



**HAL**  
open science

# Diagnostic des systèmes à énergies renouvelables de type éolien

Fanjason Jacques Ramahaleomiarantsoa

► **To cite this version:**

Fanjason Jacques Ramahaleomiarantsoa. Diagnostic des systèmes à énergies renouvelables de type éolien. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Pascal Paoli; Ecole supérieure polytechnique d'Antsiranana (Madagascar), 2013. Français. NNT: 2013CORT0004 . tel-01022178

**HAL Id: tel-01022178**

**<https://theses.hal.science/tel-01022178>**

Submitted on 10 Jul 2014

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

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



**UNIVERSITE DE CORSE-PASCAL PAOLI**  
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES**  
LABORATOIRE SPE UMR CNRS 6134

ET

**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTSIRANANA MADAGASCAR**

# **THÈSE**

En Convention de Cotutelle Internationale

Présentée pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR EN AUTOMATIQUE, SIGNAL, PRODUCTIQUE,  
ROBOTIQUE**

Mention : **Génie informatique, automatique et traitement du signal**

Soutenue publiquement par

**Fanjason Jacques RAMAHALEOMIARANTSOA**

*Le 18 juillet 2013,*

---

**DIAGNOSTIC DES SYSTEMES A ENERGIES RENOUVELABLES DE TYPE EOLIEN**

---

## **Jury**

### **Directeurs :**

M. Nicolas HERAUD, Dr- HDR, Université de Corse, France

Pr. Jean Marie RAZAFIMAHENINA, Professeur, E. S. P. Antsirananana, Madagascar

### **Rapporteurs :**

Pr. Dominique SAUTER, Professeur, CRAN, Université de Lorraine, France

Pr. Mariette Sahondra RAZANAJATOVO, Professeure, Université d'Antananarivo, Madagascar

### **Examineurs :**

Pr. Christian CHRISTOFARI, Professeur, Université de Corse, France

M. Eric Jean Roy SAMBATRA, Maître des Conférences, I. S. T. D'Antsirananana, Madagascar

### **Invité :**

Pr. Charles Bernard ANDRIANIRINA, Professeur, Université d'Antsirananana, Madagascar



## Remerciements

Les travaux de recherche développés dans ce mémoire ont été réalisés à l'Ecole Doctorale de l'Université de Corse Pasqual Paoli, Unité « Sciences Pour l'Environnement (SPE) » dans le laboratoire CNRS UMR SPE 6134, du groupe thématique « les énergies renouvelables (ENR) », à l'Ecole Doctorale de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antsiranana (ESPA) et au Laboratoire des Machines Electriques et Electricité (LM2E) de l'Institut Supérieur de Technique D'Antsiranana (IST D), Madagascar.

Je tiens à remercier Monsieur Paul-Antoine BISGAMBIGLIA, Directeur de l'unité SPE, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche. Je remercie également Monsieur Christian CRISTOFARI, responsable de l'équipe ENergies Renouvelables (ENR).

J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers Messieurs Nicolas HERAUD, Maître de Conférences Habilité à Diriger des Recherches (MDC HDR) de l'Université de Corse, Jean Marie RAZAFIMAHENINA, Professeur à l'ESPA de l'Université Nord d'Antsiranana et de l'IST D, ainsi qu'Eric Jean Roy SAMBATRA, Maître de Conférences de l'IST D, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans l'élaboration de ces travaux. Je les remercie pour leurs conseils, leurs soutiens, leurs disponibilités et surtout leurs grandes qualités humaines.

Je remercie vivement Madame Mariette Sahondra RAZANAJATOVO, Professeure à l'Université d'Antananarivo, Madagascar et Monsieur Dominique SAUTER, Professeur à l'Université de Lorraine, Nancy France de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je tiens également à adresser mes remerciements à Messieurs Charles Bernard ANDRIANIRINA, Professeur à l'Université d'Antsiranana, Madagascar, Christian CHRISTOFARI, Professeur à l'Université de Corse, France, Eric Jean Roy SAMBATRA, Maitre des Conférences à l'Institut Supérieur de Technologie D'Antsiranana, Madagascar de m'avoir fait l'honneur de participer au jury.

Je remercie également à Monsieur Oudie BENNOUNA, Enseignant Chercheurs et Responsable de la dominante Mécatronique & Génie Electrique de l'Institut de Recherche en Systèmes Electroniques EMbarqués (IRSEEM), France, pour ses nombreux conseils.

Je voudrais remercier les deux Directeurs Généraux (entrant et sortant) de l'IST D de m'avoir accepté mes demandes de disponibilité durant les trois dernières années de thèse.

Je remercie très sincèrement l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), région Océan Indien et le Service de Coopération et d'Action Culturelle, Projet MADES (SCAC/MADES) de l'Ambassade de France à Madagascar, pour leur aide financière pendant mes séjours à l'Université de Corse.

Durant mes séjours à Corte et Antsirana, les membres administratifs et techniques de l'unité de recherche et des laboratoires des trois établissements, ont toujours su répondre présent à mes nombreuses sollicitations. J'ai particulièrement apprécié leur disponibilité, leur sympathie, et leur compétence. Qu'ils reçoivent toute ma gratitude!

Je ne saurais enfin oublier les docteurs et les futurs docteurs des laboratoires qui, durant ces années, ont entretenu une très bonne ambiance et ont fait preuve de solidarité. Je souhaite aux doctorants, du succès dans leurs recherches, ainsi que dans leurs vies professionnelles.

*A ma femme Hanitra, pour son indéfectible soutien,*

*A mon fils Fandresena, source de joie et de force  
inaltérable*

*A mes parents*

## Contextes et objectifs

La complexité croissante des unités de production nécessite une automatisation de plus en plus développée. La surveillance de ces processus demande alors un suivi rigoureux. Ce suivi doit être capable de détecter les défauts capteurs, de les localiser, et de les identifier pour décider des actions à entreprendre. Ces différentes étapes, qui constituent la base du diagnostic, doivent être exécutées aussi rapidement que possible.

Avec la demande croissante d'énergie, les éoliennes apportent une réponse viable aux problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles. Cependant, elles présentent certains inconvénients qui rendent le coût de cette énergie encore élevé. Avantageusement, le développement des aérogénérateurs et l'introduction des convertisseurs de puissance ont permis d'améliorer le rendement de cette forme d'énergie surtout dans les sites ventés.

Toutefois, l'éolienne est devenue un système complexe qui nécessite une supervision rigoureuse pour obtenir un rendement énergétique optimal. L'objectif de cette thèse se résume ainsi : établir la surveillance d'une éolienne, et notamment de sa génératrice, en utilisant la méthode d'Analyse en Composantes Principales et de détection de défauts.

Pour arriver à cet objectif, les différentes phases de ce projet sont :

1. Etude théorique et validation de la méthode d'Analyse en Composantes Principales par des données de thèses et données réelles de la météorologie de Madagascar
2. Application de la méthode choisie sur la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné (MARB), actuellement l'actionneur le plus utilisé pour la Génératrice Asynchrone Doublement Alimentée base de l'éolienne
3. Etude théorique des différents modules constituant l'éolienne,
4. Développement d'une maquette logicielle des modules « MARB - ACP » et « GADA - ACP »,
5. Application de la méthode ACP et de détection de défauts sur le simulateur numérique,

La dernière partie du projet est consacrée à la comparaison de deux méthodes de détection des défauts, méthodes élaborées au laboratoire UMR CNRS 6134 SPE, la première méthode est l'ACP et la deuxième méthode est l'estimation d'état basée par la représentation polynomiale.

Pour simuler le fonctionnement de l'éolienne, nous opterons pour un environnement informatique Matlab/Simulink qui constitue un outil performant. Il s'agit de tester auparavant les performances de notre dispositif avant de le confronter au banc d'essai. Ce dernier représente une étape intermédiaire entre la simulation numérique et le modèle réel.

## Références personnelles

### *Ouvrages et Chapitres d'ouvrage*

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, E. J. R. Sambatra, N. Héraud, J. M. Razafimahenina, *Performances of the PCA method in electrical machines diagnosis using Matlab*, Intech, MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications, vol.1, ISBN 979-953-307-774-0, 9, p. 69-88, September 2012.

### *Revue internationale avec comité de lecture*

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *On the Sensitivity of Principal Components Analysis Applied in Wound Rotor Induction Machines Faults Detection and Localization*, International Journal on Energy Sciences (IJES), Vol.2, pp. 262-271, 2012.

### *Colloque national et international avec comité de lecture*

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina,, *Principal Components Analysis Method Application in Electrical Machines Diagnosis*, 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO'8), Noordwykerhout, Pays Bas, 2011.

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Fault detection of wound rotor induction motor with principal components analysis method*, 21th International Conference on Production Research (ICPR'21), Stuttgart Germany, 2011.

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Détection et localisation de défauts d'une machine asynchrone à rotor bobiné par la méthode d'analyse en composantes principales (ACP)*, 4ème Workshop du Groupement d'Intérêt Scientifique «Surveillance, Sûreté, Sécurité des Grands Systèmes» (GIS-3SGS'11), Valenciennes, 2011.

- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Détection et Localisation des défauts d'une Machine Asynchrone à Rotor Bobiné par Analyse en Composantes Principales*, JDD 2011, Université de Corse, 2011.

- E. J. R. Sambatra, L. F. Rafanotsimiva, D. Rakoto, E. Rakotonirina, J. F. Ramahaleomiarantsoa, J. M. Razafimahenina, *Vers la conception d'aérogénérateurs de petite puissance destinés aux sites isolés des pays en voie de développement*, Forum de la recherche, Antananarivo Madagascar, 2012.



- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Détection de défauts d'une Génératrice Asynchrone Doublement Alimenté (GADA) par analyse en composantes Principales (ACP)*, JDD 2012, Université de Corse, 2012.
- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, O. Bennouna, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Modeling & Fault Diagnosis System for Electric Vehicles*, IEEE, IECON'2012, Montréal, Canada, 25-28 october 2012.
- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Faults detection on a Wound Rotor Induction Machines by Principal Components Analysis*, IEEE, EPE'2012, Iasi, Romania, 25-27 october 2012.
- J. F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E. J. R. Sambatra, J. M. Razafimahenina, *Faults diagnosis of wind energy conversion chain based on doubly fed induction generator by principal components analysis method*, IEEE, IRSEC'13 Ouarzazate, Morocco, 7-9 March 2013.

## Résumé

Avec l'évolution technologique, le progrès de l'électronique de puissance et surtout l'enjeu économique, l'utilisation des machines asynchrones à cages ou à rotor bobiné occupe de plus en plus de place dans tous les domaines comme les entraînements électriques et la production d'énergie, leur robustesse, leur fiabilité et leur coût moins élevé sont particulièrement appréciés. Ces deux types d'actionneur en fonctionnement générateur sont la base des éoliennes actuelles.

Néanmoins, malgré les travaux de recherches effectués ainsi que les améliorations apportées, ces machines demeurent des sièges potentiels de défaillances aussi bien au niveau stator que rotor. Les défauts les plus courants qui peuvent se produire dans la génératrice asynchrone à rotor bobiné du système éolien, au niveau rotor et stator sont : a) le court circuit sur les enroulements rotoriques et statoriques, b) les défaillances de roulements, c) les irrégularités statiques ou dynamiques de l'entrefer, d) les problèmes au niveau des balais et collecteurs. Ces types de défauts doivent être détectés, localisés à temps car ils peuvent endommager gravement le système.

