (r_3) pour la détection de défauts (étape de détection de défauts).
- La Figure (3.15) montre le résultat de vecteur de décision obtenu à partir de l'algorithme proposé pour isoler les défauts (étape d'isolation de défauts).

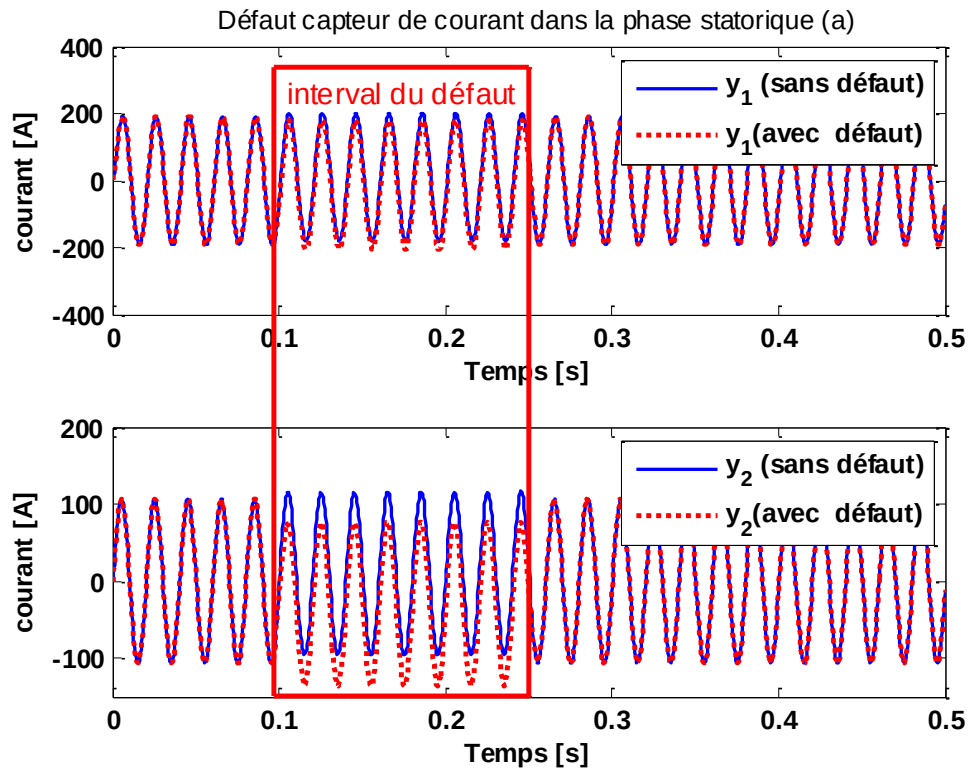


Figure (3.12) : Evolutions des sorties en absence et en présence de défaut.

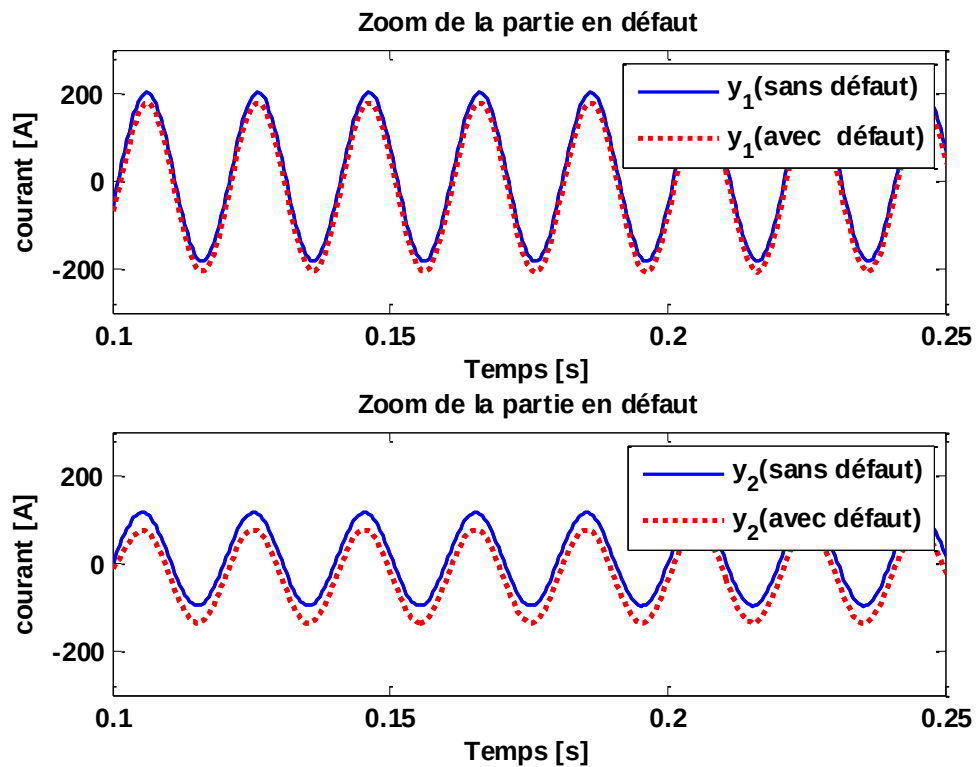


Figure (3.13) : Zoom des sorties en absence et en présence de défaut.

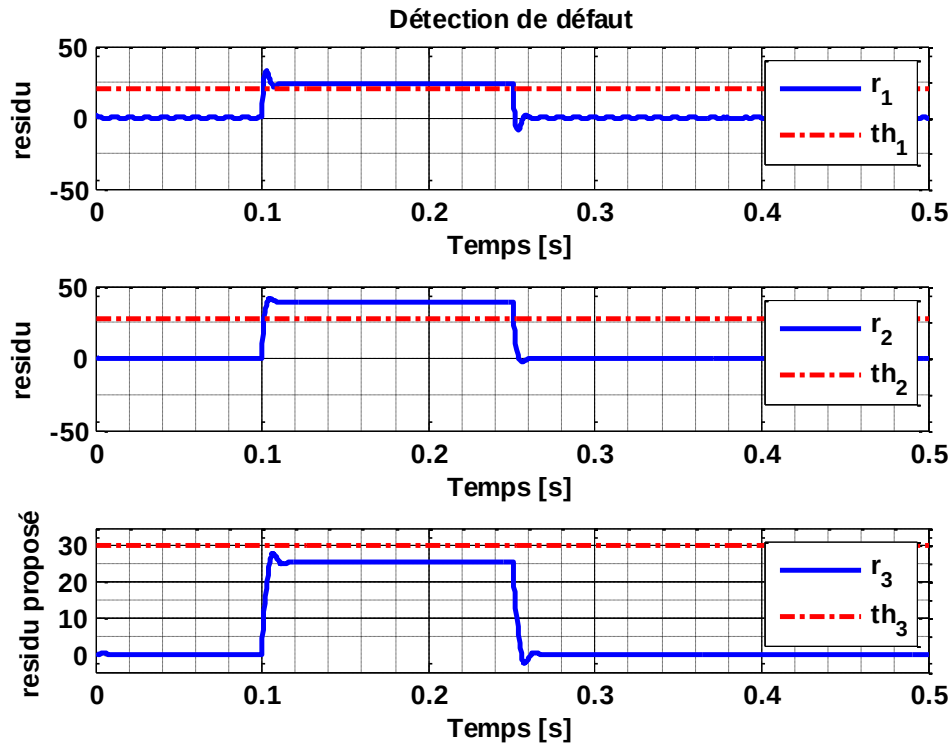


Figure (3.14) : Détection de défaut capteur de courant dans la phase (a).

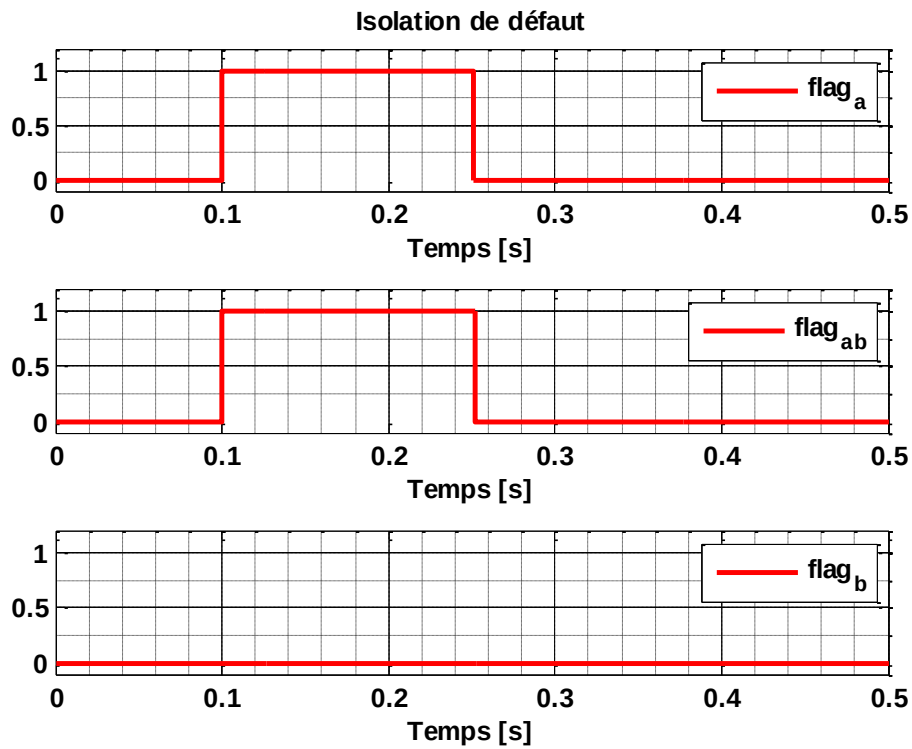


Figure (3.15) : Isolation de défaut capteur de courant dans la phase (a).

- D'après la Figure (3.12), on remarque des changements dans le comportement des deux signaux de sorties (y_1 et y_2) durant l'intervalle d'apparition de défaut ($[0.1-0.25 \text{ s}]$), malgré que le défaut affecte seulement la phase (a) du stator. Ce changement est causé par le problème du couplage entre les courants dans le repère ($\alpha\beta$). A cette effet, ce problème d'interaction des sorties sera ensuite surmonter à base de la stratégie de diagnostic proposée.
- D'après la Figure (3.14), on remarque que seulement les deux résidus (r_1 et r_2) sont sensibles à ce défaut (dépassement des seuils de détection th_1 et th_2 durant l'intervalle d'apparition de défaut ($[0.1-0.25 \text{ s}]$), ce qui permet de déclencher une alarme indique la présence d'un défaut (étape détection). Par contre, le résidu proposé (r_3) est insensible à ce défaut.
- D'après la Figure (3.15), il peut être remarqué que le vecteur de décision prend les valeurs logiques $X=[1 \ 1 \ 0]^T$, ce qui nous confirme que le défaut est bien localisé sur le capteur de courant dans la phase (a) du stator (à base des combinaisons logiques proposées).

a- Défaut de court-circuit dans la phase « b »

Dans ce cas, nous avons créé un défaut de court-circuit égal à 10% uniquement dans la phase (b) sur l'intervalle de temps $[0.3-0.45\text{s}]$.

- D'après les résultats de simulation illustrés dans la Figure (3.16), on peut observer que seule la sortie y_2 est affectée.
- La comparaison du comportement des deux signaux de sorties (y_1 et y_2) en absence et en présence de défaut sont illustrées dans la Figure (3.17). D'après cette dernière, il est clair que la deuxième sortie y_2 est uniquement sensible à ce défaut.
- La Figure (3.18) montre que seulement les deux résidus (r_2 et r_3) sont sensibles à ce défaut (dépassement des deux seuils de détection th_2 et th_3 sur l'intervalle $[0.3-0.45\text{s}]$), ce qui déclenche une alarme indique la présence d'un défaut (étape de détection). Par contre, le résidu (r_1) n'est pas sensible à ce défaut.
- A partir des combinaisons logiques présentés précédemment, on peut dire que le défaut est exactement localisé sur le capteur de courant dans la phase (b), comme l'indique sur la Figure (3.19) ($X=[0 \ 1 \ 1]^T$).

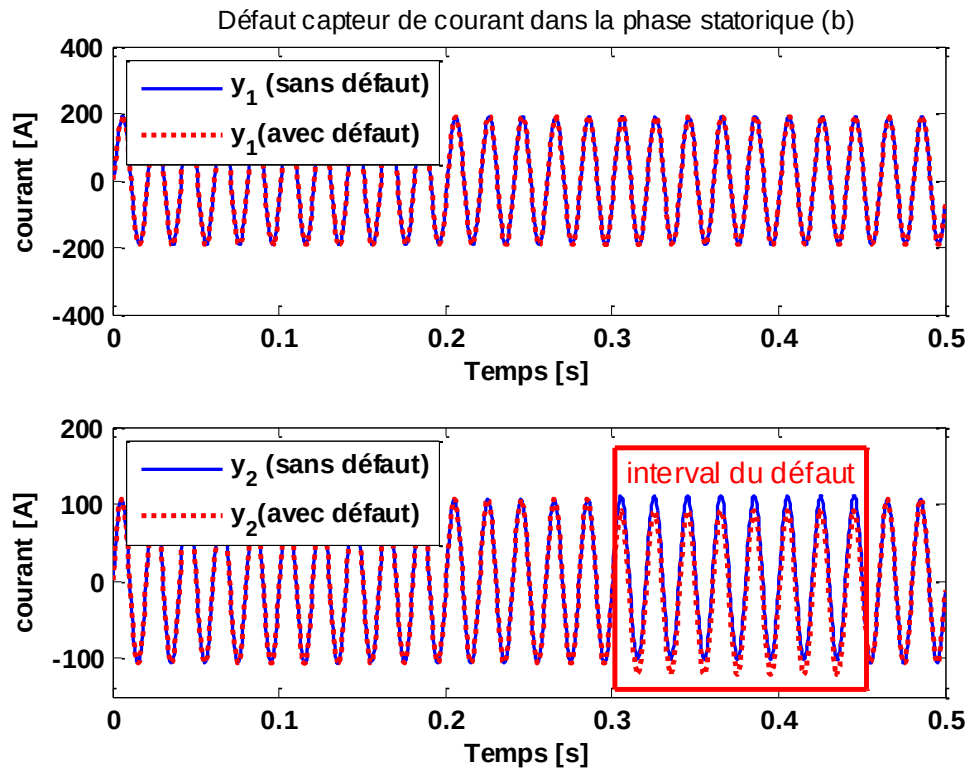


Figure (3.16) : Evolutions des sorties en absence et en présence de défaut.

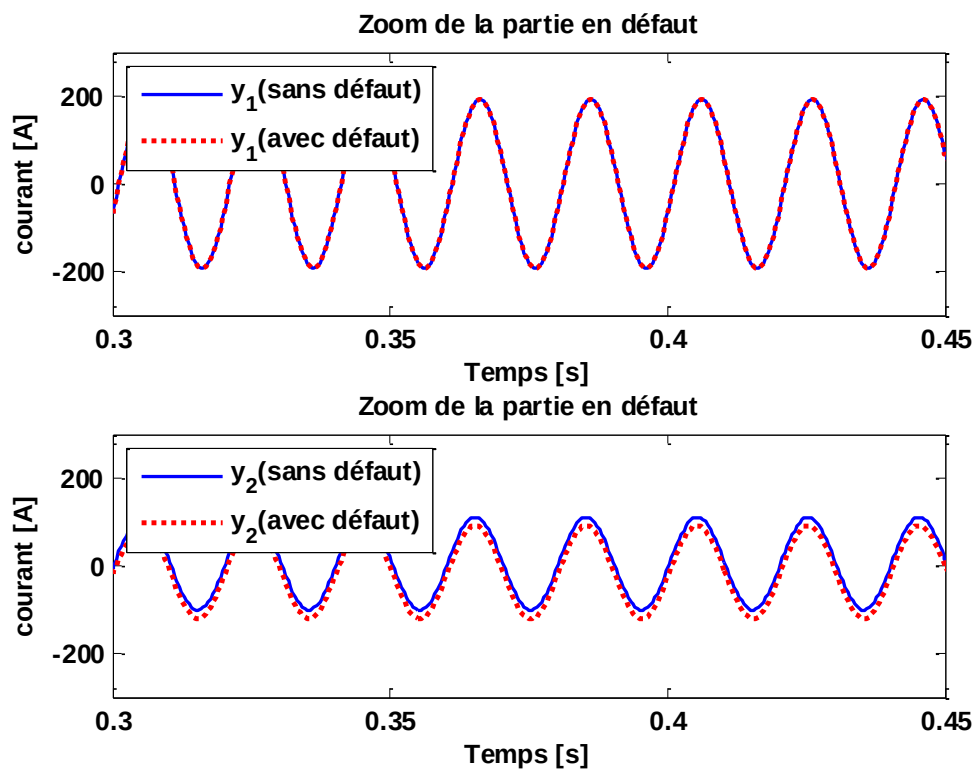


Figure (3.17) : Zoom des sorties en absence et en présence de défaut.

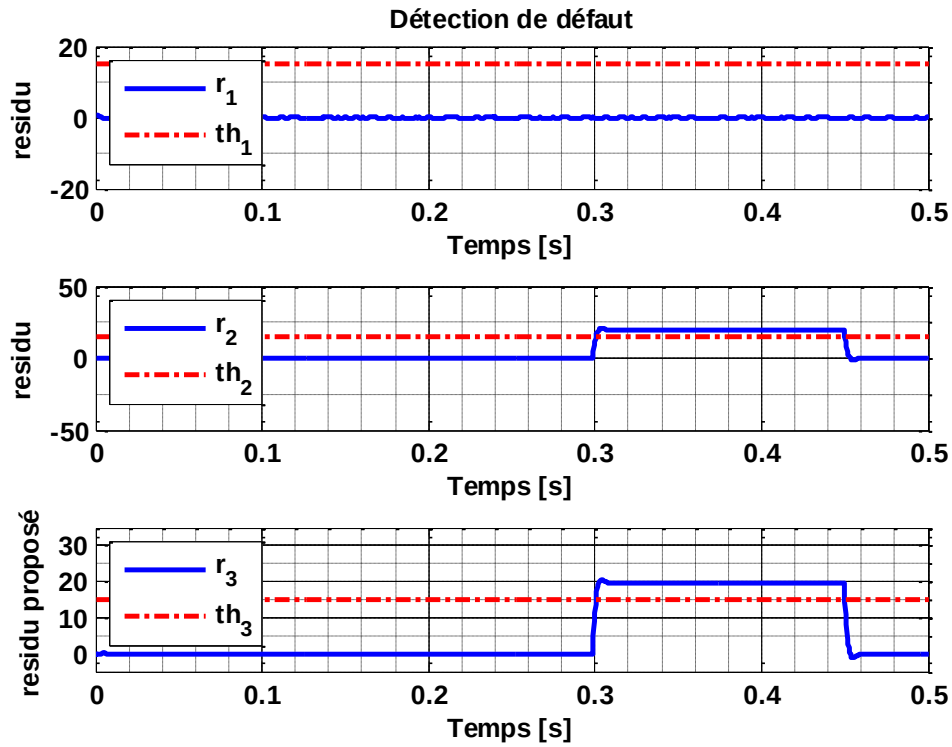


Figure (3.18) : Détection de défaut capteur de courant dans la phase (b).