Durant ces dernières années, le diagnostic des défauts affectant les systèmes éoliens a été largement étudié. Un grand nombre de méthodes est disponible visant à améliorer la conception du système, à augmenter la qualité et la production d'énergie électrique et d'en diminuer les coûts. Malgré les résultats de la recherche, ces systèmes multi-complexes restent encore les sièges de réflexions de plusieurs laboratoires tant qu'industriels qu'académiques.

Ce rapport de thèse présente une nouvelle méthodologie de diagnostic de défauts combinant la méthode à base de modèle utilisant les équations mathématiques explicites du processus et la méthode sans modèle. Les machines électriques sont modélisées analytiquement par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés. L'objectif est de générer des données en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant de ses variables d'état. Tandis que la méthode sans modèle utilisée est l'analyse en composantes principales (ACP). Les deux méthodes sont implémentés sous Matlab/ Simulink. Les données de la machine acquises sont traitées et analysées par la méthode statistique pour générer des résidus. La détection et la localisation de défauts de la machine sont obtenues par l'analyse des résidus de ses variables d'état. Les résidus sont des indicateurs de défaillance ou non du système étudié.

L'analyse des grandeurs caractéristiques de la machine étudiée dans ce rapport de thèse par le biais de plusieurs résultats de simulation montre l'efficacité de la méthode ACP, aussi bien en détection que localisation, par rapport aux autres méthodes de diagnostic des machines électriques.

## Abstract

With the technological evolution, due to the progress of power electronics and the economic issue, the use of induction machines with squirrel cage rotor or wound rotor induction machine occupies more and more places in all areas such as electric drive system and power production due to their robustness, their reliability and their lower cost which are highly appreciated.

These two types of actuator in generator operation are the basis of the current wind turbine. Nevertheless, in spite of those different researches as well as those improvements, these machines remain still the potential faults both in stator and rotor levels.

The most current default which may occur in the wound rotor asynchronous generator of the wind system at the rotor and stator levels are: a) Inter-turn short circuit on the rotor and stator windings; b) The bearings failures; c) Static or dynamic irregularities of the air-gap; d) Brushes and collectors ring problems;

These types of faults must be detected and localized in time because they may damage the whole system. During these last years, the faults diagnosis affecting the wind systems was widely studied.

A large number of methods are available to improve the system design, to increase the quality and quantity of the electrical energy produced and to decrease this energy production costs.

In spite of the literatures research results, these multi-complex systems still remain the reflections seats of several industrial and academic laboratories. This thesis report presents a new faults diagnosis methodology combining the method using the explicit mathematical equations model of the process and the method without a prior model of the system which is the data statistical analysis. The electrical machines are analytically modeled by the method of magnetically coupled electric circuits.

The objective is to generate data in healthy and faults functioning of its variable state. Whereas the method without model used is of the principal components analysis (PCA).

Both methods are implemented under Matlab /Simulink. The data of the acquired machines are handled and analyzed through the statistical method in order to generate the residues.

The detection and the localization of the machine faults are obtained by the residues analysis of its variable state. Residues are faults indicators or healthy on the studied system.

The analysis of the characteristic size of the machine studied in this thesis report through several simulation results shows the efficiency of the method PCA, as well as in detection and localization, when compared with other diagnosis methods of electrical machines.

# Table des matières

1. Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Etude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 SURETE DE FONCTIONNEMENT.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
1.1.2. <b>Notion utilisées en surveillance et diagnostic.....</b>	<b>4</b>
1.1.2.1. Supervision.....	4
1.1.2.2. Surveillance.....	5
1.1.2.3. Système de surveillance et dysfonctionnement.....	6
1.1.2.4. Observateur, mesure et signature.....	7
1.1.2.5. Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.....	7
<b>1.1.3. Principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.4. Conclusion.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 NOTION DE DIAGNOSTIC D'UN SYSTEME.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.1. Généralités.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.2. Procédures de diagnostic.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.3. Types de défauts.....</b>	<b>10</b>
1.2.3.1. Défauts actionneurs.....	11
1.2.3.2. Défauts procédés.....	11
1.2.3.3. Défauts capteurs.....	11
1.2.4. <b>Approches de diagnostic.....</b>	<b>11</b>
1.2.4.1. Principe d'approche qualitative.....	12
1.2.4.2. Principe d'approche quantitatif.....	12
1.2.4.3. Diagnostic à base de modèles.....	13
1.2.4.4. Diagnostic sans modèle à priori.....	14
<b>1.2.5. Conclusion.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 DIAGNOSTIC APPLIQUE A LA MACHINE ELECTRIQUE.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3.1. Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3.2. Grandeurs analysées.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.3. Types et causes de défauts dans les machines électriques.....</b>	<b>16</b>
1.3.3.1. Défauts statoriques.....	18
1.3.3.2. Défauts rotoriques.....	19
1.3.3.3. Défauts de roulement.....	20

1.3.3.4.	Autres défauts.....	21
1.3.3.5.	Causes des défauts.....	21
<b>1.3.4.</b>	<b>Surveillance des défauts dans les machines électriques.....</b>	<b>21</b>
1.3.4.1.	Surveillance basée sur l'analyse spectrale.....	22
1.3.4.2.	Surveillance à base de modèle.....	22
1.3.4.3.	Surveillance par la méthode de redondance matérielle.....	23
<b>1.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5</b>	<b>REFERENCES DU CHAPITRE 1.....</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre 2 : Modélisation du Machine Asynchrone à Rotor Bobiné.....</b>		<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>GENERALITES.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2</b>	<b>ELEMENTS CONSTITUANTS DE LA MARB.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>METHODE DE MODELISATION D UNE MACHINE ELECTRIQUE.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Méthode des éléments finis.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>Méthode des réseaux de perméance.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.4.</b>	<b>Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.5.</b>	<b>Transformation des grandeurs triphasées (abc).....</b>	<b>33</b>
2.3.5.1.	Transformation triphasé-diphasé.....	34
2.3.5.2.	Transformation du Repère fixe vers le Repère tournant (d, q).....	35
<b>2.4</b>	<b>MODELE DE LA MARB.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.2.</b>	<b>Hypothèses de départ.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.3.</b>	<b>Mise en équation de la partie électrique.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.4.</b>	<b>Mise en équation de la partie mécanique.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.5.</b>	<b>Equation différentielle de la MARB.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.6.</b>	<b>Variables d'états à surveiller de la machine.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5</b>	<b>RESULTATS DE SIMULATION.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.1</b>	<b>MARB en fonctionnement sain.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.2</b>	<b>MARB en fonctionnement défaillant.....</b>	<b>47</b>
2.5.2.1	Défauts dans la Machine Asynchrone.....	47
2.5.2.2	Défauts des enroulements.....	48
2.5.2.3	Variation de température dans les enroulements.....	48
<b>2.6</b>	<b>UTILISATION DE LA MARB EN GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLEMENT ALIMENTEE.....</b>	<b>56</b>

2.6.1	Application sur les machines asynchrone doublement alimentée.....	57
2.6.2	Fonctionnement en génératrice à vitesse variable.....	58
2.6.3	Comparaison de puissance produite entre MAS à cage et MADA.....	59
2.7	CONCLUSION.....	60
2.8	REFERENCES DU CHAPITRE 2.....	62
<b>Chapitre 3: Modélisation de la Générateur Asynchrone Doublement Alimentée</b>		
	<b>(GADA).....</b>	<b>67</b>
3.1	GENERALITES.....	67
3.2	MODELE DE LA GADA.....	68
3.2.1	Hypothèses de départ.....	68
3.2.2	Référentiel à deux axes.....	69
3.2.3	Equation de la machine sur le référentiel $\alpha, \beta$ .....	70
3.2.4	Equation de la GADA sur le référentiel d-q.....	71
3.2.5	Description des constituants de l'éolienne.....	73
3.2.6	Résultats de simulation.....	75
3.2.6.1	Fonctionnement sain.....	75
3.2.6.2	Fonctionnement défaillant.....	77
3.3	CONCLUSION.....	80
3.4	REFERENCES DU CHAPITRE 3.....	82
<b>Chapitre 4 : Analyse en Composantes Principales.....</b>		
4.1	INTRODUCTION.....	85
4.2	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	86
4.2.1	Principe de la méthode.....	86
4.2.1.1	Construction de modèle.....	86
4.2.1.2	Détermination du nombre de composantes à retenir.....	89
4.2.2	Illustration.....	93
4.3	DETECTION ET LOCALISATION DE DEFAUTS PAR ACP.....	96
4.3.1	Détection de défauts par analyse des résidus.....	96
4.3.1.1	Notion de résidu.....	96
4.3.1.2	Génération de résidu par l'approche ACP.....	97
4.3.2	Application de l'ACP sur la MARB.....	98
4.3.2.1	Défaut de la MARB à l'instant $t=0s$ .....	98
4.3.2.2	Début de défaut de la MARB à l'instant $t=2s$ .....	101
4.3.2.3	Calcul de l'indice de détection $D_i$ .....	103

<b>4.3.3</b>	<b>Localisation de défauts.....</b>	<b>110</b>
4.3.3.1	Principe de la reconstruction des variables.....	110
4.3.3.2	Localisation de défauts par la méthode combinée.....	111
<b>4.3.4</b>	<b>Application de l'ACP sur la GADA.....</b>	<b>113</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Résultats de simulation de la GADA.....</b>	<b>114</b>
<b>4.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>125</b>
<b>4.5</b>	<b>REFERENCES DU CHAPITRE 4.....</b>	<b>127</b>
<b>Chapitre 5 : Etude comparative de deux méthodes de détection de défauts : Estimateurs d'état et Analyse en Composantes Principales.....</b>		
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>131</b>
<b>5.2</b>	<b>METHODE DE LA REPRESENTATION POLYNOMIALE.....</b>	<b>131</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Principe de la réconciliation des données.....</b>	<b>132</b>
5.2.1.1	Réconciliation des données des systèmes linéaires.....	134
5.2.1.2	Réconciliation des données des systèmes non linéaires.....	135
<b>5.2.2</b>	<b>Résolution du problème non linéaire avec des contraintes d'égalité.....</b>	<b>136</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Résolution du problème non linéaire avec des contraintes d'inégalité.....</b>	<b>137</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Réconciliation des données des systèmes dynamiques.....</b>	<b>138</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Principe de la représentation polynomiale.....</b>	<b>139</b>
<b>5.2.6</b>	<b>Techniques de détection d'erreurs utilisées.....</b>	<b>142</b>
<b>5.2.7</b>	<b>Tests statistiques.....</b>	<b>143</b>
<b>5.3</b>	<b>RESULTATS DE SIMULATION.....</b>	<b>146</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Essais avec un biais constant.....</b>	<b>146</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Essais avec un biais évolutif.....</b>	<b>156</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>164</b>
<b>5.4</b>	<b>REFERENCES DU CHAPITRE 5.....</b>	<b>166</b>
<b>Conclusion Générale &amp; Perspectives.....</b>		<b>170</b>
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>170</b>
<b>Perspectives.....</b>		<b>174</b>
<b>ANNEXE I.....</b>		<b>175</b>
<b>I.1</b>	<b>Paramètres de la MARB.....</b>	<b>175</b>
<b>I.2</b>	<b>Paramètres de la GADA.....</b>	<b>176</b>
<b>ANNEXE II.....</b>		<b>177</b>