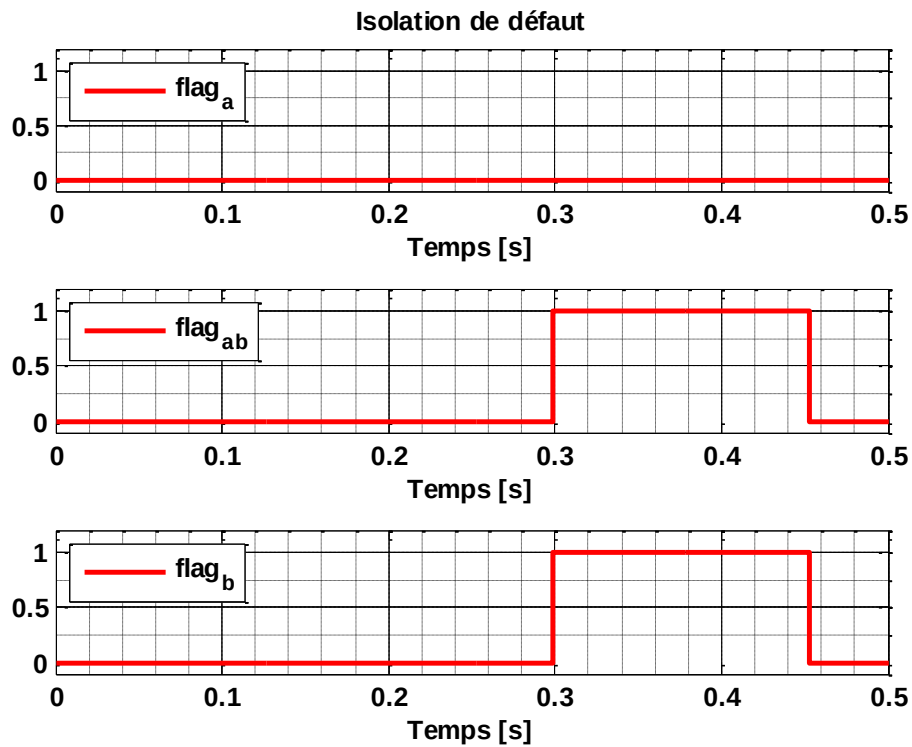


Figure (3.19) : Isolation de défaut capteur de courant dans la phase (b).

c- Défaut de court-circuit dans les deux phases « a » et « b »

Considérons à présent le cas de l'apparition de deux défauts, affectant les sorties des capteurs de courants dans les deux phases (a) et (b) :

- Le premier défaut injecté simultanément sur les deux sorties y_1 et y_2 au même temps, se déclenche à l'instant $t = 0.12[s]$ et disparaît à l'instant $t = 0.23[s]$ avec une amplitude constante égale à 20% par rapport à la valeur nominale de la sortie y_1 .
- Le deuxième défaut injecté sur la sortie $y_2(t)$, se déclenche à l'instant $t = 0.27[s]$ et disparaît à l'instant $t = 0.38[s]$ avec une amplitude constante égale à 15% par rapport à la valeur nominale de la sortie y_2 .
- La Figure (3.20) montre l'effet de ces défauts sur les sorties mesurées par les deux capteurs de courants, et la Figure (3.21) illustre le zoom des signaux de sorties en absence et en présence des défauts.
- Les Figure (3.21)- (3.22) montrent que les défauts sont bien détectés et localisés même en cas de présence de différents défauts grâce à la stratégie proposée.

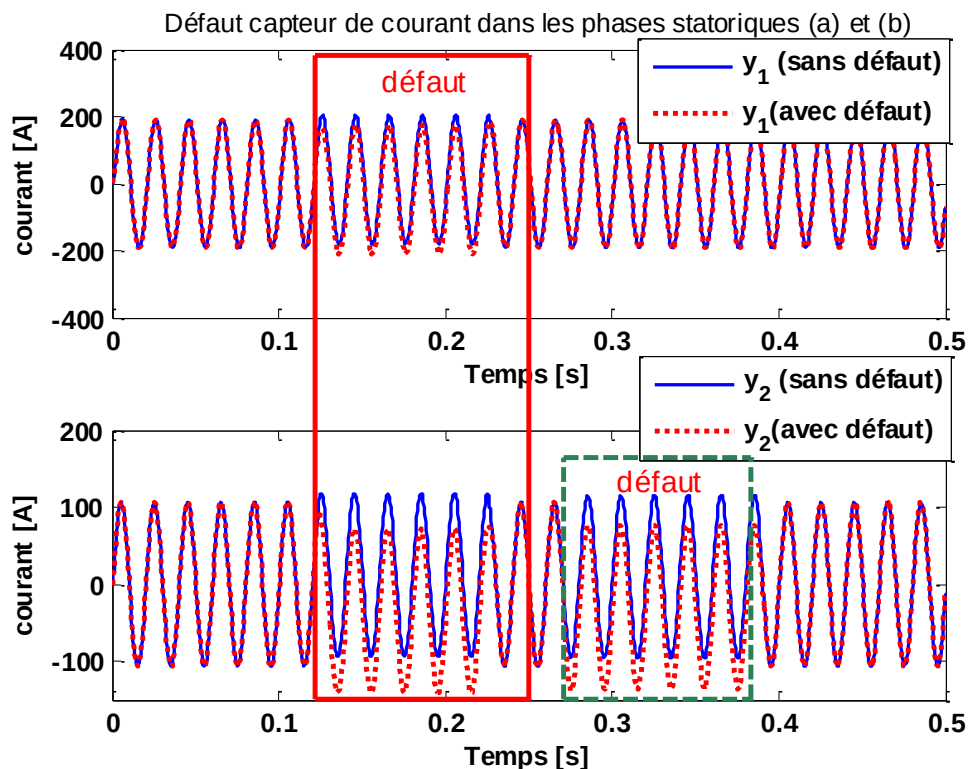


Figure (3.20) : Evolutions des sorties en absence et en présence des défauts.

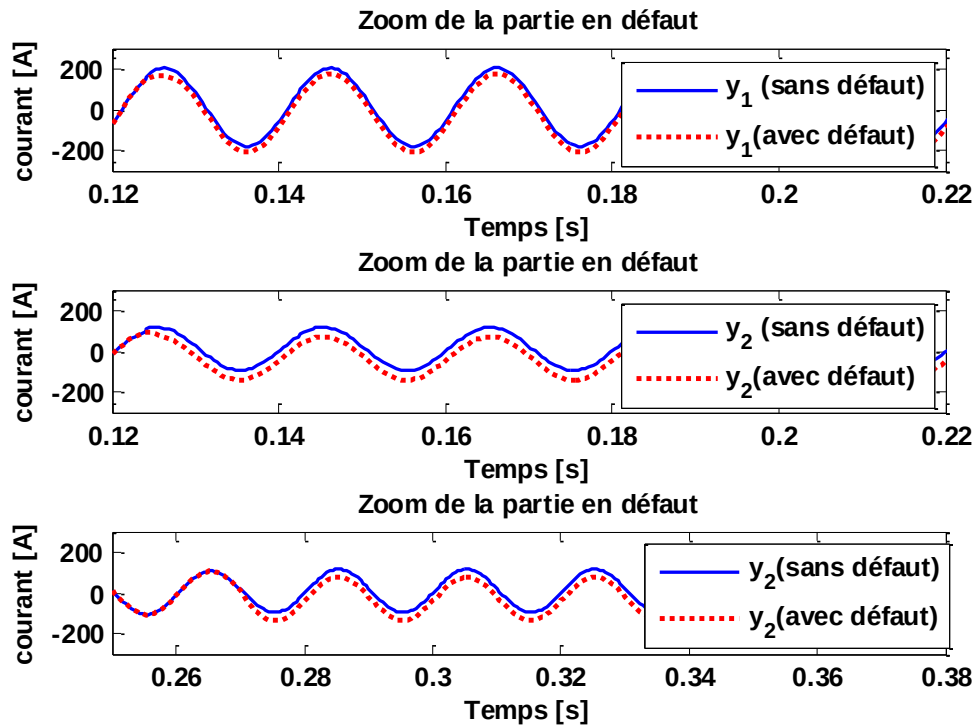


Figure (3.21) : Zoom des sorties en absence et en présence des défauts.

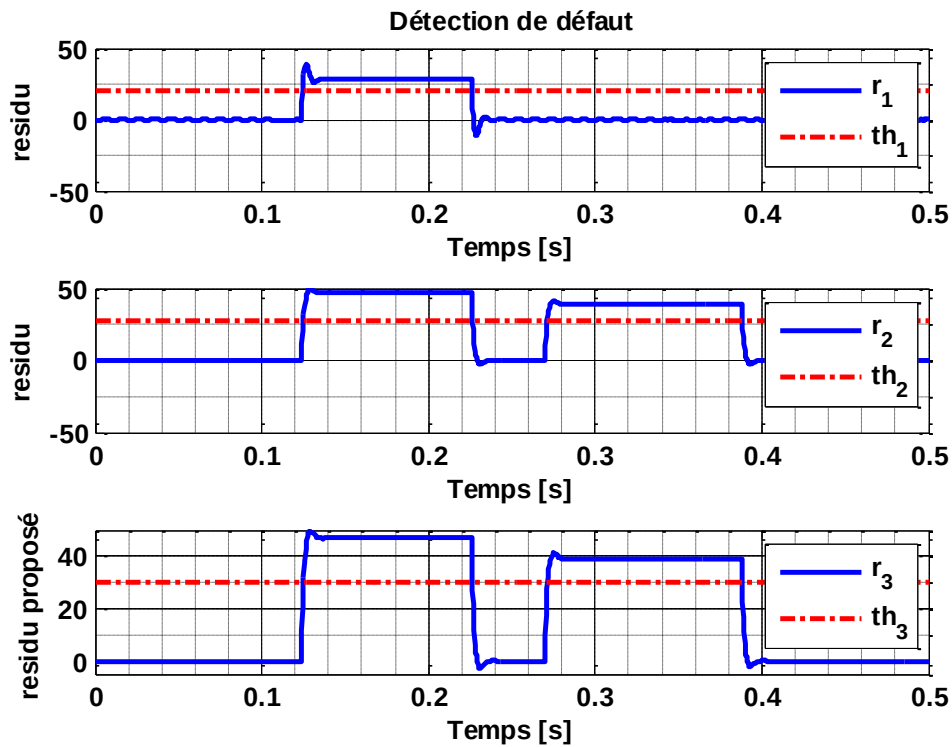


Figure (3.22) : Détection des défauts capteurs de courants dans les deux phases (a) et (b).

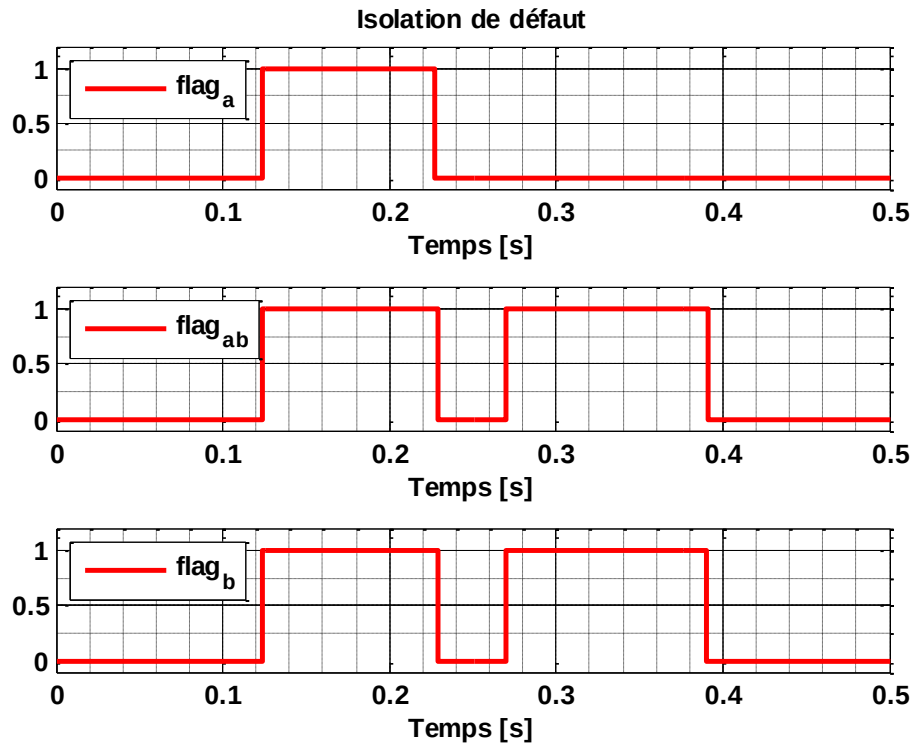


Figure (3.23) : Isolation des défauts capteurs de courants dans les deux phases(a) et (b).

Après avoir terminé toute la série de tests prévus, il est possible de conclure que la stratégie de diagnostic proposée, nous permettent d'aboutir à des résultats très significatifs et satisfaisants pour détecter et localiser les des défauts capteurs dans une seule phase (a ou b) et les deux phases simultanément (a et b) du stator de la GADA.

3.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons introduit les différents concepts relatifs au diagnostic des défauts et présenté les différentes approches proposées dans ce domaine. Deux grandes familles ont été étudiées et détaillées. La première famille regroupe les méthodes basées sur un modèle analytique de la machine (estimation d'état, estimation paramétrique et équation de parité), alors que, la deuxième famille regroupe les méthodes basées sur le traitement du signal et les techniques de l'intelligence artificielle. Ces dernières sont utilisées dans le cas où la modélisation mathématique du système serait complexe ou inexistante.

Notre intérêt dans cette thèse a été porté sur l'étude des méthodes à base de modèle mathématique. Aussi, nous avons présenté la procédure de détection et de localisation des défauts par celles-ci. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur des résidus. De plus, nous avons vu que pour aborder un problème FDI

par ces approches, il est nécessaire de modéliser le système de manière à mettre en évidence l'effet des défauts et des perturbations.

Nous avons présenté différentes méthodes de génération des résidus utilisées pour la détection et l'isolation des défauts qui peuvent apparaître dans un système industriel. Enfin, nous avons présenté le multimodèle de type T-S de la GADA en présence de défauts capteurs de courants dûs à la présence des courts-circuits entre les spires dans les phases statoriques de la GADA. Ensuite, nous avons appliqué la méthode proposée dans divers scénarios de défauts différents lesquels ont abouti à des résultats très significatifs et satisfaisants pour détecter et isoler ces défauts.

Chapitre 4

**Commande FTC proposée en
présence de défauts de creux
de tension**

4.1. INTRODUCTION

Un système réel pendant son fonctionnement peut être affecté par des défauts, ce qui engendre une déviation de son fonctionnement nominal (sa trajectoire de référence), jusqu'à provoquer l'instabilité selon la sévérité du défaut pouvant ainsi mettre en cause la sécurité des opérateurs et provoquer des dégâts matériel et écologique (machines électriques industrielles, centrales nucléaires, véhicules,...). Ces défauts proviennent essentiellement des actionneurs, des capteurs, du contrôleur ou le système lui-même [Blanke *et al.*, 1997]. Pour faire face à ce problème, de nombreuses techniques ont été développées dans la littérature pour garantir la stabilité du système et de maintenir des performances dégradées acceptables en dépit de la présence de perturbations internes et / ou externes (défauts de creux de tension, défaillance d'un capteur de courant, bruits de mesure, ...) et de s'en accommoder de manière automatique [Patton, 1997 ; Blanke *et al.*, 1997].

Une telle commande est dite Commande Tolérante aux Défauts (Fault Tolerant Control : FTC). Son rôle primordial consiste à déterminer une méthode de commande qui possède la propriété de limiter, voire d'annuler, les effets d'un défaut sur les performances du système. En présence d'un défaut de faible gravité, une simple commande robuste peut suffire à maintenir les performances nominales: on parle alors d'accommodation passive du défaut. En revanche, en présence de défauts critiques, un bloc de détection et de localisation du défaut est nécessaire afin de mettre en œuvre une stratégie active de tolérance aux défauts [Aouaouda, 2012].

Pour répondre aux exigences des systèmes tolérants, de nombreuses stratégies ont été proposées. A titre d'exemple, on peut citer les travaux de [Patton, 1997 ; Lopez-Toribio *et al.*, 1999 ; Patton *et* Lopez-Toribio, 2000 ; Noura *et al.*, 2000 ; Niemann *et* Stoustrup, 2003 ; Blanke *et al.*, 2003 ; Jiang *et al.*, 2006 ; Rodrigues *et al.*, 2007 ; Oudghiri, 2008], qui donnent un aperçu général sur la problématique de la commande tolérante aux défauts.

Ce chapitre est consacré au développement d'une technique de synthèse de commande tolérante aux défauts basée sur le formalisme $\mathcal{L}_2$. La technique proposée consiste à employer les observateurs PI de manière à estimer les défauts de creux de tension dans le stator et rotor de la GADA. La commande sera synthétisée en tenant compte du défaut estimé est sa soustraction de la mesure réelle conduit à rajouter un terme dans la loi de commande permettant ainsi la compensation du défaut. Le but de la commande générée est de minimiser l'écart entre les états du système affecté par des défauts et les états d'un modèle de référence.

4.2. METHODES DE COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS

Dans la littérature, on distingue généralement deux stratégies de synthèse des lois de commande tolérantes aux défauts qu'on retrouve souvent sous l'acronyme anglo-saxon : FTCS pour Fault Tolerant Control Systems. Elles sont regroupées en deux grandes familles basées sur deux approches distinctes [Boussaid, 2011]:

- a- l'approche passive (PFTC : Passive Fault Tolerant Control),
- b- l'approche active (AFTC : Active Fault Tolerant Control).

Comme le montre la figure (4.1), la distinction entre les deux approches dépend de la méthode de synthèse, des défauts considérés, du type de redondance présent ainsi que du comportement du système dans le cas dégradé [Khelassi, 2011].

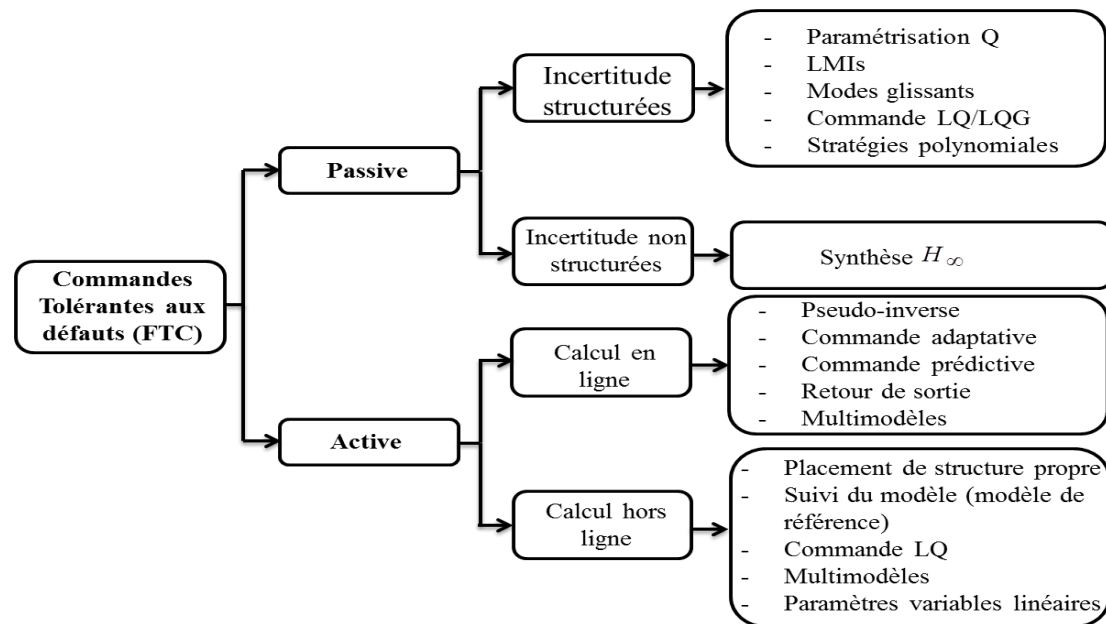


Figure (4.1) : Classification des méthodes tolérantes aux défauts.

4.2.1. Méthodes passives

Dans le cadre de l'approche passive, les régulateurs sont synthétisés de façon à être robustes à certains défauts. L'idée principale est de faire en sorte que le système en boucle fermée soit robuste aux incertitudes et à quelques défauts spécifiques et sans utilisation d'informations en ligne relatives aux différents défauts affectant le système [Boussaid, 2011 ; Khelassi, 2011]. Ce type d'approche n'a besoin ni d'un module de diagnostic pour détecter la présence des défauts ni

d'un bloc de reconfiguration de la loi de commande et/ou des paramètres du système [Aouaouda, 2012]. Dans le cas passif, le système en défaut continue d'opérer avec le même contrôleur et la même structure du système : les objectifs et les performances restent les mêmes que ceux du système nominal. Généralement, dans les approches PFTCS comme illustre sur la Figure (4.2), les défauts sont considérés comme sources d'incertitudes de modèle [Patton, 1997]. Un certain degré de tolérance aux défauts est garanti en se basant sur les techniques classiques de commande robuste [Zhou, 2000; Niemann *et* Stoustrup, 2003 ; Khelassi, 2011]. Plusieurs techniques de commande robuste ont été proposées dans la littérature. Dans [Jamouli, 2003], les auteurs proposent une méthodologie basée sur la minimisation d'un critère de type Linear Quadratic Gaussian (LQG) permettant de synthétiser la loi de commande FTC.

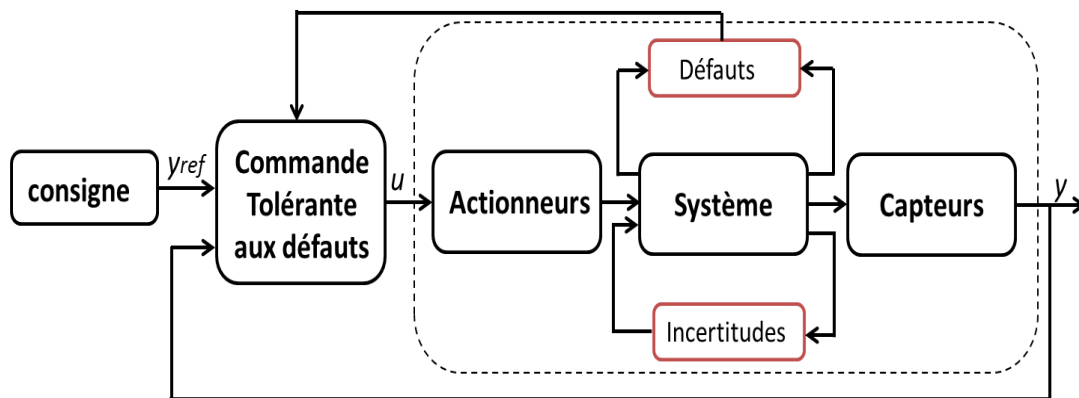


Figure (4.2) : Schéma de principe de la commande (PFTCS).

Dans [Niemann *et* Stoustrup, 2003], les auteurs utilisent la paramétrisation de Youla comme degré de liberté pour réaliser les objectifs de la commande FTC. La minimisation d'un critère H_∞ est aussi le point initial autour duquel l'article [Yang *et al.*, 2001] a été élaboré. Dans [Kouchih *et al.*, 2014 ; Kouchih, 2015], les auteurs utilisent une méthodologie basée sur les techniques de commande non linéaires: Backstepping et mode glissant pour synthétiser une commande FTC. Il s'est avéré que l'utilisation seule de la commande robuste peut être risquée. En effet, sans utilisation d'un module de diagnostic et sans connaissance de l'ampleur du défaut (dépassement en courant, ondulations du couple...), le système passif a alors une faible capacité de tolérance aux défauts.

4.2.2. Méthodes actives

Contrairement à la méthode passive, la méthode active est amenée à réagir aux diverses défaillances du système en reconfigurant les lois de commandes en ligne et en temps-réel tout en

préservant la stabilité et les performances de celui-ci [Patton, 1997 ; Blanke *et al.*, 2003]. Dans certaines circonstances, une dégradation des performances peut être acceptée [Boussaid, 2011]. Cette approche permet alors de traiter des défauts imprévus mais nécessite une méthode efficace de détection et d'isolation des défauts permettant de fournir de manière aussi précise que possible une information sur les défauts éventuels (l'instant d'apparition, le type et l'amplitude du défaut) [Oudghiri, 2008]. L'architecture générale d'une commande FTC active est décrite dans la figure (4.3), les deux blocs Fault detection and isolation (FDI) et FTC, constituent les deux étapes importantes de la commande [Oudghiri, 2008].

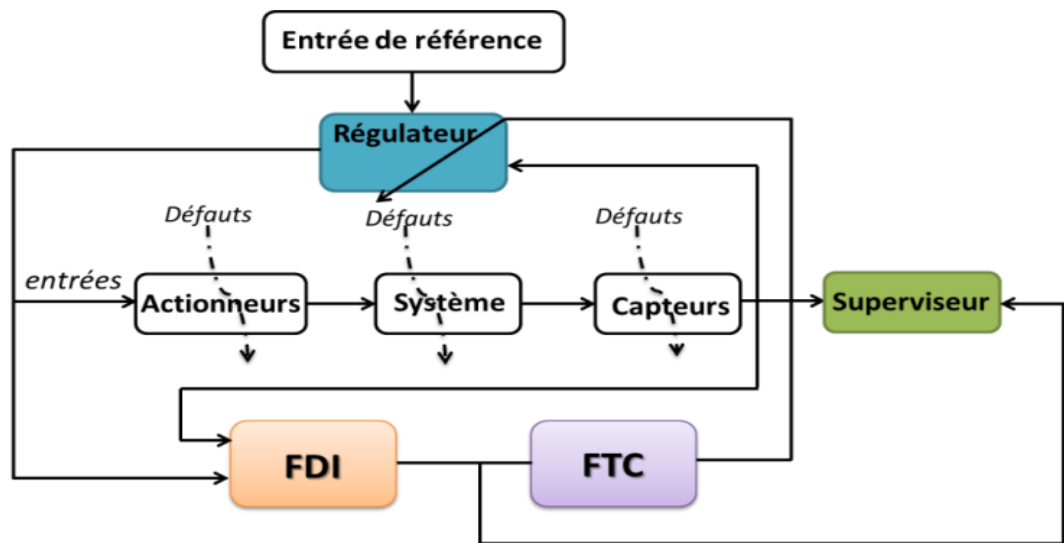


Figure (4.3) : Schéma de principe de la commande (AFTC).

- a- le bloc "FDI" utilise l'entrée et les sorties mesurées du système. Le but principal pour utiliser ce dernier est de détecter et d'estimer le défaut ainsi que les variables d'état du système en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc FDI fournit en ligne les informations concernant le défaut et l'état du système au bloc FTC. Ce schéma de FDI doit permettre de prendre en compte les différents types de défauts intervenant sur le système et d'assurer la stabilité de ses informations pour activer le mécanisme de reconfiguration en un temps minimal.
- b- le bloc FTC se base sur les informations délivrées par le bloc FDI. En fonction du mécanisme utilisé et du type du défaut survenu, il accommode ou reconfigure en ligne la loi de commande afin de maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances initiales.

La Figure (4.3) montre que la commande AFTC contient un superviseur. Son principe est le suivant :

- a- **En absence de défaut** : la commande nominale qui a été déterminée au préalable pour le système "parfait" rejette les perturbations et assure la stabilité du système en boucle fermée. Dans ce cas le bloc FDI ne détecte aucun défaut et la loi de commande ne subit aucun changement.
- b- **En présence de défaut** : le bloc FDI le détecte, l'isole et l'identifie. Ensuite le bloc "FTC" conçoit une nouvelle loi de commande capable de stabiliser le système défectueux.

Généralement, on distingue trois classes différentes :

- a- **l'accommodation des défauts** : dans ce cas, seuls les défauts de faibles amplitudes sont pris en compte. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur et les entrées/sorties entre la loi de commande. Le système à contrôler restent inchangées [Blanke *et al.*, 2003].
- b- **la reconfiguration du système** : elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées [Gao *et* Antsaklis, 1992 ; Zhang *et* Jiang, 1999a ; Kanev *et* Verhaegen, 2002 ; Blanke *et al.*, 2003]. Elle est caractérisée par la modification de la structure du système de façon à compenser le défaut.
- c- **la restructuration** : il s'agit de synthétiser une nouvelle loi de commande en modifiant la structure et les paramètres de cette dernière. Elle est utilisée dans le cas où le problème de commande n'a pas de solution avec l'accommodation et la reconfiguration.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la limitation du temps disponible pour recalculer la nouvelle loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut. Grâce à leurs meilleures performances et leur capacité de traiter une large classe de défauts, les méthodes AFTC sont plus développées dans la littérature que les méthodes passives. Une vue d'ensemble des techniques utilisées est donnée dans le paragraphe suivant.

4.3. METHODES DE SYNTHESE D'UNE LOIS DE COMMANDE TOLERANTES AUX FAUTES ACTIVES

Les méthodes les plus utilisées dans la littérature pour la synthèse d'une loi de commande active tolérante aux défauts sont :

4.3.1. Pseudo-inverse

Cette méthode est l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine de la FTC par approches actives. Elle est caractérisée par sa simplicité de calcul et d'implantation et sa capacité à manipuler une large classe de défauts. Cette approche consiste à synthétiser le gain d'une loi de commande par retour d'état de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée s'approche de celle en fonctionnement nominal, au sens d'une norme. La norme la plus utilisée est la norme de Frobenius [Antsaklis et Gao, 1992; Staroswiecki, 2005a,b; Ciubotaru et al., 2006]. Dans la version de base de la méthode Pseudo-Inverse, un système linéaire nominal est considéré sous la forme :

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

Connaissant le vecteur d'état et sous l'hypothèse d'accessibilité du vecteur d'état du système (4.2), une loi de commande par retour d'état stabilisant le système est donnée par $u(t) = Kx(t)$. Si l'on se place maintenant dans une situation en défaut de manière générale, le système (4.2) s'écrit par une représentation d'état de la forme:

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \\ y_f(t) = C_f x_f(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Où $x_f \in \mathbb{R}^n$, $u_f \in \mathbb{R}^m$ et $y_f \in \mathbb{R}^q$ sont respectivement, le vecteur d'état, $u_f \in \mathbb{R}^m$ le vecteur de commande, le vecteur de sortie en présence de défauts. Alors, la nouvelle loi de commande tolérante aux fautes $u_f(t)$ est de structure équivalente, c'est-à-dire $u_f(t) = K_f x_f(t)$.

La méthode de pseudo-inverse consiste à calculer la matrice de gain de retour d'état K_f de telle sorte que la distance entre la dynamique en boucle fermée, du système nominal et celui défaillant, soit minimisée. Alors, le problème est reformulé comme suit :

$$\begin{cases} K_f = \arg \min \| (A + BK) - (A_f + B_f K_f) \|_F \\ K_f = B_f^+ (A + BK - A_f) \end{cases} \quad (4.3)$$

Où B_f^+ est la matrice pseudo-inverse de B_f . $\|\cdot\|_F$ représente la norme de Frobenius. La Figure (4.4) schématise le principe de cette technique.

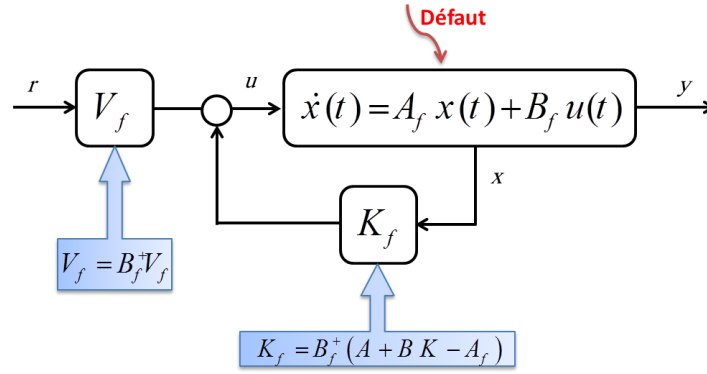


Figure (4.4) : Schéma de principe de la méthode Pseudo-inverse.

Cette approche est caractérisée par sa simplicité, cette approche est très appropriée à une implémentation en ligne. En revanche l'inconvénient majeur de la méthode pseudo-inverse classique réside dans la stabilité du système en fonctionnement dégradé. En effet, le gain de retour K_f minimisant le critère (4.3) n'assure pas forcément la stabilité du système dégradé (4.2) en boucle fermée. Pour pallier à ce problème, des extensions de la méthode ont été proposées dans [Gao et Antsaklis, 1991; Staroswiecki, 2005a]. Ces extensions sont basées sur la recherche d'un ensemble de contrôleurs dits admissibles.

4.3.2. Placement de structure propre

La structure propre du système nominal en boucle fermée peut être considérée comme le facteur le plus important qui doit être rétabli après l'apparition d'un défaut [Patton et Chen, 1991; Jiang, 1994]. Si on considère le cas de la commande avec retour d'état, les valeurs propres du système nominal en boucle fermée sont entièrement recouvertes par la loi de commande par retour d'état reconfigurée :

$$K_f = (S - A_f V_f)(C_f V_f)^{-1} \quad (4.4)$$

Où la matrice des vecteurs propres est définie par $V_f = (v_f^1, v_f^2, \dots, v_f^{\max(p,m)})$, et la matrice concernant les valeurs propres est $S = (\lambda_f^1 s^1, \lambda_f^2 s^2, \dots, \lambda_f^r s^{\max(p,m)})$ avec les paramètres s^i sont définis dans [Jiang, 1994].

La stabilité en boucle fermée peut être assurée, et par conséquent les valeurs propres en boucle fermée satisfont l'équation :

$$\begin{aligned}\lambda_{f,i} &= \lambda(A_f - B_f K_f C_f) \\ &= \lambda_i = \lambda(A + BKC), \quad i = 1, \dots, \max(n_y, n_u)\end{aligned}\quad (4.5)$$

Les vecteurs propres en boucle fermée du système reconfiguré sont les plus proches possible de celles du système nominal.

$$v_{f,i} = (\lambda_{f,i} I - A_f)^{-1} B_f K_f C_f v_{f,i} \quad (4.6)$$

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que les erreurs de modèles ainsi que les incertitudes relatives au processus de diagnostic ne sont pas aisément incorporables dans le calcul.

4.3.3. Multimodèles de T-S

Ces méthodes sont basées sur un ensemble fini de modèles locaux linéaires reliés par des fonctions d'activation. Cet ensemble décrit le système dans des conditions de fonctionnement nominales et défaillantes. L'objectif des approches multimodèles de la commande tolérante aux défauts est de synthétiser en ligne une loi de commande à appliquer à travers une combinaison pondérée des différentes lois de commande issues des correcteurs pré-calculés [Khelassi, 2011]. Dans ce cas, la loi de commande est déterminée à partir de n lois de commandes calculées pour toutes les situations possibles du système, décrites par un ensemble de n modèles. Le premier modèle correspond au fonctionnement nominal du système. Les autres situations prennent en compte l'apparition d'un défaut particulier, entraînant le système en dehors de sa zone de fonctionnement nominal. Les matrices de gain K_i de la commande sont calculées à l'avance pour chacun des modes de fonctionnement. La commande locale u_i est déterminée par la relation [Benzineb, 2010]:

$$u_i = K_i \hat{x}_i \quad (4.7)$$

4.3.4. Commande adaptative

Cette technique de commande est 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]. Néanmoins, l'un des inconvénients de ces approches réside dans la difficulté de déterminer les matrices de pondération nécessaires au compromis stabilité /performance. Ainsi, les différentes situations étudiées ne font souvent intervenir que des défauts peu sévères et la présence de bruits n'est pas prise en compte.