## Table des figures

Fig. 1.1: Différentes méthodes de diagnostic .....	12
Fig. 1.2: Statistiques des défauts MAS de faible et moyenne puissance.....	17
Fig. 1.3: Statistiques des défauts MAS de grande puissance.....	17
Fig.1.4: Principe de diagnostic basé sur l'Analyse Spectrale .....	22
Fig. 2.1: Représentation des référentiels (abc), ( $h\alpha\beta$ ), (hdq).....	33
Fig.2.2: Circuit électrique équivalent de la machine.....	37
Fig.2.3: Circuit électrique équivalent d'un enroulement du MARB.....	37
Fig. 2.4: Variation temporelle du courant de la phase « A » du stator .....	44
Fig. 2.5: Variation temporelle du courant de la phase «a» du rotor.....	44
Fig. 2.6: Variation de la vitesse angulaire.....	45
Fig. 2.7: Position angulaire « téta ».....	45
Fig. 2.8: Couple électromagnétique.....	46
Fig. 2.9: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire.....	46
Fig. 2.10: Différents types de défauts d'une machine asynchrone.....	48
Fig. 2.11: Variation temporelle de la phase «A» du courant statorique en fonctionnement sain et défaillant du MARB.....	50
Fig. 2.12: Variation temporelle de la phase «a» du courant rotorique en fonctionnement sain et défaillant du MARB.....	50
Fig. 2.13: Variation temporelle de la vitesse angulaire en fonctionnement sain et défaillant.....	51
Fig. 2.14: Variation temporelle du couple électromagnétique en fonctionnement sain et défaillant du MARB.....	51
Fig. 2.15: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire.....	52
Fig. 2.16: Variation temporelle en fonction sain et défaillant de courant beta en fonction du courant alpha du stator.....	52
Fig. 2.17: variation temporelle en fonctionnement sain et défaillant du courant en quadrature et du courant direct d'une phase du stator.....	53
Fig. 2.18: Variation temporelle des variables d'états du MARB (résistance de l'enroulement statorique augmenté de 40%).....	54
Fig. 2.19: Variation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillants.....	55
Fig. 2.20: Variation du courant en fonctionnement sain et défaillants en quadrature IQ en fonction du courant direct ID .....	55



Fig. 2.21: Variation du courant en fonctionnement sain et défailants dans l'axe Beta en fonction du courant dans l'axe Alpha .....	56
Fig. 2.22: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MARB.....	57
Fig. 2.23: Différentes configurations de fonctionnement de la MADA [KELB00].....	58
Fig. 2.24: Caractéristique de production de puissance de deux machines asynchrones.....	60
Fig. 3.1: Modèle électrique de l'éolienne.....	68
Fig. 3.2 : Représentation des référentiels (abc), ( $h\alpha\beta$ ), ( $hdq$ ).....	69
Fig. 3.3: Schéma bloc sous Simulink de l'ensemble.....	72
Fig. 3.4: Courbes des coefficients de couple et puissance $C_p$ en fonction de $\lambda$ .....	73
Fig. 3.5: Evolution temporelle du courant statorique (a) et rotorique (b).....	76
Fig. 3.6: Evolution temporelle du couple électromagnétique (a) et la vitesse angulaire (b).....	76
Fig. 3.7: Tension (a) et courant (b) du stator sur le système d'axe alpha beta.....	76
Fig. 3.8: Evolution temporelle du courant Direct (a) et en Quadrature (b) .....	79
Fig. 3.9: Evolution du courant du stator sur le référentiel d et q.....	79
Fig.3.10 : Evolution temporelle du courant statorique sur l'axe alpha et beta.....	79
Fig. 3.11: Courants statoriques sur les deux axes «alpha-béta».....	79
Fig. 3.11: Evolution temporelle de la tension statorique sur l'axe alpha (a) et beta (b).....	79
Fig. 3.12: Evolution temporelle des tensions rotorique sur l'axe alpha et beta.....	79
Fig. 3.13: Allures de couples électromagnétiques (a) et couples électromagnétiques en fonction des vitesses angulaire (b) en régime permanent.....	80
Fig. 4.1: Différentes étapes pour la détermination du nombre de composantes à retenir.....	89
Fig. 4.2: Résidu d'un courant statorique d'une MARB, $\ell =5$ et $\ell =6$ .....	92
Fig. 4.3: Projection des données « composante principale forte ».....	94
Fig. 4.4: Projection des données « deuxième composante principale ».....	94
Fig. 4.5: Projection des données « composante principale faible ».....	95
Fig. 4.6: Approche de diagnostic de défauts de la MARB par la méthode ACP.....	98
Fig. 4.7: Variation temporelle de résidu du courant de la « phase A » du stator.....	99
Fig. 4.8: Variation temporelle de résidu du courant de la « phase a » du rotor.....	99
Fig. 4.9: Résidu du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation.....	100
Fig. 4.10: Variation temporelle de résidu de la vitesse angulaire.....	100
Fig. 4.11: Résidu du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation.....	102
Fig. 4.12: Variation temporelle de résidu du couple électromagnétique.....	102
Fig. 4.13: Variation temporelle de résidu du courant de rotor en zoom.....	102

Fig. 4. 14: Variation temporelle de résidu du courant de stator en zoom.....	103
Fig. 4.15: Indice de détection d'une composante principale en fonction du nombre de mesure, défaut de 10%.....	105
Fig. 4.16: Indice de détection de deux composantes principales en fonction du nombre de mesure, défaut de 10%.....	106
Fig. 4.17: Indice de détection $D_i$ avec la 1ère composante principale en fonction du nombre de mesure, défaut de 10% et 30%.....	106
Fig. 4.18: Indice de détection $D_i$ avec la 1ère composante principale en fonction du nombre de mesures de la MARB.....	107
Fig. 4.19: Indice de détection $D_i$ avec une composante principale en fonction du nombre de mesures de la MARB.....	107
Fig. 4.20: Indice de détection $D_i$ avec deux composantes principales en fonction du nombre de mesures de la MARB.....	108
Fig. 4.21: Indice de détection de défaut filtré et non filtré de 1ère composante principale de la MARB.....	109
Fig. 4.22: Indice de détection de défaut filtré et non filtré de 1ère composante principale de la MARB.....	109
Fig. 4.23: Localisation de défauts des variables d'état de la machine avec un indice de localisation non filtré.....	112
Fig. 4.24: Localisation de défauts des variables d'état de la machine avec un indice de localisation non filtré.....	113
Fig. 4.25: Approche de diagnostic de la GADA par la méthode ACP.....	114
Fig. 4.26: Evolution temporelle des résidus de la tension rotorique alpha.....	114
Fig. 4.27: Evolution temporelle de résidu de la tension rotorique sur l'axe « bêta ».....	115
Fig. 4.28: Evolution de résidu de la tension rotorique sur les deux axes « alpha-bêta ».....	116
Fig. 4.29: Variation temporelle de résidu du courant sur l'axe direct D.....	116
Fig. 4.30: Variation temporelle de résidu du courant sur l'axe en quadrature.....	117
Fig. 4.31: Résidu du courant en quadrature en fonction de résidu du courant direct.....	117
Fig. 4.32: Evolution temporelle des résidus du couple électromagnétique.....	118
Fig. 4.33: Variation temporelle de résidu de la vitesse angulaire.....	119
Fig. 4.34: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire.....	119
Fig. 4.35: Variation temporelle de résidu de la tension statorique sur l'axe « alpha ».....	120
Fig. 4.36: Evolution temporelle des résidus de la tension statorique sur l'axe beta.....	120
Fig. 4.37: Evolution des résidus de la tension statorique sur les deux axes «alpha- beta».....	121

Fig. 4.38: Variation temporelle de résidu du courant statorique sur l'axe « alpha ».....	122
Fig. 4.39: Evolution temporelle de résidu du courant statorique sur l'axe « beta ».....	122
Fig. 4.40: Evolution des résidus du courant statorique sur les deux axes «alpha- beta».....	123
Fig.5.1: Courant au stator sur l'axe alpha.....	148
Fig.5.2: Courant au stator sur l'axe beta.....	148
Fig.5.3: Courant au rotor sur l'axe alpha.....	148
Fig.5.4: Courant au rotor sur l'axe beta.....	149
Fig.5.5: Tension au stator sur l'axe alpha.....	149
Fig.5.6: Tension au stator sur l'axe beta.....	149
Fig.5.7: Tension au rotor sur l'axe alpha.....	150
Fig.5.8: Tension au rotor sur l'axe beta.....	150
Fig.5.9: Résidu du courant au stator sur l'axe alpha.....	151
Fig.5.10: Résidu du courant au stator sur l'axe beta.....	151
Fig.5.11: Résidu du courant au rotor sur l'axe alpha.....	151
Fig.5.12: Résidu du courant au rotor sur l'axe beta.....	152
Fig.5.13: Résidu de tension au stator sur l'axe alpha.....	152
Fig.5.14: Résidu de tension au stator sur l'axe beta.....	152
Fig.5.15: Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha.....	153
Fig.5.16: Résidu de tension au rotor sur l'axe beta.....	153
Fig. 5.17: Test de Page-Hinkley des variables courants (isbeta et irbeta).....	154
Fig. 5.18: Test de Page-Hinkley des variables tensions (Vsalph et Vralph).....	155
Fig. 5.19: Localisation des variables d'état contenant de biais.....	155
Fig.5. 20: Courant au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	156
Fig.5. 21: Courant au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif.....	157
Fig.5. 22: Courant au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	157
Fig.5.23: Courant au rotor sur l'axe b�ta avec un biais évolutif.....	157
Fig.5.24: Tension au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	158
Fig.5.25: Tension au stator sur l'axe b�ta avec un biais évolutif.....	158
Fig.5.26: Tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	158
Fig.5.27: Tension au rotor sur l'axe beta avec un biais évolutif.....	159
Fig. 5.28: Résidu du courant au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	159
Fig. 5.29: Résidu du courant au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif.....	160
Fig. 5.30: Résidu du courant au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	160
Fig. 5.31: Résidu du courant au rotor sur l'axe beta avec un biais évolutif.....	160

Fig. 5.32: Résidu de tension au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	161
Fig. 5.33: Résidu de tension au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif.....	161
Fig. 5.34: Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	161
Fig. 5.35: Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif.....	162
Fig. 5.36: Test de Page-Hinkley des variables courants (isbeta et irbeta) avec un biais évolutif.....	163
Fig. 5.37: Test de Page-Hinkley des variables tensions (Vsalph et Vralph) avec un biais évolutif.....	163
Fig. 5.38: Localisation des variables d'états en défaut.....	164

## Liste des tableaux

Tab.5.1 : Tableau des résultats du test de Student.....	154
Tab.5.2: Tableau des résultats du test de Student avec de biais évolutif.....	162