4.3.5. Commande prédictive à base de modèle

L'intérêt de cette méthode consiste à résoudre un problème de commande optimale en ligne et à chaque pas de temps. Il s'agit de déterminer l'action de commande qui minimise un critère quadratique pondéré de l'erreur de consigne et de la commande. Le but principal de cette approche dans le contexte FTC est de pouvoir modifier en ligne les différentes contraintes de contrôle avec un nombre limité de paramètres, de façon à assurer un niveau de performance acceptable du système bouclé en présence de défauts [Kerrigan et Maciejowski, 1999; Maciejowski et Jones, 2003]. On notera tout de même que l'utilisation de la commande MPC nécessite une optimisation en ligne, exigeant une grande puissance de calcul. De plus, cette méthode est valable sous certaines hypothèses : le modèle d'un défaut et ses effets sur le système doivent être parfaitement connus, les défauts considérés doivent être de faible amplitude de telle sorte que les objectifs de commande puissent rester inchangés après l'apparition d'un défaut [Maciejowski, 2003].

4.3.6. Commande tolérante aux défauts par poursuite de trajectoire

Une autre technique intéressante consiste à considérer un modèle de référence correspondant au modèle de bon fonctionnement du système (nominal) [Aouaouda, 2012]. La commande à construire dans ce cas est généralement composée de deux termes : le premier est un retour d'état classique et le second est relatif à l'erreur de poursuite entre la trajectoire de référence et celle du système [Ichlal, 2009 ; Nagy Kiss, 2010 ; Aouaouda, 2012]. Le but est alors de minimiser l'erreur de poursuite de trajectoire ce qui conduit à forcer le système en défaut à se comporter comme le système de référence sans défaut. Cette technique fera l'objet de notre étude en présence de défauts de creux de tension.

4.3.7. Atténuation des perturbations par la norme $\mathcal{L}_2$

L'estimation d'état utilise de façon classique un modèle du système et des mesures collectées sur ce dernier. Cependant, si le modèle du système est imparfait et notamment si les perturbations n'ont pas été prises en compte dans la description, la convergence vers zéro de l'erreur d'estimation d'état ne peut pas être assurée. À cet effet, la norme $\mathcal{L}_2$ extension directe de

la norme H_∞ [Weinmann, 1991; Van der Schaft, 1992] peut être employée afin d'évaluer l'erreur d'estimation et ceci en particulier pour les systèmes à paramètres variables dans le temps. Plus particulièrement, grâce à cette norme, on peut quantifier une borne supérieure du gain entre l'énergie de l'entrée et celle de la sortie pour toutes les trajectoires paramétriques admissibles du système [Bara, 2001].

Définition 4.1. La norme d'un signal $x(t)$ de carré intégrable est notée et définie par :

$$\|x(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty x^T(t)x(t)dt} \quad (4.8)$$

Définition 4.2. La norme $\mathcal{L}_2$ induite d'un système est définie par

$$\sup_{\|u(t)\|_2 \neq 0} \frac{\|y(t)\|_2}{\|u(t)\|_2} \quad (4.9)$$

4.4. IMPACT DE CREUX DE TENSION SUR LA GADA

L'exploitation de l'énergie éolienne nécessite des contrôles similaires à ceux exigés dans les centrales classiques pour produire l'électricité. Elles sont basées essentiellement sur la réalisation d'une opération robuste et fiable du réseau d'électricité [Ouyessaad, 2014]. L'une de ces exigences est la capacité des génératrices des éoliennes à rester connecté au réseau en cas d'un creux de tension (chute ou augmentation de la tension dans le stator ou rotor). Cela vaut particulièrement pour les génératrices à vitesse variable, qui sont souvent situées dans des régions rurales et connectées au réseau. Ainsi elles sont facilement affectées par des divers défauts. Les défauts dans le système d'alimentation, même très loin de la génératrice, peuvent avoir comme conséquence des perturbations de courte durée sur la tension. Cet évènement est critique pour les génératrices et qui peut mener à la déconnexion du système éolien. Pour un système électrique avec une production élevée d'énergie éolienne, ceci ne peut pas être toléré car ces défauts peuvent aggraver l'instabilité du réseau comme ce fut le cas lors de l'incident conduisant à l'écroulement du réseau en Italie [Merlin, 2004].

Pour surmonter ce problème, plusieurs études ont été effectuées ces dernières années pour la protection des génératrices d'un tel phénomène, pour garantir un bon fonctionnement du système éolien et augmenter leur fiabilité et rentabilité. Une modélisation des creux de tension est proposée par Ling sur l'impact des courants du rotor de la génératrice pendant une chute ou une augmentation de la tension du réseau [Lin et al., 2013].

Dans le même contexte, des travaux sont publiés avec l'introduction des lois de commande et de contrôle qui ont été réalisées par [Rah et Parniani, 2010]. Des solutions ont été proposées dans [Lim *et al.*, 2008] pour éviter l'endommagement de la génératrice pendant un creux de tension. L'objectif principal de ces solutions est la déconnexion du système pendant un creux de tension pour : limiter les courants de la génératrice et des convertisseurs de puissance, ainsi que sur le voltage du bus continu des convertisseurs, par l'intermédiaire des circuits auxiliaires qui se détachent du système. Toutefois, ce type de solution implique l'installation des dispositifs supplémentaires dans le système, ce qui va augmenter les coûts et réduire sa fiabilité et va rendre le système plus complexe. Les auteurs dans [Lop *et al.*, 2008] ont étudiés le comportement d'une génératrice asynchrone à double alimentations, pendant un creux de tension asymétrique et explique pourquoi ces types de défauts sont plus nuisibles que les creux de tension symétriques, ainsi que leur influence pendant leur apparition sur le système. En d'autres termes, le principal inconvénient de ces génératrices est leurs grandes sensibilités aux perturbations du réseau, en particulier aux creux de tension dans le stator ou rotor.

4.5. STRATEGIE PROPOSEE DE COMMANDE FTC PAR TRAJECTOIRES DE REFERENCE

Plusieurs techniques pour la surveillance et le diagnostic des défauts dans les systèmes dynamiques ont été développées ces dernières années. Cependant, la plupart de ces techniques sont basées sur la surveillance du procédé seul sans la prise en compte de son interaction avec le système de commande. L'objectif de cette partie est de proposer une stratégie de synthèse de commande tolérante aux défauts pour le multimodèles de T-S de la GADA sous forme standard tout en tenant compte des perturbations externes (creux de tension) lors de la synthèse de la loi de commande. Cette dernière permette de s'accommoder automatiquement de l'effet de certains types de défauts apparaissent aux niveaux des actionneurs tout en étant capable de maintenir la stabilité de ce dernier et d'éviter les situations catastrophiques. La stratégie proposée consiste à utiliser les observateurs Proportionnel Intégral (PI) de type T-S de manière à estimer les défauts en ligne. La commande sera synthétisée en tenant compte du défaut estimé. L'objectif est alors de minimiser l'erreur de poursuite de trajectoire ce qui conduit à forcer le système en défaut à se comporter comme le système de référence sans défaut (modèle de référence).

4.5.1. Modèle de la GADA en présence de défaut de creux de tension

Considérons le multimodèle de type T-S de la GADA en absence de défauts (modèle de référence) décrit par la structure multimodèles de T-S:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (4.10)$$

Où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrées, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie, $\{A_i, B_i, C\}$ sont les matrices des sous-systèmes linéaires décrivant la partie nominale du système T-S considéré. La modélisation des défauts pouvant affectés le système permet d'écrire le système (4.10) en présence de défauts de creux de tension et de des perturbations externes (bruits de mesures) sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i x_f(t) + B_i (u_f(t) + f(t))) \\ y_f(t) = C x_f(t) + G d(t) \end{cases} \quad (4.11)$$

Où $x_f(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du système en défauts, $u_f(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrées du système en défauts, $y_f(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie du système en défauts. Le vecteur de défauts $f(t) = [f_1(t) f_2(t) f_3(t) f_4(t)]^T$ (défauts dans le stator et rotor qui sont causés par le creux de tension), et $d(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur des perturbations externes.

Hypothèse 4.1.

Dans cette section nous considérons que les hypothèses suivantes sont vérifiées:

- la stabilité entrée-état du système (4.10) est vérifiée,
- les perturbations externes $d(t)$ sont bornées.

4.5.2. Etapes de synthèse de la loi de commande FTC

Le but principal ici est de concevoir une loi de commande $u_f(t)$ telle que l'état du système $x_f(t)$ en défaut converge vers l'état de référence $x(t)$ donné par le modèle de référence (4.10), comme le montre sur la Figure (4.5).

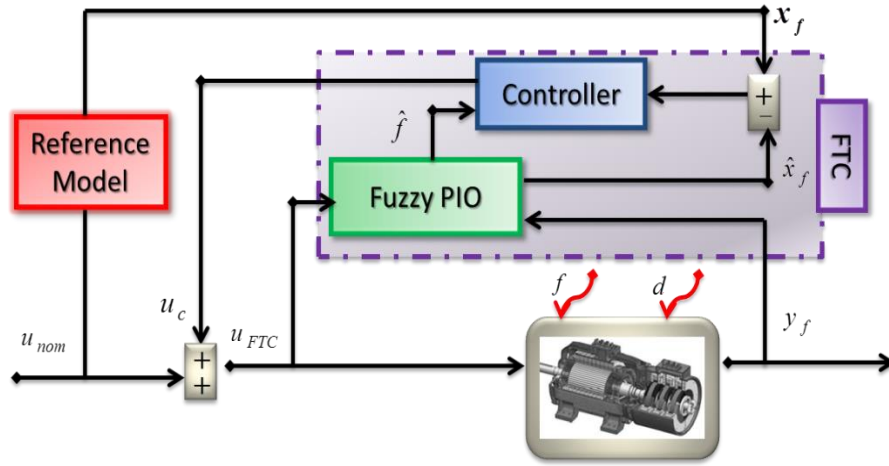


Figure (4.5) : Stratégie de la commande tolérante aux défauts par trajectoire de références.

La loi de commande développée s'écrit sous la forme [Abdelmalek *et al.*, 2016(c)-(d)]:

$$\begin{cases} u_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(-\hat{f}_i + K_i e_t(t) + u(t) \right) \\ e_t(t) = x(t) - x_f(t) \end{cases} \quad (4.12)$$

Où la matrice des gains (K_i) est déterminée pour assurer la stabilité du système et minimiser l'écart entre $x_f(t)$ et $x(t)$. L'analyse de la loi de commande développée dans (4.12) exige la connaissance du vecteur de défauts $f(t)$ directement via son estimation. Cette estimation est obtenue à travers un observateur proportionnel intégral (PI) de type T-S qui estime simultanément l'état du système en présence de défauts ainsi que le vecteur de défauts.

La structure de l'observateur PI de type T-S est donnée sous la forme suivante [Abdelmalek *et al.*, 2015(a)-(b)]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(A_i \hat{x}_f(t) + B_i (u_f(t) + \hat{f}(t)) + K_{pi} e_y(t) \right) \\ \dot{\hat{f}}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(K_{di} e_y(t) \right) \\ \hat{y}_f(t) = C \hat{x}_f(t) \\ e_y(t) = y_f(t) - \hat{y}(t) \end{cases} \quad (4.13)$$

Où $K_{pi} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ représente la matrice des gains proportionnels, $K_{di} \in \mathbb{R}^{m \times p}$ est la matrice des gains intégral de l'observateur PI.

Les erreurs d'estimation d'état et de défaut sont données respectivement par :

$$e_s(t) = x_f(t) - \hat{x}_f(t) \quad (4.14)$$

$$e_f(t) = f(t) - \hat{f}(t) \quad (4.15)$$

L'erreur de poursuite d'état est également définie par :

$$e_t(t) = x(t) - x_f(t) \quad (4.16)$$

L'addition et la soustraction du terme $K_i x_f(t)$ dans l'équation (4.12) permet d'écrire :

$$u_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(-\hat{f}(t) + K_i e_t(t) + K_i e_s(t) + u(t) \right) \quad (4.17)$$

Les dynamiques des erreurs $e_t(t)$, $e_s(t)$ définies précédemment dans (4.16) et (4.14), sont définies par les équations suivantes :

$$\dot{e}_t(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left((A_i - B_i K_i) e_t(t) - B_i K_i e_s(t) - B_i e_f(t) \right) \quad (4.18)$$

$$\dot{e}_s(t) = \dot{x}_f(t) - \dot{\hat{x}}_f(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left((A_i - K_{pi} C) e_s(t) + B_i e_f(t) - K_{pi} G d(t) \right) \quad (4.19)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation de défaut (4.15) est donnée par :

$$\dot{e}_f(t) = \dot{f}(t) - \dot{\hat{f}}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(-K_{2i} C e_s(t) + \dot{f}(t) - K_{di} G d(t) \right) \quad (4.20)$$

Sous la condition de défaut constant, l'équation (4.20) est réécrit par :

$$\dot{e}_f(t) = \dot{f}(t) - \dot{\hat{f}}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left(-K_{2i} C e_s(t) - K_{di} G d(t) \right) \quad (4.21)$$

La concaténation de l'erreur de poursuite, l'erreur d'estimation d'état et de défauts permet de réécrire la dynamique de la boucle fermée sous forme redondante.

Nous considérons le vecteur d'état augmenté suivant:

$$e_{ftc}^T(t) = \begin{pmatrix} e_t(t) \\ e_s(t) \\ e_f(t) \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Notons que celui-ci introduit un degré de liberté supplémentaire (signal d'erreur de sortie), dit redondant.

A partir de (4.18), (4.19), (4.21) et de (4.22), la dynamique de la boucle fermée redondante est réécrite sous la forme suivante :

$$\dot{e}_{ftc}^T(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\tilde{A}_i e_{ftc}^T(t) + \tilde{B}_i \Upsilon(t)) \quad (4.23)$$

Où :

$$\dot{e}_{ftc}^T(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}_t(t) \\ \dot{e}_s(t) \\ \dot{e}_f(t) \end{bmatrix}, \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} (A_i - B_i K_i) & -B_i K_i & -B_i \\ 0 & (A_i - K_{pi} C) & B_i \\ 0 & -K_{di} C & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -K_{pi} G & 0 \\ -K_{di} G & I \end{bmatrix}, \Upsilon(t) = d(t) \quad (4.24)$$

Les gains K_i , K_{pi} et K_{di} de la commande tolérante aux défauts et de l'observateur PI, respectivement, sont déterminés par analyse de la stabilité du système augmenté (4.23), suivant les conditions de stabilité proposées, en utilisant une fonction de Lyapunov quadratique $V(e_{ftc}(t)) = e_{ftc}^T(t) P e_{ftc}(t)$, avec P une matrice de taille $(n \times n)$, symétrique et définie positive.

- **Conditions proposées sous forme LMIs pour garantir la stabilité:** le système augmenté (4.23) représentant les erreurs de poursuite $e_t(t)$, d'estimation d'état $e_s(t)$ et de défaut $e_f(t)$ est asymptotiquement stable et le gain du transfert de $\Upsilon(t)$ vers e_{ftc} est borné s'il existe des matrices symétriques et définies positives $X = X^T \geq 0$, $P_2 = P_2^T \geq 0$, $P_3 = P_3^T \geq 0$ et des matrices Y_i , $\bar{K}_{pi}$, $\bar{K}_{di}$ et un taux d'atténuation est obtenu en résolvant le problème d'optimisation suivante:

$$\min_{X, P_2, P_3, \bar{K}_{pi}, \bar{K}_{di}, Y_i} \bar{\gamma} \quad (4.25)$$

Sachant que :

$$\Pi_{ij} \prec 0, i = 1, \dots, r \quad (4.26)$$

Où :

$$\Pi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{12}^T & \Pi_{22} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

D'où:

$$\Pi_{11} = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{12}^T & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{13}^T & \Theta_{23}^T & \Theta_{33} \end{bmatrix}, \Pi_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\bar{K}_{pi}^T G & 0 \\ \bar{K}_{di}^T G & P_3 \end{bmatrix}, \Pi_{21} = \Pi_{12}^T \text{ et } \Pi_{22} = -\begin{bmatrix} \bar{\gamma} I & 0 \\ 0 & \bar{\gamma} I \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \Theta_{11} = X A_i^T + A_i X - B_i Y_i - Y_i^T B_i^T + X X \\ \Theta_{12} = -B_i Y_i \\ \Theta_{13} = -B_i X \\ \Theta_{21} = \Theta_{12}^T \end{cases} \quad \begin{cases} \Theta_{22} = P_2^T A_i - \bar{K}_{pi}^T C + I \\ \Theta_{23} = P_2^T B_i - C^T \bar{K}_{di}^T \\ \Theta_{31} = \Theta_{13}^T \\ \Theta_{32} = \Theta_{23}^T \\ \Theta_{33} = I \end{cases}$$

Où 0 est une matrice nulle de dimension appropriée. Donc, les matrices de commande tolérante aux défauts et d'observateur PI et sont calculées, respectivement comme suit :

$$\begin{cases} P_1 = X^{-1} \\ K_i = Y_i X^{-1} \\ K_{pi} = P_2^{-1} \bar{K}_{pi} \\ K_{di} = P_3^{-1} \bar{K}_{di} \end{cases} \quad (4.28)$$

Et un taux d'atténuation γ est obtenu par :

$$\gamma = \sqrt{\bar{\gamma}} \quad (4.29)$$

- **Démonstration:**

Les gains K_i , K_{pi} et K_{di} sont obtenus par l'étude de la stabilité du système augmenté (4.12) en choisissant une fonction de Lyapunov quadratique donnée par :

$$V(e_{ftc}(t)) = e_{ftc}^T(t) P e_{ftc}(t) \quad (4.30)$$

Avec P une matrice symétrique et définie positive de la forme suivante :

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (4.31)$$

Le système augmenté (4.23) est asymptotiquement stable si la dérivée de la fonction de Lyapunov le long des trajectoires du modèle est négative [Boyd *et al.*, 1994] :

$$\dot{V}(e_{ftc}(t)) = \dot{e}_{ftc}^T(t) P e_{ftc}(t) + e_{ftc}^T(t) P \dot{e}_{ftc}(t) < 0 \quad (4.32)$$

C'est-à-dire, si :

$$\dot{V}(e_{ftc}(t)) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) \left(e_{ftc}^T(t) (\tilde{A}_i^T P + P^T \tilde{A}_i) e_{ftc}(t) + e_{ftc}^T(t) (P \tilde{B}_i) \Upsilon(t) + \Upsilon^T(t) (\tilde{B}_i^T P) e_{ftc}(t) \right) < 0 \quad (4.33)$$