## Notations

$[V_s], [V_r]$ :	Vecteur de tension respectivement du stator et rotor
$[I_s], [I_r]$ :	Vecteur de courant respectivement du stator et rotor
$[\Phi_s], [\Phi_r]$ :	Vecteur de flux respectivement du stator et rotor
$[R_s], [R_r]$ :	Matrice de la résistance respectivement statorique et rotorique
$J_t$ :	Inertie totale ramenée à l'arbre du moteur
$\Omega$ :	Vitesse de rotation de la machine
$[I]$ :	Vecteur courant de la machine
$f_v$ :	Couple de frottement visqueux
$C_{em}, T_{em}$ :	Couple électromagnétique respectivement de la MARB et de la GADA
$C_r$ :	Couple résistant appliqué à la machine
$\theta$ :	Position angulaire du rotor par rapport au stator
$[L_{ss}]$ :	Matrice spécifique au stator
$[L_{rr}]$ :	Matrice spécifique au rotor
$L_s$ :	Inductance propre d'un enroulement statorique
$M_s$ :	Inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques
$L_r$ :	Inductance propre d'un enroulement rotorique
$M_r$ :	Inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques
$L_{sr}$ :	Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique et rotorique
$p$ :	Nombre de paire de pôle de la machine asynchrone
$R_0$ :	Valeur de la résistance $R$ à la température ambiante $T_0 = 25^\circ\text{C}$
$\alpha$ :	Coefficient de température de la résistance
$\Delta T$ :	Variation de la température
$P_{res}$ :	Puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau
$P_s$ :	Puissance transitant par le stator
$P_r$ :	Puissance transitant par le rotor
$P_{Mec}$ :	Puissance mécanique
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ :	Courant statorique sur les phases alpha et beta de la génératrice
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$ :	Courant rotorique sur les phases alpha et beta de la génératrice
$u_{\alpha s}, u_{\beta s}$ :	Tensions statoriques sur les phases alpha et beta de la GADA
$u_{\alpha r}, u_{\beta r}$ :	Tensions rotoriques sur les phases alpha et beta de la GADA
$\omega_m$ :	Vitesse de rotation de la GADA

X :	Matrice de mesure
X <sub>cr</sub> :	Matrice des données centrée et réduite
R :	Matrice de corrélation ou de covariance
T :	Vecteur de composantes principales
Λ :	Matrice diagonale des valeurs propre de la matrice de covariance
P :	Vecteur propre de la matrice de covariance
λ :	Valeur propre de la matrice de covariance
T <sub>p</sub> :	Vecteur de la partie principale de Composantes Principales
T <sub>r</sub> :	Résiduelle de la matrice de Composantes Principales
P <sub>p</sub> :	Partie principale de vecteur propre P
P <sub>r</sub> :	Partie résiduelle de la matrice de vecteur propre P
C <sub>p</sub> , C <sub>r</sub> :	Matrices de projections sur le sous espace principal et le sous espace résiduel
Σ :	Matrice de covariance empirique
D <sub>i</sub> :	Indice de détection
γ :	Facteur d'oubli
w <sub>i</sub> :	Facteurs de pondération
y :	Vecteur de mesures,
x :	Vecteur des valeurs vraies
ξ :	Vecteur des erreurs
f :	Vecteur des contraintes d'égalité de dimension $m \times 1$
g :	Vecteur des contraintes d'inégalité de dimension $q \times 1$
Σ :	Matrice de variance des erreurs de mesure de dimension $n \times n$
u :	Vecteur des variables non mesurées de dimension $p \times 1$
x :	Vecteur des variables mesurées de dimension $n \times 1$
y :	Vecteur des mesures de dimension $n \times 1$
x <sub>k</sub> :	Vecteur des variables d'état, de dimension $n \times 1$
u <sub>k</sub> :	Vecteur des entrées de dimension $p \times 1$
w <sub>k</sub> :	Vecteur bruit de dimension $s \times 1$
y <sub>k</sub> :	Vecteur des mesures de dimension $m \times 1$
v <sub>k</sub> :	Vecteur des erreurs aléatoires de mesures de dimension $m \times 1$
S <sub>x</sub> :	Matrice de variance du vecteur $x$
S <sub>u</sub> :	Matrice de variance du vecteur $u$
Contr :	Contribution des valeurs propres
λ <sub>i</sub> :	Valeur propre de rang $i$

## **Abréviations et acronymes**

MARB :	Moteur Asynchrone à Rotor Bobiné
MACE :	Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil
MADA :	Machine Asynchrone Doublement Alimenté
GADA :	Génératrice Asynchrone Doublement Alimenté
ACP :	Analyse en Composantes Principales
FDI :	Fault Detection and Isolation
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor - Transistor bipolaire à grille isolée
PCS :	Principal Component Subspace
RS :	Residual Subspace
PCV :	Pourcentage Cumulé de la Variance
CSM :	Compagnie Salinière de Madagascar
SPE :	Square Prediction Error
EWMA:	Exponentially Weighted Moving Average
RDAP:	Réconciliation de Données par Approche Polynomiale
UMR:	Unités Mixtes de Recherche
CNRS:	Centre National de la Recherche Scientifique
SPE 6134:	Science Pour l'Environnement 6134

# 1. Introduction générale

Vu la mondialisation, l'intense industrialisation des dernières décennies, les besoins planétaires en énergie sont exponentielles et par conséquent, on voit une diminution importante des réserves pétrolières et une dégradation assez rapide de l'environnement. Face à ce problème, et de façon à limiter l'emploi des ressources conventionnelles, certains pays ont massivement fait appel à des sources d'énergies dites « nouvelles et renouvelables » peu polluantes, mais moins rentables.

Les éoliennes apportent une réponse viable à ces problèmes environnementaux à des coûts proches de ceux des sources d'énergie traditionnelles. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. Toutefois, les unités de production d'énergie par éoliennes deviennent des systèmes de plus en plus complexes, et nécessitent une automatisation de plus en plus développée et une supervision très stricte pour obtenir un rendement énergétique optimal.

Cependant la disponibilité non permanente de cette énergie due à l'intermittence et l'état stochastique du vent constitue une des problématiques majeurs de cette filière ayant ainsi une répercussions directe sur leur coût d'exploitation. Heureusement, le développement des aérogénérateurs et l'introduction des convertisseurs de puissance ont permis d'améliorer le rendement de cette forme d'énergie dans les sites ventés. La surveillance de ces processus demande alors un suivi rigoureux. Ce dernier doit être capable de détecter les défauts aussi bien capteurs que systèmes, de les localiser, et de les identifier pour décider des actions à entreprendre. Ces différentes étapes, qui constituent la base du diagnostic, doivent être exécutées aussi rapidement que possible avec le minimum d'erreur.

Dans la littérature, il existe une abondante production concernant les méthodes de diagnostic de défaut sur les éoliennes. Les recherches partent des méthodes analytiques jusqu'à l'intelligence artificielle en passant par la modélisation des systèmes. L'objectif de toutes les méthodes proposées tend généralement vers la conception de systèmes de surveillance plus performants.

Dans cette thèse, l'éolienne à surveiller dispose d'une génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA) dont les enroulements statoriques et rotoriques sont connectés au réseau électrique. L'idée de départ est de valider la méthode de diagnostic proposée avec le moteur asynchrone à rotor bobiné (MARB) avant de l'appliquer au système plus complexe qu'est l'aérogénérateur.



Le premier chapitre de ce manuscrit rappelle les notions de sûreté, de surveillance et de diagnostic de fonctionnement d'un système. Des lexiques et vocabulaires utilisés en surveillance et en diagnostic sont détaillés. Les différentes procédures pour la surveillance et diagnostic d'un processus de production sont présentés. Pour cela quatre étapes sont nécessaires à savoir : a) la recherche de signature de défaillance, b) la mise au point de la méthode utilisée, c) le diagnostic des défaillances, et enfin d) la prise de décision. Aussi, on cite et explique les différentes méthodes de diagnostic développés dans la littérature. Deux approches sont utilisées pour la détection et la localisation de défauts d'un tel système. La première est à base de modèle analytique et la seconde sans modèle à priori. Les méthodes de surveillance de machine électrique sont abordées, et on se propose d'étudier en priorité l'approche *modèle* par rapport à l'approche *signal* dans ce manuscrit.

Ensuite, le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné. Le début de ce chapitre montre les éléments constitutants de la MARB, suivi par la présentation des différentes méthodes de modélisation de la machine asynchrone en vue des détections de défauts. Par la suite on rappelle que les modèles de fonctionnement de la MARB peuvent être divisées en deux dont :

- Les modèles physiques régissant les lois de l'électromagnétisme, les plus utilisées pour la détection de défauts sont basées par : a) la méthode des éléments finis, b) la méthode des réseaux de perméance et c) la méthode des circuits magnétiquement couplés.

- Les modèles comportementaux qui utilisent le modèle physique mais avec de nouveaux paramètres qui permettent le diagnostic des défauts observés de la machine.

L'avant dernier paragraphe de ce chapitre est axé sur la modélisation de la MARB. Il s'agit d'établir la formulation et mise en équations mathématiques de la MARB à l'aide de la méthode des circuits électriques, magnétiquement couplés. Ces modèles sont ensuite implantés dans le logiciel MATLAB dans le but de simuler la machine en fonctionnements sain et défaillant afin de détecter la présence de défauts sur les variables d'état de la machine asynchrone à rotor bobiné. Les différents résultats de simulation ainsi obtenus permettent d'étudier les comportements de la MARB sur les deux fonctionnements. Par la même occasion, dans ce chapitre, les défaillances probables sur la MARB sont exposées. Enfin, un rappel sur les fonctionnements en moteur et en génératrice de la machine asynchrone à rotor bobiné est effectué.

Le troisième chapitre se focalise sur la modélisation de la génératrice doublement alimentée. Le modèle choisi sur la GADA est basé sur la théorie des deux axes. En effet, les

variables d'état de la machine sont modélisées sur les référentiels d-q et  $\alpha$ - $\beta$  respectivement de PARK et de CONCORDIA. De même que la MARB, l'ensemble des modèles mathématiques de la GADA sont programmés sous l'environnement Matlab/Simulink. Le schéma bloc de l'ensemble est présenté et leurs descriptions sont détaillées. Comme l'objectif de notre recherche est de diagnostiquer la GADA, la simulation en fonctionnements sain et défaillant génère des données de ses variables d'état, nécessaire pour valider la méthode de diagnostic adaptée dans le cadre de ce travail.

Le quatrième chapitre du document est axé sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et leur application sur le MARB et la GADA. L'ACP est une méthode statistique sans modèle à priori mais qui utilise les données de simulations de la machine modélisée mathématiquement. On rappelle le principe et la construction du modèle de cette méthode. Comme le choix du nombre de composantes à retenir est primordial pour le modèle ACP, différentes approches de la détermination de ce nombre sont proposées. Pour valider la méthode ACP, des graphiques avec des données réelles sont présentées, suivis par le diagnostic, la détection et la localisation par l'ACP en utilisant les résidus des variables d'état. L'indice de détection  $Di$  est proposé pour la détection et localisation de défauts de la MARB et GADA. Les derniers paragraphes de ce chapitre sont consacrés aux applications de la méthode ACP pour le diagnostic de la machine en fonctionnements moteur et génératrice.

Le dernier chapitre de ce mémoire est orienté vers la comparaison des données de deux méthodes de détection de défauts qui sont *l'estimation d'état* et *l'ACP*. L'objectif de la comparaison est de mettre en évidence les avantages et inconvénients de chaque méthode. L'estimation d'état utilise le principe de réconciliation des données par l'approche polynomiale. Un rappel de cette méthode est présenté.

Les deux approches sont soumises aux mêmes conditions de fonctionnement du dispositif à diagnostiquer, c'est-à-dire aux mêmes données d'entrée issues des données de simulation. Des études comparatives détaillées de ces deux approches sont effectuées.

# **Chapitre 1 : Etude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic**

## **1.1 SURETE DE FONCTIONNEMENT**

### **1.1.1. Introduction**

Parmi les facteurs qui contribuent à l'amélioration de la disponibilité, de la qualité et de la sûreté de fonctionnement ainsi qu'à la réduction des coûts de fonctionnement, les méthodes de diagnostic de défaillances, sont devenues des aides significatives, en particulier, pour l'exploitation des Systèmes Automatisés de Production, dont la complexité est en constante évolution [VELL06]. Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à isoler les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Il s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision et permet d'une part d'améliorer la qualité et d'autre part de réduire les coûts, en intervenant au cours des phases du cycle de vie du produit. La conception des systèmes automatiques nécessite de prendre en considération des fonctions telles que la surveillance, la supervision et d'inclure des aides à la gestion de production, à la gestion technique et à la maintenance. La diversité des définitions trouvées dans les différents travaux du domaine, nous oriente à établir un lexique des termes qui nous seront utiles pour la suite.

### **1.1.2. Notion utilisées en surveillance et diagnostic**

#### **1.1.2.1. Supervision**

Le mot « supervision » est le plus utilisé dans le domaine de l'automatisme ; pourtant, il n'est pas évident d'en donner une définition qui fasse l'unanimité. La supervision est généralement définie comme une tâche de commande et de surveillance de l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par d'autres agents (hommes ou machines), sans entrer dans les détails de cette exécution [AKER11]. Nous avons adopté la définition du Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine [GRAI98] qui stipule que « *la supervision est l'ensemble des outils et méthodes qui permettent de conduire des installations industrielles tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances ou de perturbations* ». Les activités concernées par ce mot clé sont le pilotage, la surveillance, le diagnostic et la prise de décision.

Pour concevoir un système de supervision, on a besoin de maîtriser les techniques suivantes [ZWIG95] :

- **Acquisition de données** : La première étape de la supervision, elle consiste à recueillir, à valider et à assurer l'acheminement des informations sur l'état du système jusqu'au poste de pilotage. Cette tâche est exécutée sans interruption et chaque instant, ces opérations impliquent l'utilisation des capteurs permettant de mesurer les différentes variables du processus. Ces informations seront utilisées dans des relations de résidus pour accomplir l'étape de détection.

- **Surveillance** : On utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement puis en détecter les évolutions. Elle permet également de détecter et diagnostiquer les défauts et les erreurs dans le système. En cas de dysfonctionnement, elle informe le module de maintenance et le module de supervision [NARV07]. Les deux types de surveillance sont la surveillance de la commande et la surveillance du système opérant.

- **Diagnostic** : Cette étape consiste à partir des défauts détectés, à localiser l'élément défaillant, à identifier la cause qui provoque ce défaut et à isoler les variables ou les systèmes en défauts. Avec cette étape, il est possible de remonter aux causes, c'est-à-dire remonter aux éléments défaillants à partir des résidus (cf. 1.1.2.).

- **Aide à la décision** : Elle consiste à aider l'opérateur à prendre la bonne décision devant toute situation, et cela en proposant une liste d'actions qui pourrait restaurer les grandeurs optimales du système. Dans cette étape, l'opérateur est toujours maître de la situation, car le système d'aide à la décision n'agit jamais, mais informe et conseille seulement. De ce fait le système ne calcule pas une valeur précise, mais propose plutôt quel moyen d'action devrait être exécuté.

- **Maintenance** : La maintenance est l'étape qui intervient généralement après l'étape de prise de décision. Elle consiste à maintenir ou à restaurer les performances des composants ou du système d'une façon globale, pour l'accomplissement de sa tâche requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de gestion.

#### 1.1.2.2. Surveillance

Le rôle de la surveillance est de recueillir en permanence tous les signaux en provenance du procédé et de la commande, de reconstituer l'état réel du système commandé et de faire toutes les interférences nécessaires pour produire les données utilisées ou utilisables en vue de :

- dresser des historiques de fonctionnement,
- le cas échéant, mettre en œuvre un processus de traitement de défaillance.

La surveillance regroupe les sous fonctions suivantes [RACO06] :

- **Détection** : qui répond à la question « y a-t-il une (nouvelle) anomalie dans le système ? », et permet de déterminer la normalité ou l'anormalité du système en fonctionnement.

- **Suivi** : qui a pour fonction de maintenir un historique des traitements exécutés et une trace des événements observés par le système de commande-supervision.

- **Pronostic** : peut être considéré comme la vision du degré de gravité et de l'évolution d'une défaillance, y compris les conséquences et leurs issues, en se référant à l'évolution habituellement observée pour des événements similaires.

#### 1.1.2.3. Système de surveillance et dysfonctionnement

Le système de surveillance a pour vocation première d'émettre des alarmes dont l'objectif est d'attirer l'attention de l'opérateur de supervision sur l'apparition d'un ou plusieurs événements susceptibles d'affecter le bon fonctionnement de l'installation. Avec la complexité des procédés, la génération d'alarmes est le moyen le plus employé pour avertir l'opérateur de l'occurrence d'un événement « anormal ». Les alarmes sont liées aux dysfonctionnements pouvant apparaître sur le système. Il est alors important de préciser le sens accordé aux termes employés pour évoquer les dysfonctionnements pouvant survenir dans le système. Nous retenons les définitions dans [LEFE00], [ADRO00] et [KHOV09] :

- **Anomalie** : condition anormale diminuant ou supprimant l'aptitude d'une entité fonctionnelle à accomplir une fonction requise. Elle permet de décrire tout ce qui n'est pas « conforme » à une référence.

- **Défaut** : anomalie de comportement au sein d'un système physique ; un défaut n'altère pas nécessairement le fonctionnement d'un système physique mais peut présager d'une défaillance à venir.

- **Défaillance** : anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique. C'est une cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques. La défaillance est un passage d'un état à un autre.

- **Défaillance partielle** : défaillance à la suite de laquelle le bien ne peut accomplir qu'une partie des fonctions requises ou ne peut les accomplir qu'avec des performances limitées.

- **Défaillance complète** : défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.

- **Panne** : inaptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction. C'est la cause de l'apparition de symptômes.

- **Panne complète** : panne résultant d'une défaillance complète.

- **Symptôme** : une ou plusieurs observations qui révèlent d'un dysfonctionnement. Il s'agit d'un effet qui est la conséquence d'un comportement anormal.

Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation d'une entité à accomplir sa fonction, celle-ci est déclarée en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

#### 1.1.2.4. Observateur, mesure et signature

Nous définissons les termes observation, mesure et signe issus de [VELL06] :

- **Observation** : c'est une information obtenue à partir du comportement ou du fonctionnement réel du système.

- **Mesure** : c'est une observation élémentaire du fait qu'elle reflète une seule et une seule grandeur physique. Elle est représentée par une variable dont le contenu est l'image d'une grandeur physique. Son obtention s'effectue par l'intermédiaire d'un système physique « capteur ».

- **Signature** : c'est le caractère distinctif d'un état comportemental anormal. Une signature est caractérisée par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et révèle la présence d'un défaut.

#### 1.1.2.5. Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité

La surveillance et le diagnostic constituent des leviers majeurs pour améliorer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'une entité [KHOV09]. Ces différents concepts sont définis par:

- **Fiabilité**: aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée.

- **Disponibilité**: aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

- **Maintenabilité**: aptitude d'un système à être remise en état par une maintenance adaptée afin d'accomplir des fonctions requises dans des conditions données. Elle se caractérise par la probabilité d'être en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir ces fonctions sachant qu'elle était en panne à l'instant 0. La maintenabilité ne se différencie de la fiabilité que sur ce dernier point. La maintenabilité, peut être traduite par la brièveté des pannes.

### 1.1.3. Principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement

La mise en place d'une démarche de sûreté de fonctionnement présente quatre étapes que nous nous proposons de synthétiser ci- après [KHOV09].

➤ La première étape porte sur *la recherche de signature des défaillances* et s'intéresse aux phénomènes ainsi qu'aux situations critiques pouvant mettre en péril la fonction, l'environnement et la mission d'un système. Ceci amène à s'interroger sur les phénomènes pouvant conduire à une situation critique et sur les conséquences des défauts à forte probabilité d'occurrence. Cette réflexion fait partie intégrante de la démarche de sûreté de fonctionnement. Il est donc important de bien connaître l'objet à surveiller afin d'appréhender au mieux son comportement, en l'absence et en présence de défauts. La difficulté rencontrée par le concepteur de la sûreté de fonctionnement est de savoir quels sont les éléments les plus sensibles d'une installation et à travers quelles grandeurs va-t-on être le plus à même d'observer les effets des défauts et comment vont se manifester les défauts sur ces grandeurs. Cette étape que l'on nomme par recherche de signatures des défaillances est une étape majeure dans la mise au point d'un dispositif de sûreté de fonctionnement.

➤ La seconde étape porte sur *la mise au point de méthodes de surveillance et de détection* qui utilisent les résultats de la première étape. Cette partie exploite les données pour mettre au point des techniques permettant de mettre en évidence les prémices ou l'occurrence d'un défaut. Les méthodes de surveillance et de détection des défauts s'appuient généralement sur des mesures directes ou indirectes de grandeurs liées au système en fonctionnement. L'objectif de cette étape est de chercher l'apparition des signatures des défauts surveillés et de générer automatiquement des indicateurs informant de l'apparition des défauts.

➤ La troisième étape concerne *le diagnostic des défaillances*. Elle consiste à analyser les données issues de la surveillance pour tenter d'identifier et de localiser la ou les causes probables de la défaillance. Dans cette étape on peut utiliser toutes les connaissances disponibles sur leur relation de cause à effet. Elle fournit des informations sur les degrés de criticité des défauts et cible les actions à prendre.

➤ La dernière étape est *l'étape décisionnelle* qui intervient pour appliquer les actions les plus appropriées afin de répondre aux exigences du cahier des charges de sûreté de fonctionnement dont le maintien de la fonction, la sécurisation et la maintenance.

Pour résumer, la sûreté de fonctionnement consiste à connaître, détecter, analyser, et maîtriser les défaillances des systèmes.

#### **1.1.4. Conclusion**

En vue de la surveillance et du diagnostic d'une machine asynchrone à rotor bobiné, nous avons rappelé la notion de sûreté et fonctionnement d'un système. Les différentes étapes à suivre pour la surveillance d'un processus de production ou de fonctionnement sont détaillées. Cette partie nous a permis de mettre au clair que, pour concevoir un dispositif de sûreté de fonctionnement, quatre étapes sont nécessaires dont : la recherche de signature de défaillance, la mise au point de la méthode utilisée pour la surveillance et détection de défaut, le diagnostic des défaillances (détection, localisation), et enfin la prise de décision. Nous avons établi un lexique des termes utilisés en diagnostic, les définitions de ces mots sont utiles pour la suite de l'étude.

### **1.2 NOTION DE DIAGNOSTIC D'UN SYSTEME**

En grec « *diagnosis* » (par connaissance), désigne l'identification d'une maladie par ses symptômes [CABA09]. Alors, le diagnostic d'un système est l'identification du mode de fonctionnement à chaque instant, par ses manifestations extérieures (symptômes). L'action de diagnostic consiste à identifier la (ou les) cause(s) probable(s) de la (ou les) défaillance(s) ou l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information(s). Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier l'hypothèse faite sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations à prendre [KHOV09]. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons spécifiquement au principe de diagnostic d'un système, les différentes approches de diagnostic, les défauts dans les machines tournantes et le diagnostic des machines électriques.

#### **1.2.1. Généralités**

Depuis quelques années, les systèmes industriels modernes deviennent de plus en plus complexes et de plus en plus sophistiqués. En effet, la fiabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont devenues très importantes [TALE04]. Le diagnostic des systèmes est apparu dans le but d'améliorer les points précédents et est devenu un sujet d'importance stratégique [JEZY04]. Toutes branches confondues, les procédés industriels sont couplés à un ordinateur numérique qui ne se contente pas de faire que l'acquisition des données mais aussi se charge de la mise en œuvre de l'automatisation. L'objectif du diagnostic est d'augmenter la performance du système, de garantir la qualité de production, et de diminuer les coûts de



fabrication. Mais il y a d'autres objectifs du diagnostic qui concernent l'amélioration de la sécurité de l'installation et des hommes qui y travaillent.