En se basant sur les hypothèses 4.1, le terme $d(t)$ est borné, ce qui permet d'appliquer l'approche $\mathcal{L}_2$ pour garantir à la fois la stabilité du système (4.23) et la minimisation de l'influence de $\Upsilon(t)$ sur l'erreur d'estimation d'état $e_{ftc}(t)$, avec $\Upsilon(t) = d(t)$. Le but est d'atténuer l'effet de l'entrée perturbatrice $\Upsilon(t)$ sur le vecteur d'état augmenté $e_{ftc}(t)$.

$$\frac{\|e_{ftc}(t)\|_2}{\|\Upsilon(t)\|_2} \leq \gamma = \int_0^\infty e_{ftc}^T(t) e_{ftc}(t) dt - \gamma^2 \int_0^\infty \Upsilon^T(t) \Upsilon(t) dt \leq 0, \Upsilon(t) \neq 0, \gamma > 0 \quad (4.34)$$

Ainsi, en assurant la stabilité du système augmenté (4.23), il est nécessaire de satisfaire la condition suivante [Boyd *et al.*, 1994]:

$$\dot{V}(e_{ftc}(t)) + e_{ftc}^T(t) e_{ftc}(t) - \gamma^2 \Upsilon^T(t) \Upsilon(t) < 0 \quad (4.35)$$

Par substitution de $\dot{V}(e_{fc}(t))$ (4.33) dans l'équation (4.35), on obtient :

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left\{ e_{fc}^T(t) (\tilde{A}_i^T P + P^T \tilde{A}_i) e_{fc}(t) + e_{fc}^T(t) (P \tilde{B}_i) \Upsilon(t) + \Upsilon^T(t) (\tilde{B}_i^T P) e_{fc}(t) \right\} + e_{fc}^T(t) e_{fc}(t) - \gamma^2 \Upsilon^T(t) \Upsilon(t) < 0 \quad (4.36)$$

L'inégalité (4.35) se réécrit sous la forme quadratique :

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \left\{ \begin{bmatrix} e_{fc}(t) \\ \Upsilon(t) \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} \tilde{A}_i^T P + P^T \tilde{A}_i + I & P \tilde{B}_i \\ \tilde{B}_i^T P & -\gamma^2 I \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_{fc}(t) \\ \Upsilon(t) \end{bmatrix} \right\} < 0 \quad (4.37)$$

D'où (4.35) est vérifiée si et seulement si:

$$\begin{pmatrix} \tilde{A}_i^T P + P^T \tilde{A}_i + I & P \tilde{B}_i \\ \tilde{B}_i^T P & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (4.38)$$

Après développement mathématique l'inégalité (4.38) sera reformulé par:

$$\begin{pmatrix} P_1^T (A_i - B_i K_i) + (A_i - B_i K_i)^T P_1 + I & -P_1^T B_i K_i & -P_1^T B_i & 0 & 0 \\ -(B_i K_i)^T P_1 & P_2 (A_i - K_{pi} C) + I & P_2^T B_i - (K_{di} C)^T P_3 & -P_2 (K_{pi} G) & 0 \\ -B_i^T P_1 & P_3^T (K_{di} C) + B_i^T P_2 & I & P_3 (K_{di} G) & P_3 \\ 0 & -(K_{pi} G)^T P_2^T & (K_{di} G)^T P_3 & -\gamma^2 I & 0 \\ 0 & 0 & P_3^T & 0 & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (4.39)$$

En multipliant (4.39) à droite et à gauche par :

$$Diagonal \left([X \ I \ I \ I \ I]^T \right) \quad (4.40)$$

Après application des changements de variables suivantes :

$$\begin{cases} P_1 = X^{-1} \\ Y_i = K_i X \end{cases} \text{ et } \begin{cases} \bar{K}_{pi} = P_2 K_{pi} \\ \bar{K}_{di} = P_2 K_{di} \end{cases} \quad (4.41)$$

Alors, l'inégalité (4.39) devient :

$$\begin{pmatrix} X A_i^T + A_i X - B_i Y_i - Y_i^T B_i^T + X X & -B_i Y_i & -B_i X & 0 & 0 \\ -(B_i Y_i)^T & P_2 A_i - \bar{K}_{pi} C + I & P_2^T B_i - C^T \bar{K}_{di}^T & -\bar{K}_{pi} G & 0 \\ -(B_i X)^T & B_i^T P_2 - K_{di}^T C & I & \bar{K}_{di} G & P_3 \\ 0 & -(\bar{K}_{pi} G)^T & (\bar{K}_{di} G)^T & -\gamma^2 I & 0 \\ 0 & 0 & P_3^T & 0 & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < (0.42)$$

Enfin en appliquant le complément de Schur [Boyd *et al.*, 1994] (Annexe A), en effectuant le changement de variable $\gamma = \sqrt{\gamma}$, ce qui résulte aux inégalités présentées par les Conditions de stabilité proposées.

4.5.3. Résultats de simulations et interprétations

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus à partir de l'application de la stratégie de commande FTC proposée dans le cas des différents types de défauts actionneurs (défauts constants et variables). Ces défauts sont considérés comme des défauts de creux de tension qui apparaissent au niveau des signaux de commande de la GADA.

Nous visualiserons les états de la GADA en présence des défauts actionneurs ainsi que les défauts avec leurs estimations. Dans un premier temps, nous donnerons les résultats de simulation en présence de différents défauts (constants et multiples) dans les actionneurs. Ensuite, nous illustrerons le cas des défauts variables et multiples, et finalement nous montrerons l'efficacité de la méthodologie proposée en présence de défauts multiples ou simultanés dans les actionneurs.

a- Défauts constants

Nous avons introduit des défauts multiples et constants, comme définit dans les cas suivants:

➤ Présence des défauts multiples dans le 3^{ème} et le 4^{ème} actionneurs

Dans ce cas, pour illustrer les défauts multiples, nous avons introduit un premier défaut f_3 sur le troisième actionneur (u_3) et un second défaut f_4 sur le quatrième actionneur (u_4).

- l'amplitude de f_3 égalé 20% par rapport à la valeur nominale de la commande (u_3), est apparait dans l'intervalle du temps [0.08-0.32 s].
- l'amplitude de f_4 égalé 10% par rapport à la valeur nominale de la commande (u_4), est apparait dans l'intervalle du temps [0.12- 0.38s].

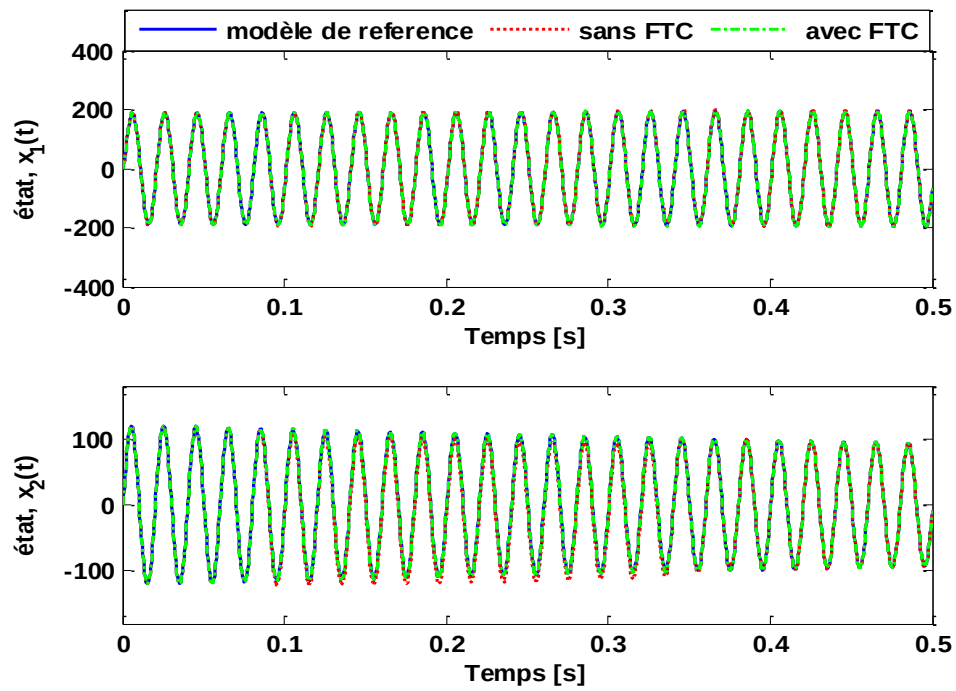


Figure (4.6) : Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimées et états avec FTC.

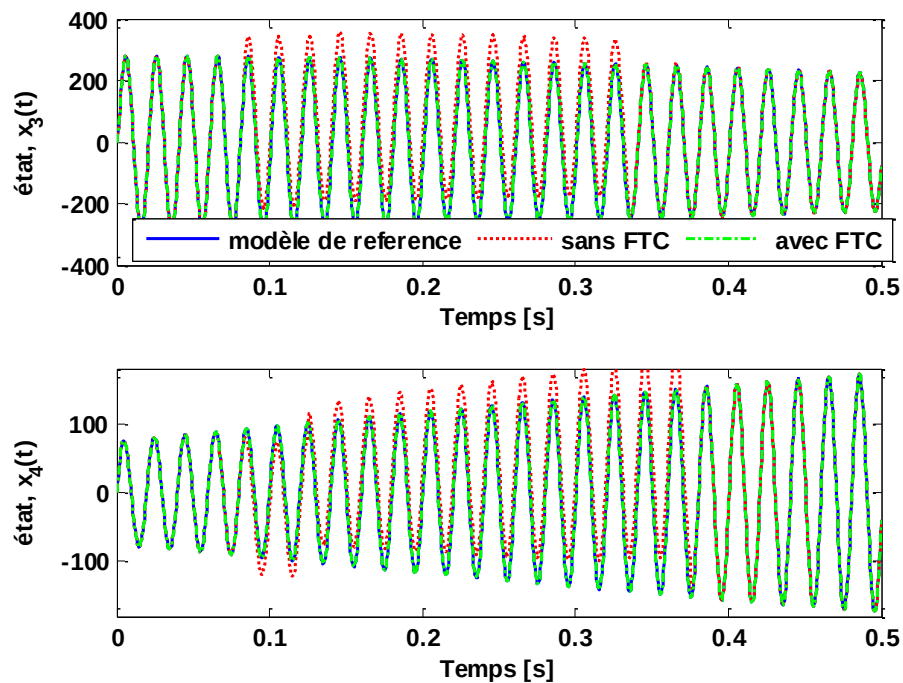


Figure (4.7) : Comparaison entre les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimées et états avec FTC.

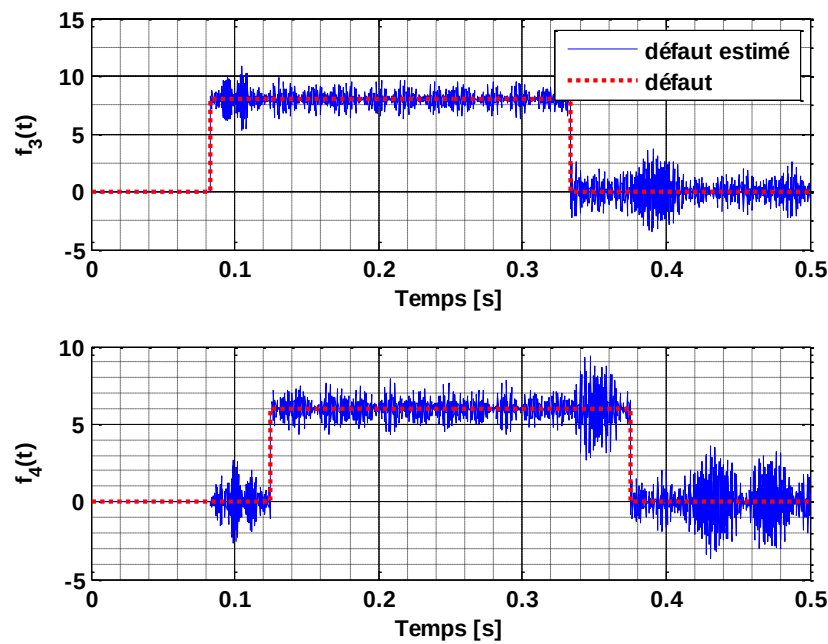


Figure (4.8) : Comparaison des défauts (f_3 et f_4) et leurs estimations.

- Les figures (4.6) et (4.7) illustrent la dynamique temporelle d'états du modèle de référence, états en absence de la commande tolérante au défaut proposée (sans FTC), et états en présence de la commande tolérante au défaut proposée (avec FTC). A partir de ces figures, on constate que la stratégie proposée a compensé les défauts et a permis au système d'atteindre son objectif même en présence des défauts.

La figure (4.8) montre l'évolution des défauts (f_3 et f_4) ainsi que leurs estimations. D'après cette figure, nous pouvons dire que l'estimation des défauts est aussi très satisfaisante.

➤ **Présence des défauts multiples et simultanés dans le 1^{ème} et le 2^{ème} actionneurs**

Dans ce cas, nous avons introduit un premier défaut f_1 sur le premier actionneur (u_1) et un second défaut (f_2) sur le deuxième actionneur (u_2).

- l'amplitude de f_1 égalé 15 % par rapport à la valeur nominale de la commande (u_1), est apparait dans l'intervalle du temps [0.12-0.30s].
- l'amplitude de f_2 égalé 10% par rapport à la valeur nominale de la commande (u_2), est apparait dans l'intervalle du temps [0.17- 0.38s].

Les résultats de simulations présentés dans les figures (4.9), (4.10) et (4.11) montrent l'efficacité de la stratégie proposée en termes de reconfiguration de la loi de commande ainsi que l'estimation des défauts.

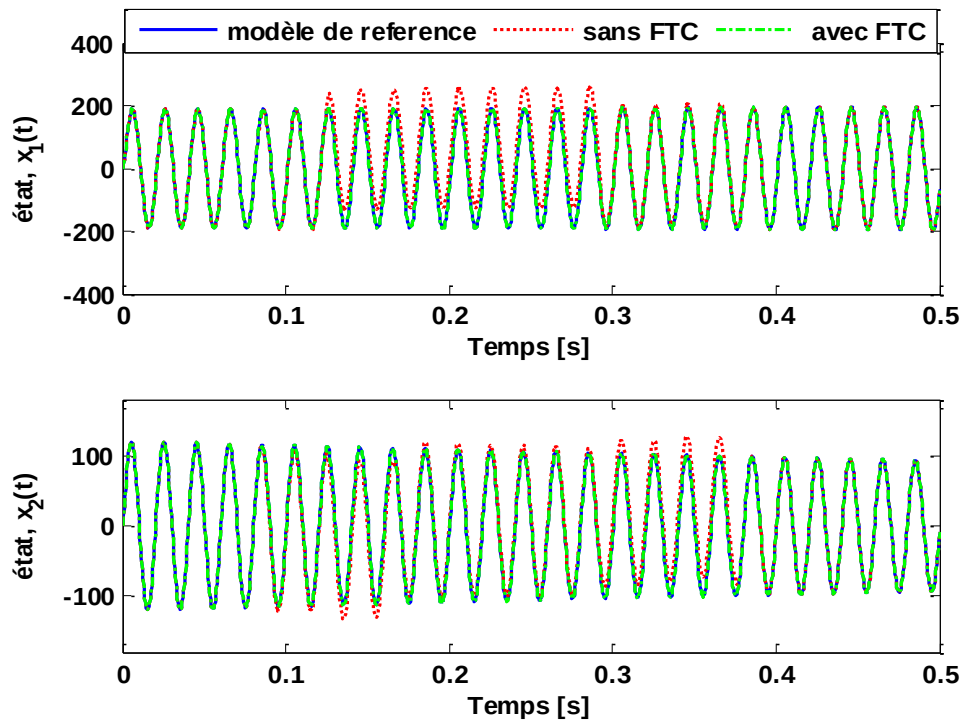


Figure (4.9) : Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états avec FTC.

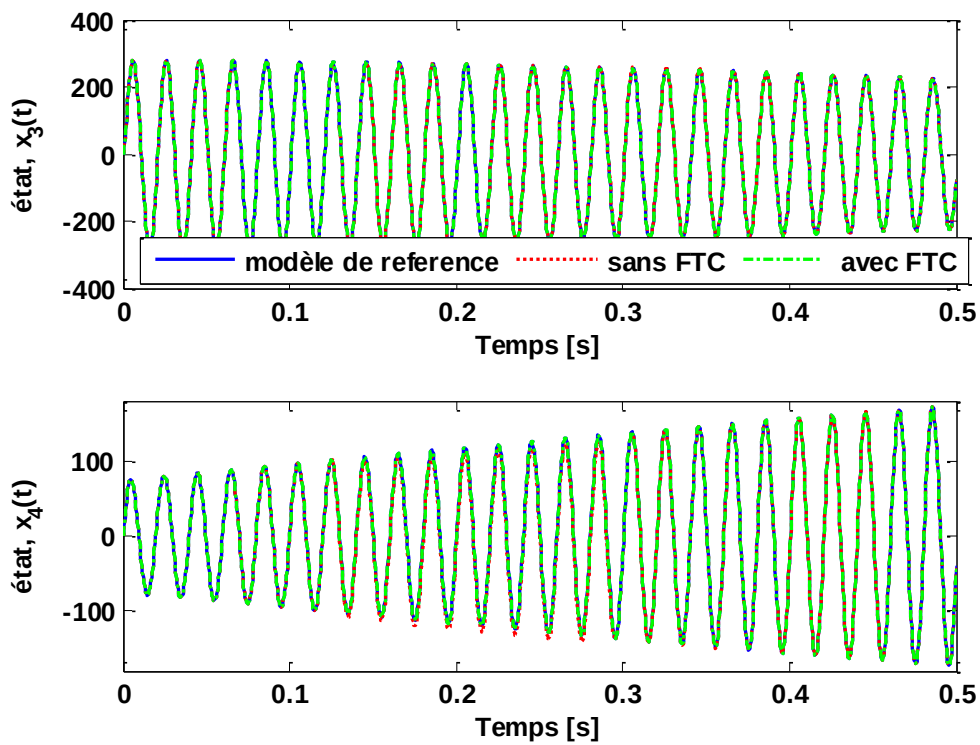


Figure (4.10) : Comparaison entre les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états du système avec FTC.

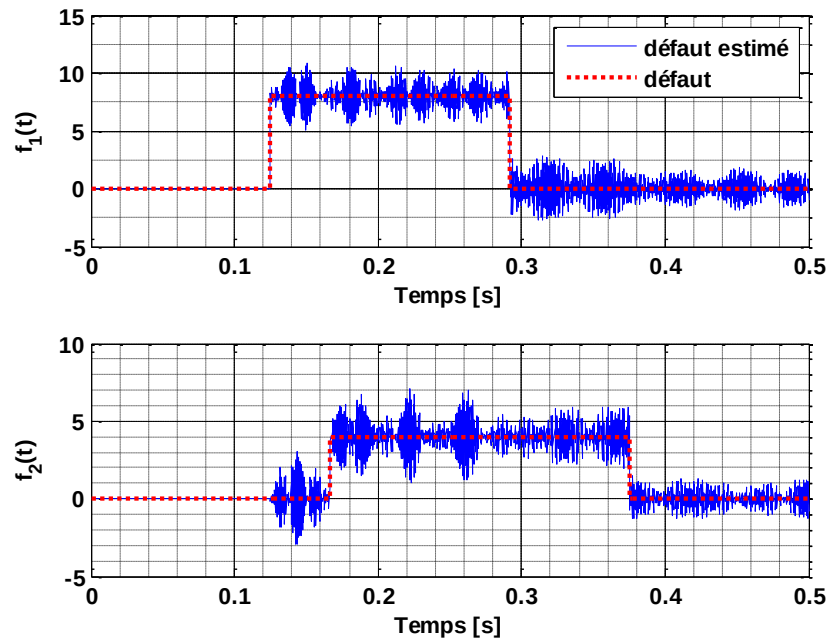


Figure (4.11) : Comparaison des défauts (f_1 et f_2) et leurs estimations.

➤ **Présence des défauts multiples et simultanés dans tous les actionneurs**

Nous pouvons considérer dans ce cas l'apparition des défauts multiples (f_1 , f_2 , f_3 et f_4) au niveau de tous les actionneurs.

- l'amplitude de f_1 égale 20 % par rapport à la valeur nominale de la commande (u_1), est apparait dans l'intervalle du temps [0.12- 0.28s].
- l'amplitude de f_2 égale 20% par rapport à la valeur nominale de la commande (u_2), est apparait dans l'intervalle du temps [0.15- 0.38s].
- l'amplitude de f_3 égale 10 % par rapport à la valeur nominale de la commande (u_3), est apparait dans l'intervalle du temps [0.08- 0.34s].
- l'amplitude de f_4 égale 10% par rapport à la valeur nominale de la commande (u_4), est apparait dans l'intervalle du temps [0.12-0.38s].

Les résultats de simulations présentés dans les figures (4.12), (4.13), (4.14) et (4.15) montrent l'efficacité de la stratégie proposée même en présence de défauts simultanés et multiples.

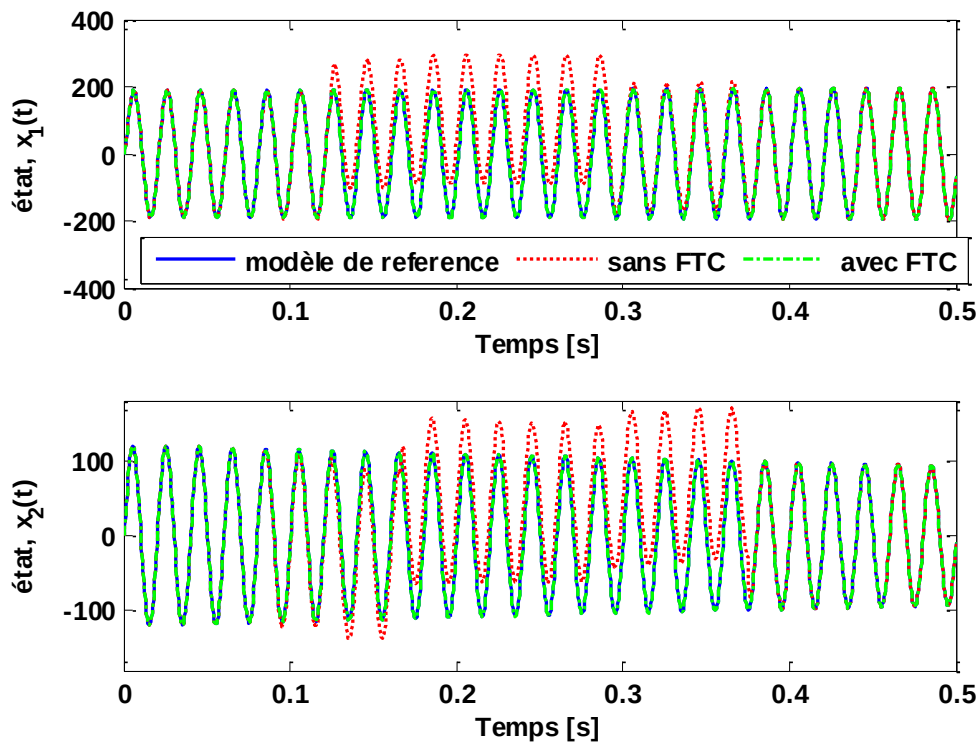


Figure (4.12) : Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états du système avec FTC.

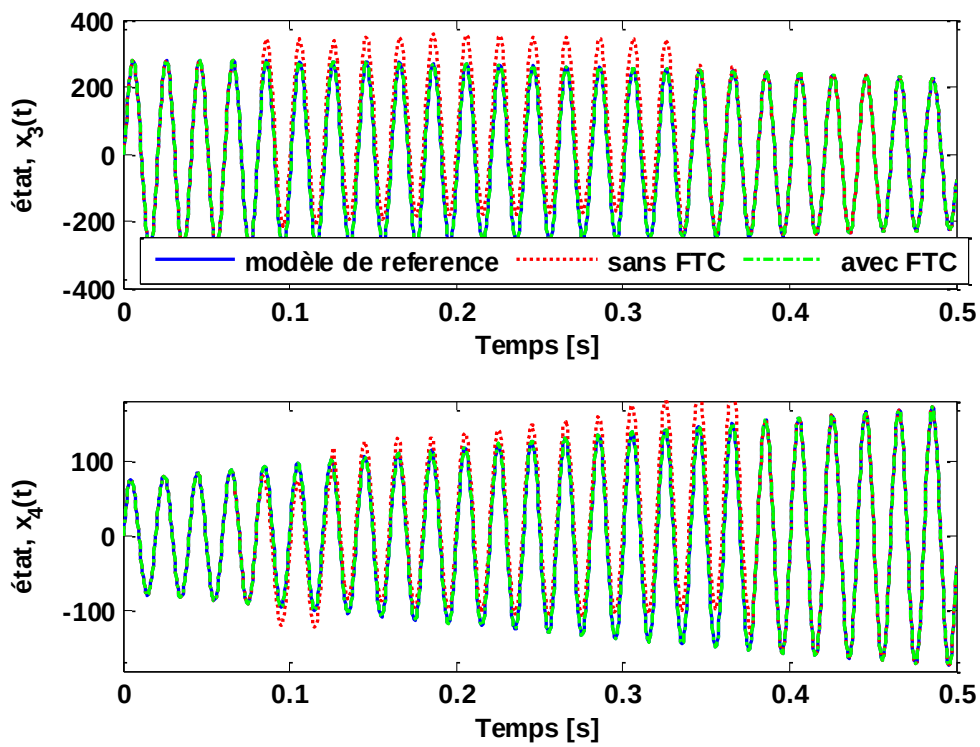


Figure (4.13) : Comparaison des états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA, états estimés et états du système avec FTC.

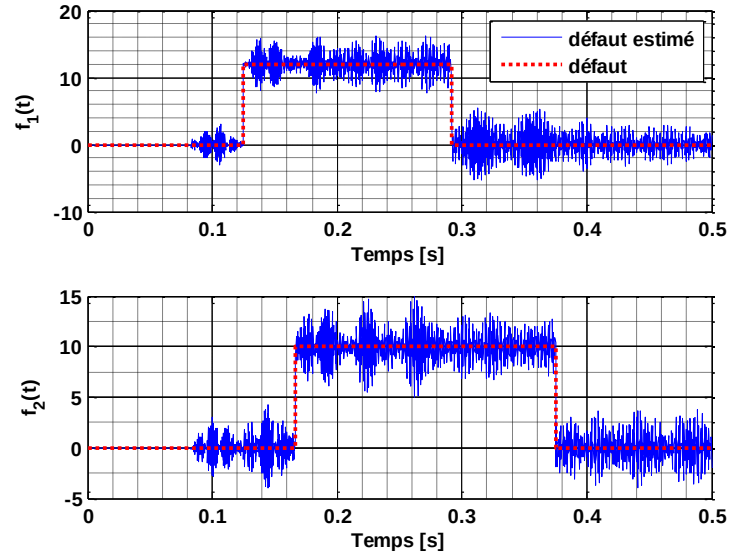


Figure (4.14) : Comparaison des défauts (f_1 et f_2) et leurs estimations.

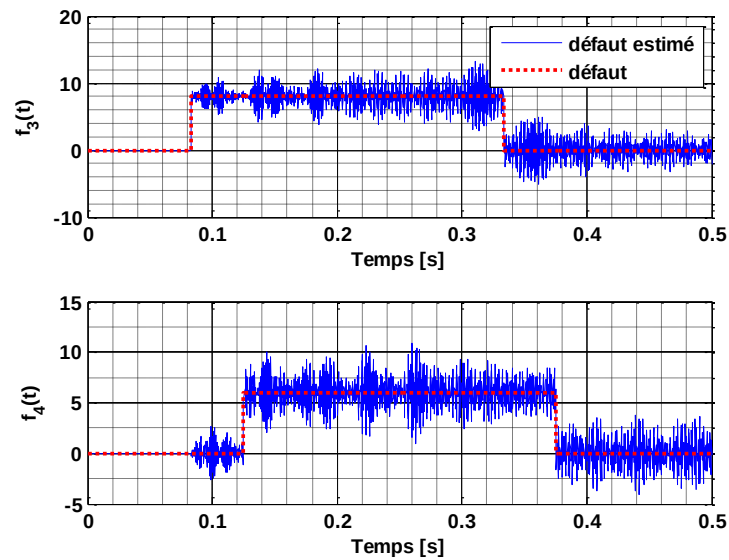


Figure (4.15) : Comparaison des défauts (f_3 et f_4) et leurs estimations.

a- Scénario 02 : défauts variables

Considérons à présent le cas de l'apparition de défauts additionnels et variables au niveau des deux actionneurs (u_1 et u_3).

- D'après les résultats de simulations illustrés dans les figures (4.16), (4.17) et (4.18) montrent la robustesse de la stratégie proposée même en cas des défauts variables et multiples. Elle permet aussi d'estimer exactement les défauts variables.

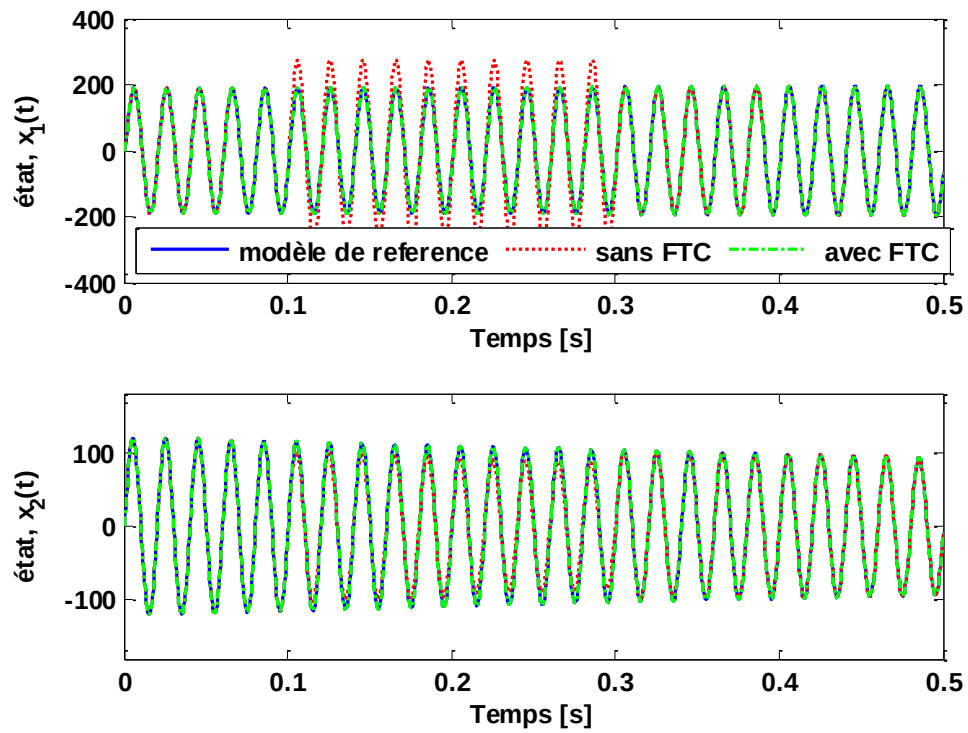


Figure (4.16) : Comparaison entre les états (x_1 et x_2) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états du système avec FTC.

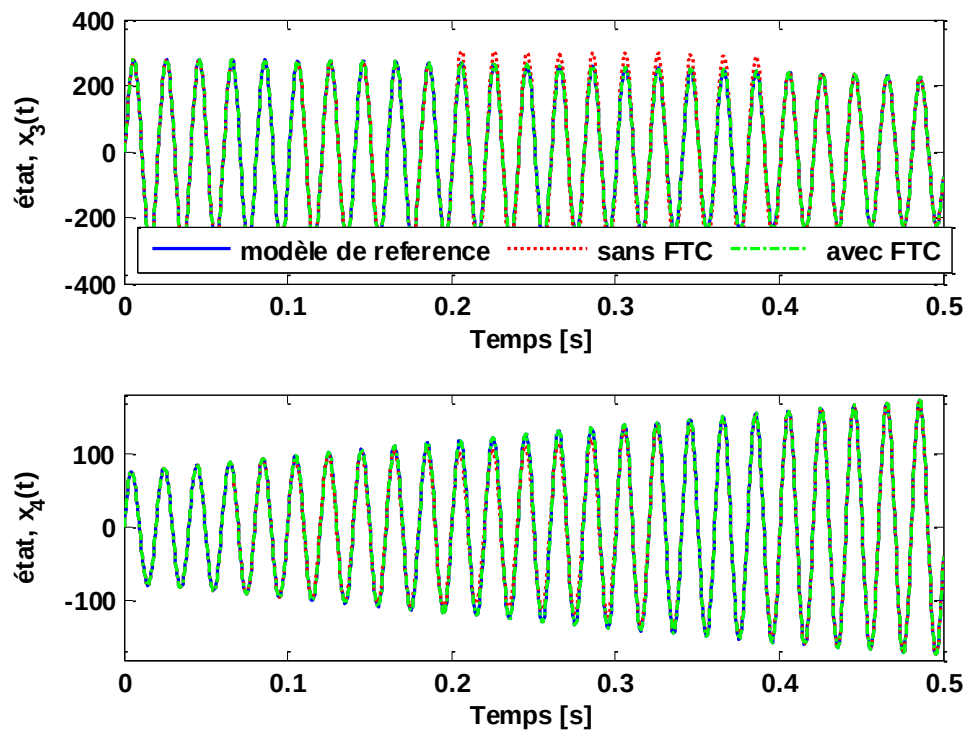


Figure (4.17) : Comparaison entre les états (x_3 et x_4) du modèle de référence de la GADA (sans défaut), états estimés et états du système avec FTC.

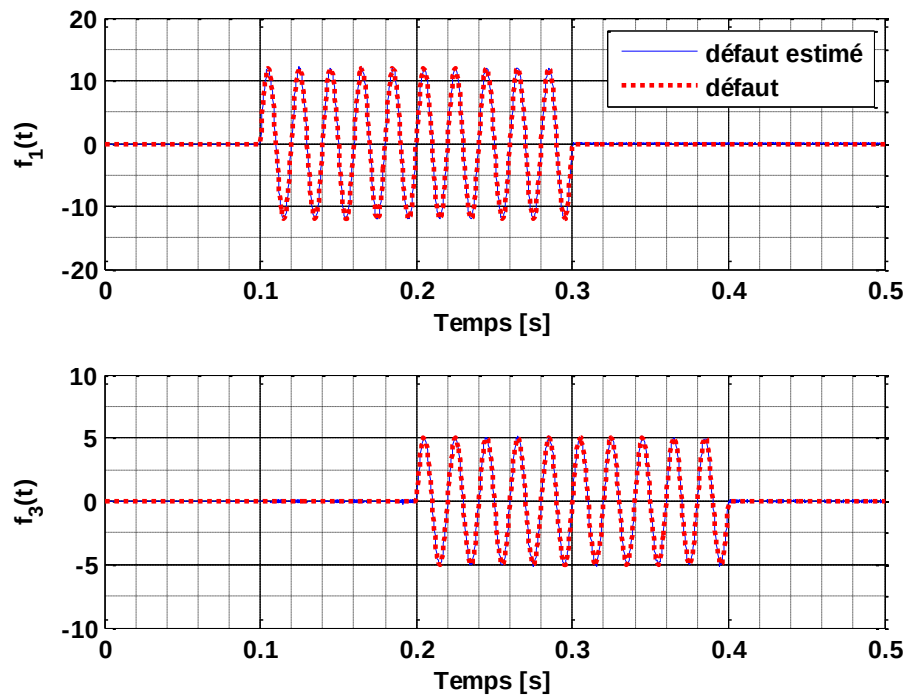


Figure (4.18) : Comparaison entre les défauts (f_1 et f_2) et leurs estimations.

En résumé, nous pouvons conclure que la stratégie de commande FTC proposée, peut également compenser l'effet des défauts actionneurs (constants et variables). L'estimation de l'amplitude de défauts et sa soustraction de la mesure réelle conduit à rajouter un terme dans la loi de commande permettant ainsi la compensation du défaut, et a permis au système d'atteindre son objectif même en présence des défauts. Ces résultats montrent l'efficacité de la méthode proposée pour l'estimation simultanée d'états et des défauts actionneurs. De plus, la stratégie proposée s'avère robuste et performante même en présence de défauts multiples et simultanés.

4.6. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de la synthèse d'une loi de commande tolérante aux défauts pour un système non linéaire (GADA) représenté par un multimodèle de type T-S. La méthode proposée repose sur le principe de la poursuite d'un modèle de référence qui correspond au modèle du système nominal. Cette méthode consiste à ajouter deux termes à la loi de commande initiale du système ayant pour but de compenser un défaut de creux de tension affectant les vecteurs de commande globale dans le stator et le rotor de la GADA. En présence d'un défaut, cette commande permet de forcer l'état du système en défaut à suivre l'état du modèle de référence.