### **1.2.2. Procédures de diagnostic**

Dans la procédure de diagnostic, on distingue deux étapes principales : *la détection* et *la localisation* des défauts et en plus *l'identification* dans certaines méthodes. Les deux mots suivants « résidu » et « symptômes » sont généralement rattachés aux trois mots précédents. En pratique, dans un équipement industriel, lorsqu'un défaut apparaît le système de diagnostic détecte l'anomalie puis identifie la (ou les) cause(s) pour qu'il puisse être isolé. L'organisation de la procédure de diagnostic de défaut(s) d'un système est la suivante [MONN04] et [KHAT07] :

- Extraction des informations nécessaires,
- Elaboration des signatures associées aux symptômes des défauts,
- Détection de dysfonctionnements,
- Mise en œuvre de la méthode de diagnostic,
- Interprétation des données,
- Prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts.

### **1.2.3. Types de défauts**

Une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant peut être la conséquence de défauts et un défaut est une cause probable d'erreur pour un fonctionnement donné. Le système défaillant est incapable d'accomplir correctement sa ou ses fonction(s) avec les performances requises et les défauts apparaissent dans différents endroits du système [ISER04]. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation [RODR05], définissant alors les différents types de défauts :

- les défauts actionneurs
- les défauts procédés
- les défauts capteurs

Pour reconnaître la présence de l'un des trois types de défaut, il faut des connaissances approfondies de l'installation dont la connaissance de son comportement sain et de son comportement défaillant.

#### 1.2.3.1. 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. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire en régime normal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une dégradation de fonctionnement par rapport au fonctionnement sain.

#### 1.2.3.2. Défauts procédés

Ce type de défaut provient du système lui-même, souvent les défauts n'appartiennent pas à un défaut capteur ou actionneur. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit.

#### 1.2.3.3. Défauts capteurs

Le défaut capteur engendre une mauvaise image de l'état physique du système. Il existe deux types de défauts capteurs qui sont le défaut capteur partiel et le défaut capteur total. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ce défaut peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie. Et le défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer [RODR05].

### 1.2.4. **Approches de diagnostic**

Des nombreuses approches ont été utilisées pour le diagnostic de système en défaut. Parmi les différentes méthodes, on distingue deux familles principales [VELL06]:

- La première famille utilise le modèle mathématique du système à surveiller, et est employée généralement dans les domaines de l'automatisme. Souvent la méthode est appelée « méthode avec modèle »,
- La deuxième famille utilise 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 familles d'approches de diagnostic ont deux sous familles ; celles utilisant le modèle qualitatif et celles faisant appel au modèle quantitatif. Les deux modèles nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître un seuil de fonctionnement sain et défaillant. Ce seuil

permet de générer les symptômes lors de la phase de diagnostic [TALE07]. La figure 1.1 suivante présente les différentes méthodes de diagnostic sus mentionnées:

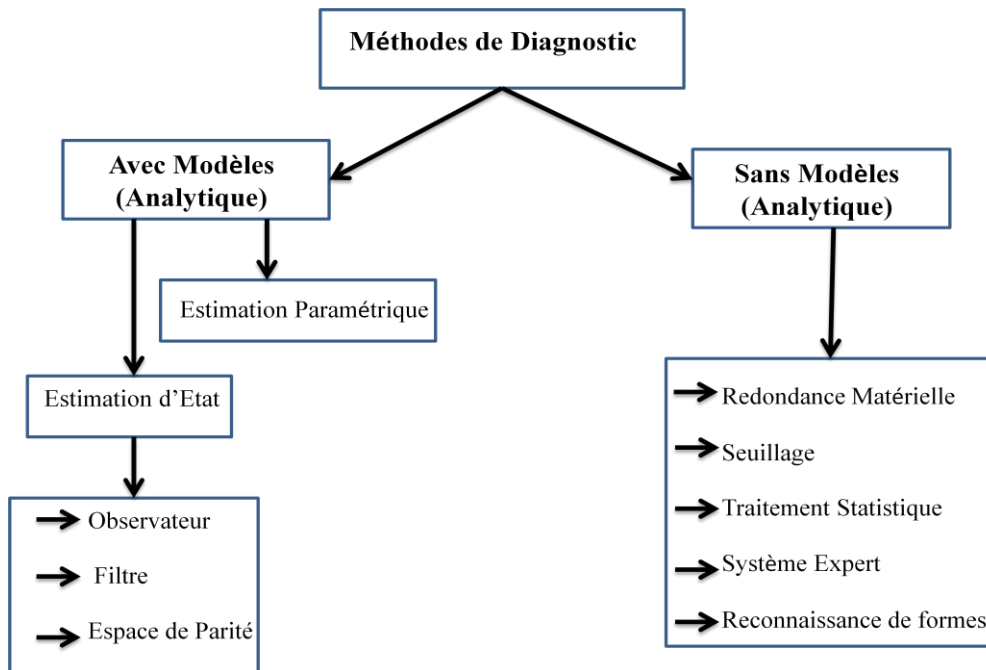


Fig. 1.1: Différentes méthodes de diagnostic

#### 1.2.4.1. 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. Au milieu des années 1980, pour construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques, l'intelligence artificielle s'intéresse au raisonnement qualitatif.

#### 1.2.4.2. Principe de l'approche quantitative

Cette approche très largement répandue utilise le modèle mathématique pour le diagnostic. Elle est basée sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé « indicateur de défaut » ou « résidu ». Le résidu est un signal qui permet d'identifier la présence ou non de défauts des systèmes et qui reflète la cohérence des données mesurées par rapport au modèle comportementale du système. Les modèles utilisés peuvent être très complexes, à temps continu ou temps discret, linéaires ou non linéaires.

### 1.2.4.3. 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 :

- **Redondance analytique** : consiste à utiliser des informations supplémentaires du modèle permettant l'élaboration de grandeurs de même nature que celles issues des capteurs. Dans cette méthode, on remplace les capteurs physiques par des capteurs informationnels. 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 [ALAO04].

- **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 [WILL76], [VELL06]. Avec cette méthode la détection d'apparition de défaut s'effectue par comparaison entre les paramètres théoriques et ceux estimés [ZEMO03].

- **Observateur** : reposant sur l'estimation d'état, il est parmi les méthodes les plus utilisées pour la génération de résidus, [PATT97] et [MAQU94]. Le vecteur résidu est obtenu en faisant la différence entre le vecteur de sortie du système réel et le vecteur de sortie estimé [BEDJ06]. Les observateurs s'adressent à un contexte déterministe. L'observateur d'ordre réduit ne considère qu'une partie du système ; par conséquent on n'estime qu'une partie de l'état et on élimine l'autre. On peut utiliser l'élimination d'une partie de l'état pour rejeter les perturbations, l'observateur à entrées inconnues utilise ce principe [SIRC09].

- **Filtre** : utilise une formulation similaire au problème d'estimation et s'appuie sur des modèles stochastiques. Le plus connu est celui de Kalman, [DESB03]. L'objectif de ce filtre est d'obtenir un estimateur non-biaisé et une variance de l'erreur d'estimation minimale. [ADRO00] et [SIRC09] utilisent le filtre de Kalman pour la détection et localisation de défaut de capteurs sur un système linéaire à temps variant. La méthode est couplée avec le module de moindres carrés et permet de considérer des défauts multiples et d'occurrence simultanée.

- **Espace de parité** : une des premières méthodes employées à des fins de détection et localisation des défauts (*Fault Detection and Isolation*, FDI). Le principe de cette méthode est la vérification de la consistance existant entre les entrées et les sorties du système surveillé.

L'espace de parité est utilisé sur des systèmes linéaires mais est inexploitable sur ceux non linéaires [ROTH10].

#### 1.2.4.4. Diagnostic sans modèle à priori

Les méthodes se basent sur les informations issues d'une expérience préalable, des règles heuristiques ou des exemples de résolution de défaillances déjà apparues sur des cas similaires. La méthode est appelée aussi « méthode à base de données historiques » [NARV07]. On peut exploiter aussi les lois physiques décrivant le comportement attendu du système. L'écart entre le fonctionnement sain et le fonctionnement défaillant permet de considérer la présence de symptômes d'une panne.

Les méthodes de diagnostic de défauts sans modèle sont les suivantes :

- **Redondance matérielle** : consiste à multiplier le nombre de capteurs, actionneurs, processeurs critiques sur l'installation. Le traitement des signaux redondants issus de ses matériels permet de distinguer l'élément défaillant en cas d'incohérence. Cette méthode 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 [KHAT07]. L'inconvénient majeur de la redondance physique, est qu'elle ne détecte pas des pannes venant des éléments non redondants.

- **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.

- **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 [WILL76] et [VELL06] basé sur le maximum de vraisemblance généralisée et minimiser le nombre d'observations nécessaires à la prise de décision.

- **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. 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.

- *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 [VELL06].

### **1.2.5. Conclusion**

Dans cette partie, les principaux termes utilisés en surveillance et en diagnostic de systèmes ont été définis. Des différentes approches pour la détection des défauts d'un système ont été abordées. On peut conclure que pour la procédure de diagnostic, il n'y a que deux méthodes : à base de modèle analytique du système et celle sans modèle. La première méthode englobe deux approches : l'estimation d'état et l'estimation paramétrique et la seconde méthode réunit les cinq approches dont la redondance matérielle, le seuillage, le traitement statistique, le système expert et la reconnaissance de formes. L'utilisation et l'application de ces méthodes de diagnostic dépendent de plusieurs conditions comme l'accès ou pas aux données du système, aux possibilités ou pas de modéliser le système (actionneurs, procédés et capteurs). Dans la suite du document, nous allons présenter le diagnostic des machines électriques.

## **1.3 DIAGNOSTIC APPLIQUE A LA MACHINE ELECTRIQUE**

### **1.3.1. Introduction**

Depuis de nombreuses années, la détection de défauts sur les machines électriques a fait l'objet des réflexions et des recherches dans différents laboratoires tant industriels qu'académiques. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature, suite aux exigences des systèmes industriels, qui sont d'avoir des dispositifs électriques fiables, disponibles et sécurisés pour les utilisateurs et les dispositifs eux mêmes. Différentes approches selon l'angle d'étude, sont menées pour le diagnostic de défauts des machines électriques. Ce paragraphe donne un aperçu des différents défauts dans les machines électriques, leurs classifications et leurs origines.

### **1.3.2. Grandeurs analysées**

Par définition, les défauts dans les machines électriques sont tous les incidents qui entraînent un fonctionnement anormal de la machine, et qui peut, à court terme ou à long terme, provoquer son endommagement. Les défauts dans les machines peuvent être d'origine électrique, mécanique, magnétique ou l'association de ces types des défauts. Les grandeurs à analyser pour le diagnostic de ces défauts dépendent des types, des causes et des approches d'études. Mais à ce jour, l'analyse des grandeurs mesurables et les signatures des défauts sont les plus utilisées pour le diagnostic de la machine électrique. Les principales grandeurs concernées sont :

- Les courants statoriques,
- Les courants rotoriques,
- La tension d'alimentation,
- Le Flux rayonnant de dispersion,
- La tension du neutre,
- Le couple électromagnétique,
- La vitesse de rotation,
- La puissance instantanée,
- Les courants dans le repère de Park,
- La vibration mécanique.

Les signaux obtenus à partir de ces grandeurs mesurables donnent des informations qui peuvent être redondantes ou non. Le traitement des informations mesurées est un travail d'identification des signaux de symptôme du défaut à travers sa signature [RAZI06]. Il faut noter que de nos jours les matériels nécessaires pour l'acquisition de ces données sont encore très coûteux.

### **1.3.3. Types et causes de défauts dans les machines électriques**

Les progrès en ingénierie et en sciences des matériaux ont entraîné les machines électriques à devenir plus légères, tout en ayant une durée de vie considérable. Néanmoins, malgré les améliorations apportées aux techniques de conception, les défauts peuvent encore se produire. Selon l'étude statistique effectuée par une compagnie d'assurance Allemande de systèmes industriels [ALLI88] et [ONDE06], la répartition de défauts dans la machine asynchrone (MAS) est représentée sur les deux figures suivantes. Leurs observations s'étaient portées sur

les machines de faible et moyenne puissance, 50 KW à 200 KW et sur des machines de grande puissance de 100 KW à 1 MW [CHIA08], [RAMA12],

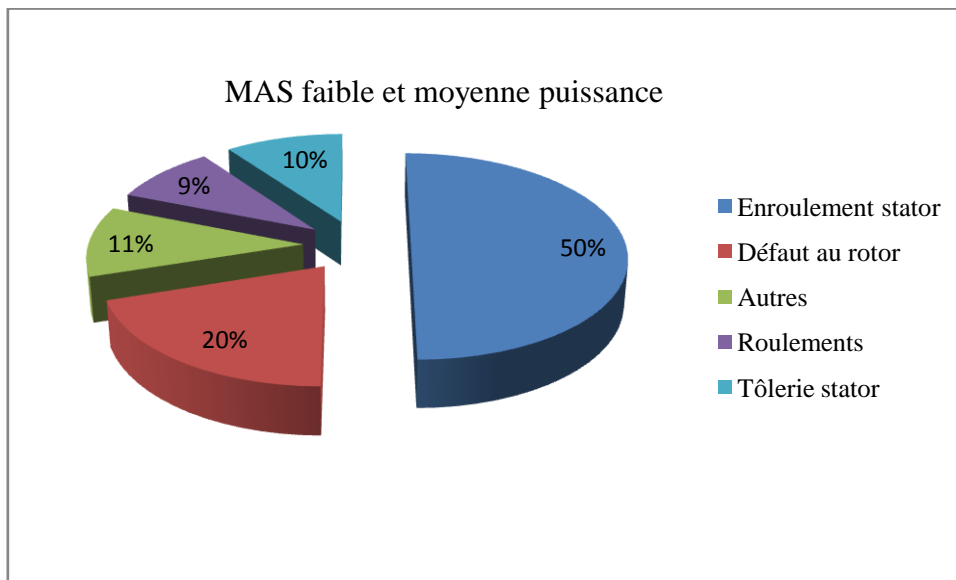


Fig. 1.2: Statistiques des défauts MAS de faible et moyenne puissance

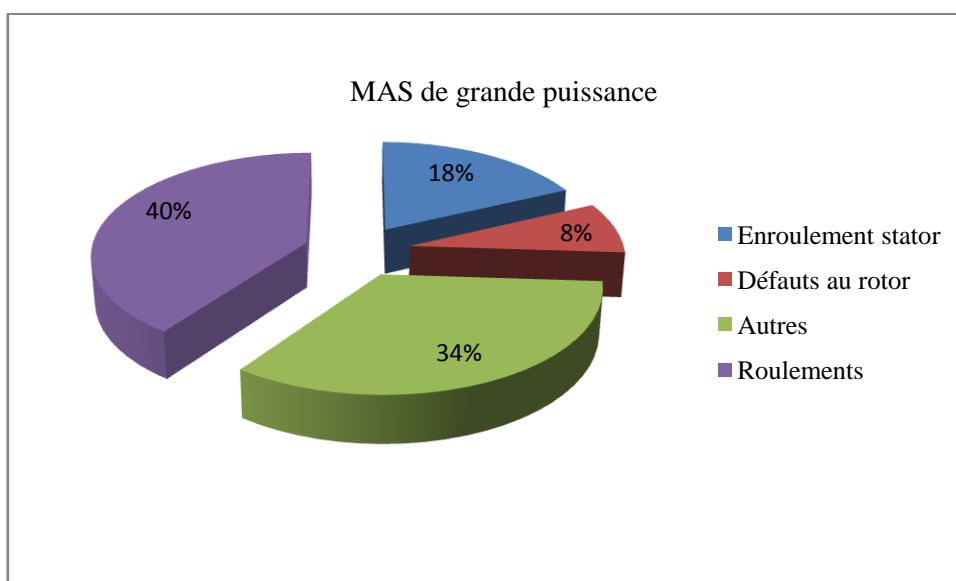


Fig. 1.3: Statistiques des défauts MAS de grande puissance

On voit sur la figure 1.2 que les défauts les plus rencontrés sur les machines asynchrones de faible et moyenne puissance sont les défauts statoriques. Et sur la figure 1.3, les défauts dus aux contraintes mécaniques occupent les pourcentages les plus élevés. En général, les défauts de la machine se divisent en quatre catégories :

- Les défauts statoriques
- Les défauts rotoriques



- Les défauts de roulement
- Les autres défauts

Les caractéristiques et les causes des défauts cités ci-dessus sont détaillées dans les paragraphes suivants.

#### 1.3.3.1. Défauts statoriques

Ils peuvent se situer au niveau des enroulements ou de la culasse. Dans la plus part des cas, la défaillance de l'enroulement démarre à partir d'un défaut entre spires. Finalement ce dernier grandit et entraîne les défauts entre les bobines, entre les phases, ou entre la phase et la terre, avant la détérioration du moteur [KLIM96].

Les causes de défaillances statoriques peuvent être dues à un des problèmes suivant :

- **Thermique** : la durée de vie de l'isolation est fixée pendant la conception de la machine, alors qu'en cours d'utilisation si la température augmente au dessus de la température de fonctionnement, la durée de vie de l'isolant se raccourcit rapidement. La variation de tension d'alimentation ou le déséquilibre, la répétition de démarrages dans un laps de temps court, des surcharges, une mauvaise ventilation ou une haute température ambiante peuvent entraîner une augmentation de la température de l'isolant.

- **Electrique** : une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de la variation de la tension par rapport au temps suite à l'ouverture et fermeture répétitive des interrupteurs du convertisseur statique vont conduire rapidement à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant et qui peut créer des spots carbonisés dans l'isolant. Ces spots causent des déformations du champ électrique et une augmentation de ce champ apparait dans la région du défaut.

- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de la machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre. Cet effet cyclique crée des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoque un début de court circuit interne de l'enroulement. Autre cause de défaut, les efforts mécaniques sur les conducteurs et les conducteurs peuvent provoquer des vibrations de la structure. L'effet de ces efforts mécaniques provoque l'érosion et l'abrasion de l'isolant [VASE09]. Dans le cas des machines à moyenne et grande puissance, le noyau est compressé avant l'emplacement des tôles afin de minimiser les vibrations des feuilles de laminage et de maximiser la conductivité thermique. Les problèmes

des noyaux sont rares, seulement 1% par rapport aux problèmes d'enroulement [NEGR06], [IBRA10] et [RAMA11].

- **Environnemental** : la présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à un défaut d'enroulement. En effet, il y a apparition de courants de fuite et ces problèmes accélèrent la détérioration de l'isolant allant jusqu'au court circuit franc. Une autre conséquence est la création d'ozone et d'oxydes d'ozone qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, et peuvent détruire l'isolant [VASE09].

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court circuit entre spires, court circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation et défaut de circuit magnétique.

#### 1.3.3.2. Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques sont essentiellement dus à un problème thermique, électromagnétique, résiduel, dynamique, ou d'environnement [RAZI02]. Les défauts les plus récurrents et les plus localisés peuvent être la rupture de barres, une portion d'anneau de court circuit dans les machines asynchrones à cage d'écureuils, l'échauffement qui entraîne une détérioration de l'isolant suivie par un court circuit des enroulements dans le cas des machines asynchrones à rotor bobiné (MARB). Dans les deux types de machines, on peut trouver aussi l'excentricité statique et dynamique du rotor.

- **Ruptures de barres** : la cassure de barres est le défaut le plus rencontré dans la machine asynchrone à cage d'écureuil (MACE). Le défaut peut se situer soit au niveau de l'encoche soit au niveau des extrémités qui relie l'anneau de court circuit et les barres. Ce défaut peut provoquer une réduction de la valeur moyenne du couple électromagnétique et qui entraîne une variation ascendante de l'amplitude des oscillations, et donc une variation de la vitesse de rotation. Cette dernière peut engendrer un fonctionnement anormal de la machine et des vibrations mécaniques.

- **Ruptures d'anneaux** : ce type de défaut est plus présent que la rupture de barre pour la machine asynchrone à cage. Elles peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations des différentielles entre les barres et les anneaux. Ce type de défaut est difficile à détecter car on le confond souvent avec la rupture de barre. Ils entraînent un déséquilibre de la répartition des courants dans les barres rotoriques donc une modulation d'amplitude sur les courants statoriques. Ces signatures de défaut sont similaires à celles provoquées par la cassure de barres [BENT98].

- **Excentricité statique et dynamique** : généralement liées à un mauvais alignement du rotor. Le défaut se traduit par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique et dynamique du rotor. L'origine de ce défaut est due au positionnement incorrect des paliers pendant l'assemblage du moteur ou à un défaut de roulement, de charge ou d'usinage [RAMA11]. Il y a trois types d'excentricités :

➤ **Excentricité statique** ou le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe,

➤ **Excentricité dynamique** ou le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe,

➤ **Excentricité mixte** associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine et induit une augmentation des forces électromagnétiques agissant sur l'armature statorique et l'enroulement suite à la dégradation de son isolant. Les défauts d'excentricités peuvent provoquer des vibrations considérables dans les enroulements.

- **Défaut dans l'enroulement** : pour la machine asynchrone à rotor bobiné, les dégradations des isolants provoquent des courts-circuits. En effet, les différentes pertes engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température et tension. Les causes de défauts d'enroulement sont dûs à la dégradation d'isolants, la tension d'alimentation supérieure à la tension limite supportée par l'isolant, le courant élevé, la surcharge, la vibration mécanique, le vieillissement naturel de l'isolant ou le fonctionnement dans un environnement sévère.

#### 1.3.3.3. Défauts de roulement

Le roulement est l'interface entre le stator et le rotor. Il présente un vieillissement relativement rapide. Les défauts de roulement à billes sont diagnostiqués à partir du spectre de la mesure acoustique ou vibratoire [RAZI02]. Les défauts peuvent être causés par un mauvais choix des matériaux à l'étape de la fabrication, des problèmes de rotation au sein de la culasse, ou par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré. Ces derniers peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Les défauts sont de type : trous dans les gorges du roulement intérieur et extérieur, ondulation de la surface du roulement, corrosion due à l'humidité ou l'eau, graissage, décollement, ou effritement de surface provoqué par une surcharge.

#### 1.3.3.4. Autres défauts

Ils peuvent correspondre à un défaut du flasque ou de l'arbre. Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus souvent introduits à l'étape de fabrication.

#### 1.3.3.5. Causes des défauts

Les causes des défauts dans les machines électriques sont multiples, mais peuvent être classés en trois catégories [VASE09].