La structure de la loi de commande tolérante aux défauts proposée exige la connaissance du défaut qui est alors estimé au moyen d'un observateur PI. L'approche $\mathcal{L}_2$ et la théorie de Lyapunov permettent alors l'obtention de conditions de stabilité du système générant l'erreur d'estimation d'état tout en assurant le transfert le plus faible possible des perturbations vers l'erreur d'estimation. Les conditions trouvées sont données sous forme LMIs permettant de synthétiser les gains de l'observateur PI et de la loi de commande tolérante aux défauts.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux effectués dans cette thèse apportent des contributions aux problèmes de modélisation des non-linéarités, d'estimation d'état, de diagnostic et de commande tolérante aux défauts d'un système fortement non linéaire et couplé, qui est la GADA représenté sous la forme de multimodèle de type Takagi-Sugeno.

- Dans le contexte de la modélisation, l'approche multimodèle de type T-S a été adoptée pour les avantages qu'elle offre, notamment pour la simplicité d'utilisation de ce modèle pour l'étude de la stabilité et la synthèse d'observateurs. Cette représentation repose sur la décomposition polytopique du paramètre variant dans le temps, puis en utilisant la transformation par secteurs non linéaires, une représentation T-S de la GADA a été obtenue. De là, en se basant sur le multimodèle obtenu pour la synthèse d'observateurs, pour estimer les variables d'états de la GADA.
- Dans le contexte du diagnostic de défauts, un nouveau algorithme a été proposé afin de détecter et de localiser les défauts des capteurs de courants dans le stator de la génératrice. Cet algorithme est basé sur la structure du multimodèle de T-S obtenue, et utilise un banc de multiobservateur de Luenberger dans lequel chaque multiobservateur utilise uniquement une partie des sorties et génère un ensemble de résidus. Chaque ensemble de ces résidus constitue une signature différente dédiée à un défaut particulier. Grace à la différence de ces signatures, ainsi un autre vecteur résidu proposé, chaque défaut de capteur de courant peut être détecté et localisé. Les résultats de simulation obtenus ont montrés qu'il est possible de détecter et d'isoler des défauts simples, multiples et simultanés.
- Dans le contexte de la synthèse d'une loi de commande tolérante aux défauts par poursuite de modèle de référence, qui correspond au modèle du système nominal. La nouveauté porte sur l'intérêt aux conditions structurelles de poursuite proposées. En effet, jusqu'à présent peu de travaux se sont intéressés à cette idée, et tout particulièrement pour les systèmes non linéaires représentés par des multimodèles T-S. Cette stratégie consiste à rajouter deux termes à la loi de commande initiale du système ayant pour but de compenser l'effet de défauts de creux de tension. En présence de défauts, cette commande permet de forcer l'état du système en défaut à suivre l'état du modèle de référence. La structure de la loi de commande tolérante aux défauts développée exige la connaissance du défaut qui est estimé à base d'observateur PI. En se basant

simultanément sur l'approche $\mathcal{L}_2$ et la théorie de Lyapunov, il est possible d'obtenir les conditions de stabilité du système générant l'erreur d'estimation d'état, tout en assurant le transfert le plus faible possible des perturbations vers l'erreur d'estimation. Les conditions de stabilité démontrées sont données sous forme des LMIs et permettent de synthétiser les gains de l'observateur PI et de la loi de commande tolérante aux défauts.

Finalement, nous pouvons dire que les résultats obtenus dans ce travail offrent des perspectives intéressantes de développements entre autres :

- Appliquer l'algorithme de diagnostic développé pour la chaîne complète de conversion énergétique (éolien, convertisseur, génératrice). Ce qui permettra de la tester pour plusieurs défauts simultanés,
- Valider l'approche de diagnostic et la stratégie de commande tolérante aux défauts sur un système réel.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

A-

- [Alcorta *et* Frank, 1996] G. E. Alcorta *et* P. M. Frank. Analysis of a class of dedicated observer schemes to sensor fault isolation. UKACC International Conference on Control, pp 60-65, 1996.
- [Angelis, 2001] G. Z. Angelis. System Analysis, Modeling and Control with Polytopic Linear Models. Thèse de Doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, Pays Bas, 2001.
- [Al Kazzaz *et* Singh, 2003] S.A.S. Al Kazzaz *et* G. K. Singh. Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques. Electric Power Systems Research, 65(3), pp. 197-221, 2003.
- [Arfat *et al.*, 2005] S. Arfat, G.S. Yadava and S. Bhim, A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(1), pp. 106-114, 2005.
- [Abo-Khalil *et al.*, 2006] A. G. Abo-Khalil, D. C. Lee and S. H. Lee. Grid Connection of Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Conversion System. Power Electronics and Motion Control Conference CES/IEEE, 2006.
- [Aouzellag *et al.*, 2009] D. Aouzellag, K. Ghedamsi and E. M. Berkouk. Network power flux control of a wind generator. Renewable Energy, 34, pp. 615-22, 2009.
- [Arnaud, 2010] G. Arnaud. Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service. Thèse de doctorat, Université de Nancy, France, 2010.
- [Aouaouda, 2012] S. Aouaouda. Modélisation multimodèle et commande prédictive d'une station d'épuration. Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2012.
- [Abdeddaim *et* Bekta, 2013] S. Abdeddaim *et* A. Betka, Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 49 pp. 234-242, 2013.
- [Abbadi, 2013] A. Abbadi. Investigation sur les Techniques de Commandes Décentralisées Appliquées aux Réseaux Électriques Multi-machines. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2013.
- [Abdeddaim *et al.*, 2014] S. Abdeddaim, A. Betka, S. Drid, and M. Becherif. Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine. Energy Conversion and Management, 79, pp. 281-288, 2014.

- [Attoui *et* Omeiri, 2014] I. Attoui *et* A. Omeiri. Modeling, control and fault diagnosis of an isolated wind energy conversion system with a self-excited induction generator subject to electrical faults. *Energy Conversion and Management*, 82, pp. 11–26, 2014.
- [Attoui, 2014] I. Attoui. Contribution au diagnostic de défauts d’une génératrice asynchrone dans une chaîne de conversion d’énergie éolienne. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Alger, 2014.
- [Abdelmalek *et al.*, 2015(a)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane and A. Larabi. Unknown Input Observer for a Doubly Fed Induction Generator Subject to Disturbances. *Journal: International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 6(4), 2015.
- [Abdelmalek *et al.*, 2015(b)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane, A. Larabi and H. Belmili. Contributions to Diagnosis and Fault tolerant control Based on Proportional Integral Observer: Application to a Doubly-Fed Induction Generator, The 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE'2015), 13-15 December 2015, Boumerdes, Algeria.
- [Abdelmalek *et al.*, 2015(c)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane, A. Larabi and H. Belmili, State and Actuator Fault Estimation in Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs). Deuxième Conférence Internationale sur l’Electrotechnique, l’Electronique, l’Automatique et la Maintenance (CIEEAM’15), 23 - 24 Novembre 2015, ENP, Oran.
- [Abdelmalek *et al.*, 2015(d)] **S. Abdelmalek** *et* H. Belmili. Sensor faults detection and estimation for a DFIG equipped wind turbine. *International Conference on Materials & Energy (ICOME'15)*, 19-22 Mai 2015, Tétouan – Morocco.
- [Abdelmalek *et al.*, 2016(a)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane, A. Larabi and M. Bettayeb. A novel scheme for current sensor faults diagnosis in the stator of a DFIG described by a T-S fuzzy model., *Measurement (Elsevier)*. 91, pp.680-691, 2016.
- [Abdelmalek *et al.*, 2016(b)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane and A. Larabi. Fault diagnosis for a doubly fed induction generator. *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Électrotechnique et Énergetique*, 61(2), pp. 159–163, 2016.
- [Abdelmalek *et al.*, 2016(c)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane and A. Larabi. Stator and Rotor Voltage Dips Detection and Reconfiguration: Application to a DFIG Based Wind Turbines (WT). *Control Engineering and Applied Informatics*, 2016. (in press)
- [Abdelmalek *et al.*, 2016(d)] **S. Abdelmalek**, L. Barazane and A. Larabi. An advanced robust fault-tolerant tracking control for a doubly fed induction generator with actuator faults. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2016.

B-

- [Bonnett *et* Soukup, 1992] A.H. Bonnett *et* G.C. Soukup. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 28(4), July/August, 1992.
- [Buckley, 1992] J. J. Buckley. Universal fuzzy controllers. Automatica, 28, 1992.
- [Boyd *et al.*, 1994] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan. Linear Matrix Inequalities in system and control theory. Studies in Applied and Numerical Mathematics, Philadelphia, 1994.
- [Bourillon, 1999] C. Bourillon. Wind Energy Clean Power for Generations. Renewable Energy, 16, pp. 948-953, 1999.
- [Boussaid, 2011] B. Boussaid. Contribution à la tolérance active aux défauts des systèmes dynamiques par gestion des références. Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy 1, 2011.
- [Bara, 2001] G. I. Bara. Estimation d'état des systèmes linéaires à paramètres variants. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2001.
- [Batteux, 2001] M. Batteux. Diagnosticabilité et diagnostic de systèmes technologiques pilotés. Thèse Doctorat, Université PARIS-SUD 11, 2011.
- [Boumegoura, 2001] T. Boumegoura, Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.
- [Blanke *et al.*, 2003] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki. Diagnosis et fault-tolerant control. Springer-Verlag, 2003.
- [Bonnett *et* Yung, 2008] A. H. Bonnett *et* C. Yung. Increased Efficiency Versus Increased Reliability. IEEE Transactions on Industry Applications, 14, pp. 29-36, 2008.
- [Benzineb, 2010] O. Benzineb. Diagnostic et Commande Tolérante aux Défauts de la Machine asynchrone et des Convertisseurs Multicellulaires Séries. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Juillet 2010.
- [Beltran, 2010] B. Beltran. Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice asynchrone à double alimentation. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [Benderradji, 2013] H. Benderradji. Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction. Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Alger, 2013.

- [Bi *et al.*, 2014] R. Bi, K. Qian, C. Zhou, D. M. Hepburn and J. Rong. A survey of failures in wind turbine generator systems with focus on a wind farm in China. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(4), pp. 366-373, 2014.
- [Benbouzid *et al.*, 2014] M. Benbouzid, B. Beltran, A. Amirat, G. Yao, J. Han and H. Mangel. Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride through capability enhancement. *ISA Transactions*, 53(3), pp.827-833, 2014.
- [Bossoufi *et al.*, 2015] B. Bossoufi, M. Karim, A. Lagrioui, M. Taoussi and A. Derouich. Observer backstepping control of DFIG-Generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation. *Renewable Energy*, 81, pp. 903-917, 2015.
- [Boudrim, 2015] S. Boudrim. Contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Alger, 2015.

C-

- [Chatelain, 1987] J. Chatelain. *Machines électriques*. Tome1, Editions Dunod, 1987.
- [Castro, 1995] J. Castro. Fuzzy logic controllers are universal approximator. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-part C*, 25, pp. 629-635, 1995.
- [Chen *et* Patton, 1999] J. Chen et R.J Patton. *Robust model-based fault diagnosis for dynamics systems*. Academic Publishers, 1999.
- [Chadli *et al.*, 2000] M. Chadli, D. Maquin and J. Ragot. Relaxed stability conditions for the T-S fuzzy systems. *IEEE International Conference on Systems, Man and cybernetics*, 5, pp. 3514-3519, 2000.
- [Chadli *et al.*, 2001] M. Chadli, D. Maquin and J. Ragot. On the stability of multiple model systems, *Proceedings of the European Control Conference*, pp. 1894-1899, 2001.
- [Chadli *et al.*, 2002] M. Chadli, D. Maquin and J. Ragot. Output stabilization in multiple model approach, *International Conference on Control Applications*, 2, pp. 1315-1320, 2002.
- [Chadli, 2002] M. Chadli. *Stabilité et Commande des Systèmes Décrits par des Multimodèles*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2002.
- [Casimir, 2003] R. Casimir. *Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance de formes*. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2003.
- [Camblong, 2003] H. Camblong. *Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable*. Thèse de Doctorat, l'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003.

[Casimir *et al.*, 2004] R. Casimir *et al.* Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronous motor in case of defects. 9th IEEE International Power Electronics Congress (CIEP), pp. 101- 108, 2004.

[Cruz *et* Cardoso, 2004] S.M.A. Cruz *et* A.J.M. Cardoso. Diagnosis of stator inter-turn short circuits in DTC induction motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 40(5), pp. 1349-1360, September/October 2004.

[Ciubotaru *et al.*, 2006] B. Ciubotaru, M. Staroswiecki and C. Christophe. Fault tolerant control of the boeing 747 short-period mode using the admissible model matching technique. In Proc. of 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'06), Beijing, P.R. China, 2006.

[Ceban, 2012] A. Ceban. Méthode globale de diagnostic des machines électriques. Thèse de Doctorat, Université Lille de Nord de France, Février 2012.

D-

[Didier, 2004] G. Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, France, Octobre 2004.

E-

[El-Aimani, 2004] S. El Aimani. Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, France, 2004.

[Elkhatib *et al.*, 2012] K. Elkhatib, A. Aitouche, R. Ghorbani and M. Bayart. Robust fuzzy fault-tolerant control of wind energy conversion systems subject to sensor faults. IEEE Transactions on sustainable energy, 3(2), pp. 231-241, 2012.

F-

[Filev, 1991] D. Filev. Modelling of complexe systems. International Journal of Approximate Res, 5, pp. 281-290, 1991.

[Francois *et al.*, 2005] B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger and F. Minne. Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension. . Revue Roumaine des Sciences Techniques – Électrotechnique et Énergetique, 5, pp. 65-74, 2005.

G-

[Gao *et* Antsaklis, 1992] Z. Gao *et* P.J. Antsaklis. Reconfigurable control system design via perfecy model-following. International Journal of Control, 56, 1992.

[Gasso, 2000] K. Gasso. Identification des systèmes dynamiques non linéaires : approche multimodèle. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2000.

- [Georgieva *et al.*, 2001] O. Georgieva, M. Wagenknecht and R. Hampel. Takagi–Sugeno fuzzy model development of batch biotechnological processes. *International Journal of Approximate Reasoning*, 26(3), pp. 233-250, 2001.
- [Grubic *et al.*, 2008] S. Grubic, J. Aller, B. Lu and T. Habetler. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(12), pp. 4127-4136, 2008.
- [Galvez-Carrillo *et* Kinnaert, 2010] M. Galvez-Carrillo *et* M. Kinnaert. Sensor fault detection and isolation in three-phase systems using a signal-based approach. *IET Control Theory Applications*, 4(9), pp. 1838–1848, 2010.
- [Gaillard, 2010] A. Gaillard. Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [Ghennam *et* Berkouk, 2010] T. Ghennam *et* E. M. Berkouk. Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems. *Electric Power System Research*, 10, pp. 444-455, 2010.
- [Galvez-Carrillo *et* Kinnaert, 2011] M. Galvez-Carrillo *et* M. Kinnaert. Sensor fault detection and isolation in doubly-fed induction generators accounting for parameter variations. *Renewable Energy*, 36(5), pp. 1447-1457, 2011.
- [Ghennam, 2011] T. Ghennam. Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. Thèse Doctorat, l'école militaire polytechnique (EMP), Alger, 2011.

H-

- [Henry, 1999] D. Henry. Diagnostic et contrôle de cohérence des systèmes multi-variables incertains. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 1999.
- [Holdsworth *et al.*, 2003] L. Holdsworth, X. Wu, J. B. Ekanayake and N. Jenkins. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 150(3), pp. 343 – 352, 2003.
- [Hornfors *et al.*, 2005] L. Hornfors, A. Petersson, T. Thiringer and T. Petru. Modelling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), pp. 878-868, 2005.

- [Henry *et* Zolghadri 2006] D. Henry *et* A. Zolghadri. Norm-based design of robust FDI schemes for un-certain systems under feedback control: Comparison of two approaches. *Control Engineering Practice*, 14, pp. 1081-1097, 2006.
- [Heier, 2006] S. Heier. Grid integration of wind energy conversion systems. 2nd ed. London: John Wiley & Sons, 2006.
- [Haiping *et* Zhang, 2008] D. Haiping *et* N. Zhang. Application of evolving Takagi–Sugeno fuzzy model to nonlinear system identification. *Applied Soft Computing*, 8(1), pp. 676-686, 2008.
- [Hubert, 2008] A. Hubert. Commande des systèmes dynamiques : Introduction à la modélisation et au contrôle des systèmes automatiques. Presses Universitaires de Franche-Comté, 2008.
- [Hou *et al.*, 2010] G. Hou, F. Zeng and J. Zhang. Improved T-S fuzzy model identification approach and its application in power plants. *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Okayama, Japan, pp. 53–58, July 17-19, 2010.
- [Hamdi, 2012] H. Hamdi. Approche Multimodèle pour l'Observation d'État et le Diagnostic des Systèmes Singuliers non Linéaires. Thèse de Doctorat, École Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, 2012.

I-

- [Isermann, 1984] R. Isermann. Process fault detection based on modelling and estimation. *Automatica*, 20(4), pp. 387–404, 1984.
- [Isermann, 1997] R. Isermann. Supervision, fault detection et fault diagnosis methods an introduction. *Control Engineering Practice*, 5, pp. 639-652, 1997.
- [Ibrahim, 2006] A. Ibrahim. Contribution au diagnostic de machines électromécaniques: Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée. Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, Octobre 2006.
- [Iov *et al.*, 2007] F. Iov, A. Hansen, P. Sorensen and N. Cutululis. Mapping of grid faults and grid codes. RISO Report, National Laboratory for Sustainable Energy, Denmark, 2007.
- [Ichlal, 2009] D. Ichlal. Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi-Sugeno. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2009.

J-

- [Johansen *et* Foss, 1993] T. A. Johansen *et* A. B. Foss. Constructing NARMAX using ARMAX. *International Journal of Control*, 58, 1993.
- [Jiang, 1994] J. Jiang. Design of reconfigurable control systems using eigen structure assignments. *International Journal of Control*, 59(2), pp. 395–410, 1994.

[Johansen *et al.*, 1998] T.A. Johansen, K. J. Hunt, P.J. Gawthrop and H. Fritz. Off-equilibrium linearization and design of gain-scheduled control with application to vehicle speed control. *Control Engineering Practice*, 6, pp. 167-180, 1998.

[Jadbabaie, 1999] A. Jadbabaie. A reduction in conservatism in stability and L_2 Gain analysis of T-S fuzzy systems via Linear matrix inequalities, IFAC, 14th triennial World congress, Beijing, P.R. China, pp. 285-289, 1999.

[Jamouli, 2003] H. Jamouli. Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, Décembre 2003.

K-

[Kliman *et al.*, 1996] B. G. Kliman, J.W. Premerlani, A.R. Koegl and D. Hoeweler. A new approach to on-line turn fault detection in AC motors. 31st Annual IEEE Industry Applications Conference (IAS), San Diego California, 1, pp. 687- 93, 1996.

[Kerrigan *et Maciejowski*, 1999] E. Kerrigan *et J. Maciejowski*. Fault-tolerant control of a ship propulsion system using model predictive control. In *Proceedings of European Control Conference*, Karlsruhe, Germany, 1999.

[Kanev *et Verhaegen*, 2002] S. Kanev *et M. Verhaegen*. Controller reconfiguration for non-linear systems. *Control Eng. Practice*, 8, pp.1223-1235, 2002.

[Kanev, 2004] S. Kanev. Robust fault tolerant control. Thèse de Doctorat University of Twente, The Netherlands, 2004.

[Kardous, 2004] Z. Kardous. Sur la Modélisation et la Commande Multimodèle des Processus Complexes et/ou Incertains. Thèse de Doctorat, Université des Sciences Technologiques de Lille, 2004.

[Khair *et Hemsas*, 2007] A. F. Khair *et K. E. Hemsas*. Diagnostic des Machines Asynchrones: Utilisation du Modèle Multi Enroulements. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing (CIP), 2007.

[Khov, 2009] M. Khov. Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2009.

[Kaikaa, 2010] M.Y Kaikaa, Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer; Application au diagnostic. Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, Juin 2010.

[Khelassi, 2011] A. Khelassi. Nouvelle Méthodologie de Synthèse de Lois de Commande Tolérante aux Fautes Garantissant la Fiabilité des Systèmes. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2011.

[Kouchih *et al*, 2014] D. Kouchih, R. Hachelaf, N. Boumalha, M. Tadjine and M.S. Boucherit. Vector fault tolerant control of induction motor drives subject to stator interturn faults. The 16th Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC'14), Antalya, Turkey, September 21-24, 2014.

[Kouchih, 2015] D. Kouchih. Détection des Défauts et Commande Tolérante des Machines Asynchrones. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2015.

L-

[Luenberger, 1971] D.G. Luenberger. An introduction to observers. IEEE Transactions on Automatic Control, 16, pp. 592–602, 1971.

[Lopez-Toribio *et al.*, 1999] C.J. Lopez-Toribio, R.J Patton and S. Daley. A multiple model approach to fault-tolerant control using takagi-sugeno fuzzy modelling : real application to an induction motor drive system. European Control Conference, 1999.

[Leith *et* Leithead, 1999] D. J. Leith *et* W. E. Leithead. Analytic framework for blended multiple model systems using linear local models. International Journal of Control, 72(7), pp. 605–619, 1999.

[Lootsma, 2001] T. F. Lootsma. Observer-based Fault Detection and Isolation for Nonlinear systems. Thèse de doctorat, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2001.

[Lofberg, 2004] J. Lofberg, YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In Proceedings of the CACSD conference, Taipei, Taiwan, pp. 284–289, 2004.

[Loures, 2006] R. Loures. Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de pétri temporel flou. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2006.

[Lim *et al.*, 2008] K. Lima, A. Luna, P. Rodriguez, E. Watanabe, R. Teodorescu and F. Blaabjerg. Doubly-Fed Induction Generator Control under Voltage Sags. IEEE Energy 2030 Atlanta, GA USA, 17-18 November, 2008.

[Lop *et al.*, 2008] J. Lopez , E. Gubia and P. Sanchis. Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generator Under Asymmetrical Voltage Dips. Energy Conversion , 23, pp. 321-330, March 2008.

[Lin *et al.*, 2013] Y. Ling, X. Ling and X. Cai. Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise. *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 17–24, 2013.

[Loures, 2006] R. Loures. Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de pétri temporel flou. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2006.

M-

[Murray-Smith *et* Johansen, 1997] R. Murray-Smith *et* T.A. Johansen. Multiple model approaches to modelling and control. Taylor and Francis, 1997.

[Maciejowski, 2000] J. M. Maciejowski. Fault-tolerant aspects of MPC. In *Proceedings of the IEEE Seminar on Practical Experiences with Predictive Control*, 2000.

[Maciejowski *et* Jones, 2003] J. Maciejowski *et* C. Jones. MPC fault-tolerant flight control case study : flight 1862. In *IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes 03*, Washington D.C, USA, pp. 2317–2322, 2003.

[Merlin, 2004] A. Merlin. Les grandes pannes des réseaux électrique (Europe, USA) sont-elle dues à l'ouverture du marché de l'électricité. *REE*, 3, Mars 2004.

[Multon *et al.*, 2004] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud and H. Ben Ahmed. Aérogénérateurs électriques. *Techniques de l'ingénieur*, D7(D3960), 2004.

[Monnin *et al.*, 2004] M. Monnin, N. Palluat, D. Racocanu and N. Zerouni. Diagnosis method using artificial intelligence: Application of fuzzy PETRI nets and Neuro- Fuzzy system. *Laboratoire d'Automatique de Besançon*, 2004.

[Mor *et* Haan, 2007] J. Morren *et* S. W. de Haan. Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator. *Power and Energy Society General Meeting IEEE*, 2007.

[Oudghiri, 2008] M. Oudghiri. Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile. Thèse de Doctorat, Université Picardie Jules Verne, France, 2008.

[Menighed, 2010] K. Menighed. Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2011.

[Menighed, 2010] K. Menighed. Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts. Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2010.

[Mar *et al.*, 2011] J. Martínez, P.C. Kjaer and P. Rodriguez. Parameterization of a synchronous generator to represent a doubly fed induction generator with chopper protection for fault studies. *Wind Energy*, 14, pp.107–118, 2011.

[Medoued, 2012] A. Medoued. Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques; Application aux moteurs asynchrones. Thèse de Doctorat, Université de Skikda, Algérie, Mars 2012.

[Merahi, 2014] F. Merahi. Contribution à la supervision des fermes éoliennes. Thèse Doctorat, l'école militaire polytechnique, Alger, 2014.

[Moualdia, 2014] A. Moualdia. Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne. Thèse Doctorat, l'école militaire polytechnique (EMP), Alger, 2014.

N-

[Noura *et al.*, 2000] H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin and D. Theilliol. Fault-tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine. IEEE Control Systems Magazine, 20, 2000.

[Niemann *et Stoustrup*, 2003] H. Niemann *et J. Stoustrup*. Passive fault tolerant control of double inverted pendulum a case study example. Symposium Safe process, 10, pp. 1029- 1034, 2003.

[Ning *et al.*, 2004] L. Ning, L. Shao-Yuan and X. Yu-Geng. Multi-model predictive control based on the Takagi-Sugeno fuzzy models: a case study. Information Sciences, 165, pp. 247-263, 2004.

[Nagy Kiss, 2010] A. M. Nagy Kiss. Analyse et synthèse de multimodèles pour le diagnostic. Application à une station d'épuration. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2010.

[Nasser, 2011] M. Nasser. Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, Pari-Tech, France, 2011.

O-

[O'Donnell, 1985] P. O'Donnell. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1. IEEE Transaction on Industry Applications, 21(4), pp. 853 – 864, July/August 1985.

[Ohtake *et al.*, 2001] H. Ohtake, K. Tanaka and H.O. Wang. Fuzzy modeling via sector nonlinearity concept. IFSA World congress and international conference, 1, pp. 127-132, 25-28 July 2001.

[Oudghiri, 2008] M. Oudghiri. Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile. Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne, France, 2008.

[Ouyessaad, 2014] H. Ouyessaad. Diagnostic d'une génératrice asynchrone à double alimentations : Application à l'énergie éolienne. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, France, 2014.

P-

[Pau, 1987] L.F. Pau. Diagnostic des pannes dans les systèmes: approche par reconnaissance des formes. Capadues Editions, 1987.

[Patton, 1997] R. J. Patton. Fault tolerant control. IFAC SAFEPROCESS, 2, pp. 1033-1055, 1997.

[Patton *et al.*, 1989] R. J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark. Fault diagnosis in dynamic systems : theory and application. International Series in Systems and Control Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.

[Patton *et* Chen, 1991] R. Patton *et* J. Chen. Robust fault detection using eigenstructure assignment : A tutorial consideration and some new results. In Proc. of the 30th IEEE. Conference on Decision and Control, 1991.

[Patton *et al.*, 1998] R. J. Patton, J. Chen and C. Lopez-Toribio. Fuzzy observers for non-linear dynamic systems fault diagnosis. In 37th Conference on Decision and Control, Tampa, Florida, USA, 1998.

[Patton *et* Lopez-Toribio, 2000] R.J. Patton *et* C.J. Lopez-Toribio. Multiple-model fault tolerant control of an induction motor in the presence of uncertainty. IFAC SAFEPRO CESS, 2000.

[Petropol, 2001] S. Petropol, Ondelettes et diagnostic: application aux défauts diélectriques et électriques des machines tournantes. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, Septembre 2001.

[Poitier, 2003] F. Poitier. Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne: Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.

[Patton *et* Klinkhieo, 2009] R. Patton *et* K. Klinkhieo. An adaptive approach to active fault tolerant control. The Open Automation and Control Systems Journal, 2, pp. 54–61, 2009.

R-

[Ragot *et al.*, 1990] J. Ragot, M. Darouach, D. Maquin, *et* G. Bloch. Validation de données et diagnostic. Hermes Science Publications, 1990.

- [Ripoll, 1999] P. Ripoll. Conception d'un système de diagnostic flou appliqué au moteur automobile. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, 1999.
- [Ragot *et* Maquin, 2000] J. Ragot *et* D. Maquin. Diagnostic des systèmes linéaires. Hermes Science Publication, France, 2000.
- [Rambeaux *et al.*, 2000] F. Rambeaux, F. Hamelin and D. Sauter. Optimal thresholding for robust fault detection of uncertain systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10, pp. 1155-1173, 2000.
- [Razik, 2002] H. Razik. Modélisation de la machine asynchrone à cage. Application à la simulation de moteur à cage défaillante. Spectres des courants des moteurs défaillants. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2002.
- [Rodrigues, 2005] M. Rodrigues. Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, Décembre 2005.
- [Ribrant, 2006] J. Ribrant. Reliability performance and maintenance: A survey of failures in wind power systems. Thèse de Maitrise, 2006.
- [Rothenhagen *et* Fuchs, 2006] K. Rothenhagen *et* F.W Fuchs. Current Sensor Fault Detection by Bilinear Observer for a Doubly Fed Induction Generator, in: *Proceeding of Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 1369 – 1374, 2006.
- [Rangarajan *et al.*, 2007] M.T. Rangarajan, B.L. Sang, C.S. Greg, B.K. Gerald, Y.A. Jiyeon and G.H. Thomas. Survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(4), pp. 920-933, 2007.
- [Ribrant *et* Bertling, 2007] J. Ribrant *et* L. Bertling. Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997–2005. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(1), pp. 167-173, 2007.
- [Orjuela *et al.*, 2007] R. Orjuela, B. Marx, J. Ragot and D. Maquin. Estimation d'état des systèmes non linéaires par une approche multimodèle découplé. 2^{èmes} Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS, Jul 2007, Reims, France. GdR MACS, pp. CDROM, 2007.
- [Rangarajan *et al.*, 2007] M.T. Rangarajan, B.L. Sang, C.S. Greg, B.K. Gerald, Y.A. Jiyeon and G.H. Thomas, Survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(4), 2007, pp. 920-933.

- [Rodrigues *et al.*, 2007] M. Rodrigues, D. Theilliol, S. Aberkane and D. Sauter. Fault tolerant control design for polytopic LPV system. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 17, 2007.
- [Rothenhagen *et Fuchs*, 2008] K. Rothenhagen *et F.W Fuchs*. Advanced sensor fault detection and control reconfiguration of wind power plants using doubly fed induction generators, in: *Proceeding of Conference on IEEE Power Electronics Specialists*, pp. 913 – 919, 2008.
- [Rothenhagen *et Fuchs*, 2009a] K. Rothenhagen *et F.W Fuchs*. Current Sensor Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration for Doubly Fed Induction Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), pp. 4239-4245, 2009.
- [Rothenhagen *et Fuchs*, 2009b] K. Rothenhagen *et F.W Fuchs*. Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(10), pp. 4229-4238, 2009.
- [Roth, 2010] M. Roth. Identification and Fault Diagnosis of Industrial Closed-loop Discrete Event Systems. Thèse Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan and Universität Kaiserslautern Germany, 2010.
- [Rah *et Parniani*, 2010] M. Rahimi *et M. Parniani*. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators. *Journal Electric Power Systems Research*, 80, pp. 184–195, 2010.
- [Rémi, 2012] D. Rémi. Étude et simulation de la MADA. Thèse de Doctorat, l'école de technologie supérieure, Québec, 2012.
- [Ramahaleomiarantsoa, 2013] F.J. Ramahaleomiarantsoa. Diagnostic des systèmes a énergies Renouvelables de Type Eolien. Thèse de doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, France, 2013.
- [Razavi-Far *et al.*, 2014] R. Razavi-Far, E. Zioa and V. Palade. Efficient residuals pre-processing for diagnosing multi-class faults in a doubly fed induction generator, under missing data scenarios. *Expert Systems with Applications*, 14, pp. 6386–6399, 2014.
- [Raúl *et al.*, 2015] S.M Raúl, M. F-R Luis, A. G-V Carlos and J. Francisco. Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, pp. 2927-2938, 2015.

S-

- [Sturm, 1999] J. F. Sturm. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. *Optimization Methods and Software*, pp. 625–653, 1999.

[Staroswiecki *et* Gehin, 2001] M. Staroswiecki *et* A. Gehin. From control to supervision. Annual Reviews in Control, 25, pp. 1–11, 2001.

[Seddique *et al.*, 2003] A. Seddique, G. Yadava and B. Singh. Applications of artificial intelligence techniques for induction machine stator fault diagnostics: review. Symposium on Dignostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Allantia, GA, USA, August 24-26, pp. 29-34, 2003.

[Staroswiecki, 2005] M. Staroswiecki. Fault tolerant control: The pseudo-inverse method revisited. In Proc. of the 16th Triennial IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005

[Simon, 2011] P. Simon. Détection robuste et précoce des pannes oscillatoires dans les systèmes de commandes de vol. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, France, 2011.

T-

[Takagi *et* Sugeno, 1985] T. Takagi *et* M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 15, pp. 166-172, 1985.

[Tanaka *et al.*, 1996] K. Tanaka, T. Ikeda and H.O. Wang. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: quadratic stabilizability, H_∞ control theory, and linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996.

[Tanaka *et* Wang, 2001] K. Tanaka *et* H.O. Wang. Fuzzy Control System Design and analysis. A Linear Matrix Inequality Approach. John Wiley & Sons Inc, 2001.

[Tao *et* Joshi, 2005] G. Tao *et* S. Joshi. Adaptive output feedback compensation of variant actuator failures. American Control Conference, pp. 4862–4867, 2005.

[Tremblay *et al.*, 2006] E. Tremblay, A. Chandra and P. J. Lagace. Grid-side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network. Power engineering society general meeting, pp.1-6, 2006.

[Taleb, 2007] S. Taleb. Génération des symptômes flous par FFT et SWT application à la détection de vibrations. Thèse Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2007.

V-

[Vaseghi, 2009] B. Vaseghi. Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spores modélisation réduction du courant de défaut. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2009.

[Van der Schaft, 1992] A. Van der Schaft. $\mathcal{L}_2$ - gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state-feedback H_∞ control. IEEE Transactions on Automatic Control, 37(6), pp. 770–784, 1992.

W-

[Weinmann, 1991] A. Weinmann. Uncertain models and Robust Control. Springer-Verlag Wien, New York, 1991.

[Wang *et al.*, 1996] H. O. Wang, K. Tanaka and M. Grin. An approach to fuzzy control of nonlinear systems : stability and design issues. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996.

[Didier, 2004] G. Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, France, Octobre 2004.

Y-

[Ying, 1998] H. Ying. The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers. Automatica, 34(2), pp.157–167, 1998.

[Yang *et al.*, 2001] G.H. Yang, J.L. Wang and Y.C. Soh. Reliable H_∞ controller design for linear systems. Automatica, 37, 2001, pp. 717-725.

Z-

[Zhang *et* Jiang, 1999a] Y. Zhang *et* J. Jiang. Design of integrated fault detection, diagnosis and reconfigurable control systems. Conference on Decision and Control, 1999.

[Zhou, 2000] K. Zhou. A new controller architecture for high performance, robust and fault tolerant control. In proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, 2000.

[Zemouri, 2003] M.R. Zemouri. Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques: application à la maintenance. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, France, Novembre 2003.

Annexes

Annexe A

Lemme mathématique

A.1 Lemme de Schur

Soient trois matrices Q , R et S de dimension appropriées avec $Q=Q^T$, $R=R^T$, les expressions suivantes sont alors équivalentes :

$$\begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \prec 0 \Leftrightarrow \begin{cases} R \succ 0 \\ Q - S R^{-1} S^T \prec 0 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

ou

$$\begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \succ 0 \Leftrightarrow \begin{cases} R \prec 0 \\ Q - S R^{-1} S^T \succ 0 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Exemple :

$$X A_i^T + A_i X + B_i Y_j + Y_j^T B_i^T + X Q X \prec 0 \quad (\text{A.3})$$

En appliquant le Lemme de Schur (A.1), l'inégalité (A.3) devient :

$$\begin{bmatrix} H_{11} & X \\ X & -Q^{-1} \end{bmatrix} \prec 0 \quad (\text{A.4})$$

Avec;

$$H_{11} = X A_i^T + A_i X + B_i Y_j + Y_j^T B_i^T$$

Annexe B

Paramètres de la MADA

Fréquence d'alimentation	50 Hz
Résistance statorique	$R_s = 45 \text{ m}\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 66.5 \text{ m}\Omega$
Inductance cyclique statorique	$L_s = 673.97 \text{ }\mu\text{H}$
Inductance cyclique rotorique	$L_r = 490.60 \text{ }\mu\text{H}$
Inductance cyclique mutuelle	$L_m = 44.2 \text{ mH}$
Nombre de paires de pôles est	$P = 2$

Paramètres de la turbine

Puissance nominale	1 MW
Moment d'inertie	$J = 2 \text{ kg.m}^2$
Longueur de la pale	$R = 35\text{m}$
Gain du multiplicateur de vitesse	$K = 120$
Densité d'air	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$