- ***générateurs de pannes ou initiateurs de défauts*** : surchauffe du moteur, défaut électrique du au court circuit, surtension d'alimentation, problème d'isolation, usure des éléments mécaniques, ou rupture de fixation.

- ***amplificateurs de défauts*** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, ou vieillissement.

- ***vices de fabrication et erreurs humaines*** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, désalignement du rotor, ou mauvais dimensionnement de la machine.

De même, malgré sa robustesse incontestable, la machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiés en deux catégories, [RAMA11]:

- Le défaut dur ou défaut brutal, modélisé par un changement brusque des entrées ou des paramètres du système.

- Le défaut doux ou défaut naissant, se réfère généralement à des changements progressifs des paramètres du système par rapport à leurs valeurs normales.

### 1.3.4. Surveillance de défauts dans les machines électriques

La surveillance est une méthode qui a pour objectif d'assurer le bon fonctionnement des systèmes, la continuité de service et la protection du matériel et des personnels [MART03], [KHAT07]. La méthode de diagnostic est incluse dans la surveillance des systèmes. Les principales tâches de diagnostic sont la détection et la localisation des défauts. Le premier consiste à signaler la présence de(s) défaut(s) dans la machine électrique et le second à déterminer le lieu ou la localité des variables incriminées.

Dans la suite, nous allons décrire les méthodes de diagnostic d'une machine asynchrone les plus rencontrées dans la littérature.

#### 1.3.4.1. Surveillance basée par l'analyse spectrale

Cette méthode est essentiellement utilisée pour la détection de défaut comme les ruptures de barres ou la portion d'anneaux pour la machine asynchrone à cage d'écureuil. On l'utilise aussi dans la détection de la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages pour toutes les machines électriques. La méthode consiste à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs à surveiller et de visualiser les fréquences parasites signifiant la présence d'une anomalie dans les grandeurs surveillées. Les grandeurs analysées par cette méthode sont soit des grandeurs électriques, plus particulièrement les courants d'alimentation de la machine, soit des grandeurs mécaniques comme la vibration, le couple électromagnétique et les flux. La figure 1.4 présente le principe de diagnostic par la méthode basée par l'analyse spectrale.

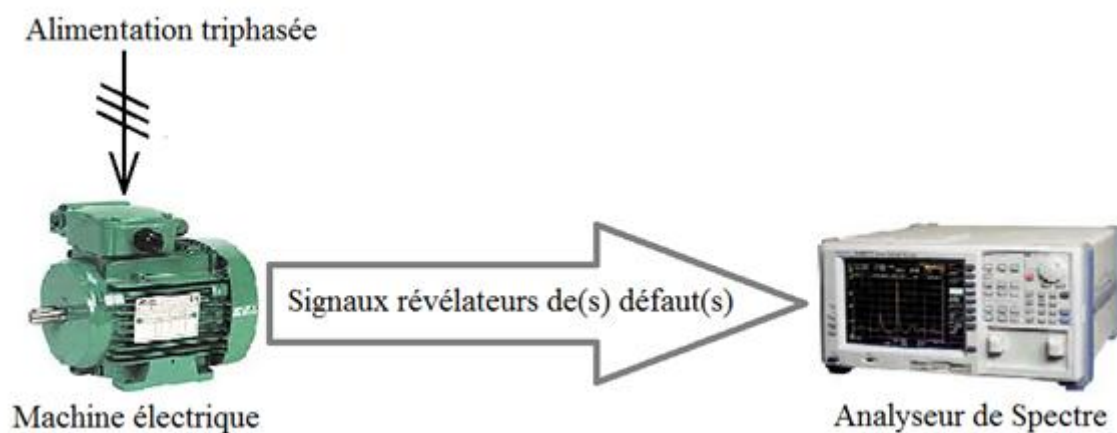


Fig.1.4 : Principe de diagnostic basé sur l'Analyse Spectrale

#### 1.3.4.2. Surveillance à base de modèle

La machine électrique est modélisée par des équations mathématiques. Les contraintes sont exprimées sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relation Entrée/Sortie ou Sortie/Sortie). La méthode consiste à comparer ces relations, appelées aussi relations de redondance. La méthode peut être séparée en deux étapes :

- **Génération de résidus** : exploite les données numériques issues du modèle mathématique de la machine électrique étudiée. Ces données sont comparées avec les mesures effectuées sur la machine électrique. Un écart entre les deux données signifie le fonctionnement anormal de la machine.
- **Localisation de défauts** : lorsqu'une panne est détectée, la procédure de localisation est utilisée pour déterminer l'origine de ce défaut, cette procédure nécessite l'ensemble de résidus (ensemble des grandeurs à surveiller).

### 1.3.4.3. Surveillance par la méthode de redondance matérielle

La méthode consiste à utiliser plusieurs capteurs, processeurs et logiciels pour détecter et contrôler une variable de la machine électrique. Le principe de vote est ensuite utilisé pour détecter l'élément en défaut. Cette méthode n'est pas récente pour la machine électrique, elle est utilisée plus fréquemment dans les systèmes à haut risques.

## 1.4 CONCLUSION

Dans les domaines des sciences, techniques et les secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer la compétitivité des systèmes de production. Le diagnostic des défauts, lorsqu'il est effectué avec efficacité joue un rôle très important pour contribuer à la qualité et au volume de production. Pour atteindre cet objectif et en vue de diagnostiquer les défauts sur la machine asynchrone à rotor bobiné, un des actionneurs le plus utilisé dans le système industriel, nous avons consacré ce chapitre à la notion de sûreté de fonctionnement. Nous avons établi le lexique des termes utilisés en diagnostic. Les procédures pour surveiller d'un système de production sont détaillées. Quatre étapes sont nécessaires pour concevoir cette surveillance dont :

- La recherche de signature de défaillance,
- La mise au point de la méthode,
- Le diagnostic des défaillances,
- La prise de décision.

Différentes approches pour la détection de défauts d'un système ont été abordées. En bref, le diagnostic de défaut est divisé en deux méthodes : celle à base de modèle analytique du système et celle sans modèle. La première méthode qui englobe deux approches, dont l'estimation d'état et l'estimation paramétrique, nécessite une mise en équation mathématique du système. La seconde méthode est basée sur la connaissance du système et réunit cinq approches dont la redondance matérielle, le seuillage, le traitement statistique, le système expert et la reconnaissance de formes. Les principes de toutes ces méthodes sont analysés. Toujours dans ce premier chapitre, nous avons rappelé brièvement les différentes grandeurs à analyser pour le diagnostic de la machine asynchrone suivies par les résultats statistiques des défauts d'une machine électrique. A ce niveau, on note que pour la machine de faible et moyenne puissance les défauts au niveau stator sont les plus fréquents et représentent plus de 50% de l'ensemble de défauts. Par contre pour la machine de grande puissance, les défauts mécaniques (roulements) occupent la première place. Les différentes méthodes de

surveillance et diagnostic d'une machine électrique sont rappelées. On remarque que l'approche utilisée pour le diagnostic d'une machine asynchrone est divisée en deux catégories : approche modèle et approche signal. Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour l'approche modèle, en vue d'utiliser la méthode statistique pour la détection et la localisation de(s) défaut(s) de la machine asynchrone à rotor bobiné. Ainsi, le chapitre suivant est consacré à la modélisation de la machine.

## 1.5 REFERENCES DU CHAPITRE 1

- [ADRO00] ADROT O., MAQUIN D. and RAGOT J., «Bounding approach to the fault detection of a class of uncertain dynamic systems», Proceedings of the IFAC Symposium on fault detection supervision and safety for technical process, pp. 1168-1173, Budapest, Hungary, 2000.
- [AKER11] AKERBERG J., «On safe and secure communication in process automation», Mälardalen University Press Dissertations, N° 109, Sweden, 2011.
- [ALAO04] ALAOUI R. M., BOUAMAMA B. O. and TAILLIBERT P., «Diagnostic based on temporal band sequences: An empirical comparison to statistical approaches». Word Automatic Congress, Seville, Espagne, 2004.
- [ALLI88] ALLIANZ, «Présentation des avaries. Machines électrique tournantes». Cahier des préventions. CP2, Allemagne, 1988.
- [BEDJ06] BEDJAOUI N., LITRICIO X. and KOENIG D., « $H_{\infty}$  observer design for time-delay systems: application to FDI for irrigation canals», 45<sup>th</sup> IEEE, Conference on Detection and Control, San Diego, 2006.
- [BENT98] BENTOUNSI A., «On line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motors Using FEM», IEEE, Transactions On Magnetics, volume 34, N°5, 1998.
- [CABA09] CABASINO M. P., «Diagnosis and identification of Discrete Event Systems using Petri Nets», PhD in Electronic and Computer Engineering, University of Cagliari, 2009.
- [CHIA08] CHIA-CHOU Y., «A Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Interturn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines», IEEE transaction on energy conversion, volume 23, N°4, page 1005-1014, 2008.
- [DESB03] DESBOUVRIES F., PIECZYNSKI W. « Modèles de Markov Triplet et filtrage de Kalman » Statistique/Probabilités, Science Direct, Elsevier, pp. 667- 670, 2003.



- [GRAIS98] GRAISYHM, «Méthodologie de conception des systèmes de supervision», Rapport Région Nord Pas de Calais, Valenciennes, France, 1998.
- [IBRA10] IBRAHIM A. K., MAREI M. I. and EL GOHARY H. S., «Modeling of Induction Motor Based on Winding Function Theory to Study Motor under Stator/Rotor Internal Faults», Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Middle East Power Systems Conference MEPCON'10, Cairo University, Egypt, 2010.
- [ISER04] ISERMANN R., «Model-Based Fault Detection and Diagnosis-Status and Application», IFAC, Institute of Automatic Control, Darmstadt University of Technology, 2004.
- [JEZY04] JEZYNSKI T., PUYCK P. and SIMROCK S., «Diagnostics for the low level RF control for the European an XFEL», Proceedings of LINAC, Lübeck, Germany, 2004.
- [KHAT07] KHAIR A. F. HEMSAS K. E. «Diagnostic des Machines Asynchrones: Utilisation du Modèle Multi Enroulements», 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'07, 2007.
- [KHOV09] KHOV M., «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.
- [KLIM96] KLIMAN G. B., PREMERLANI W. J., KOEGL R.A. and HOEWELER D., «A new approach to on-line fault detection in AC motors», In Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Conference, CA, pp. 687-693, San Diego, 1996.
- [LEFE00] LEFEBVRE F., «Contribution à la modélisation pour le diagnostic des systèmes complexes : application à la signalisation des lignes à grande vitesses», Thèse de Doctorat, Valenciennes, France, 2000.
- [MART03] MARTIN E. B., MORRIS A. J., «Monitoring performance in flexible process manufacturing». Centre for Process Analytics and Control Technology, IFAC, University of Newcastle, England, 2003.

- [MAQU94] MAQUIN D., DAROUACH M. and RAGOT J., «Robust observer for continuous uncertain systems», IEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, USA, 1994.
- [NARV07] NARVAEZ C. V. I., «Diagnostic par techniques d'apprentissage floues : conception d'une méthode de validation et d'optimisation des partitions». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, 2007.
- [NEGR06] NEGRE M. D., «Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines». PhD, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communication Engineering, Laboratory of Electromechanics, TKK Dissertation 51, Espoo, Finland, 2006.
- [TALE07] TALEB S. « Génération des symptômes flous par fft et swt application à la détection de vibrations », Thèse Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [ONDE06] ONDEL O., BOUTLEUX E. and CLERC G., «A method to detect broken bars in induction machine using pattern recognition techniques», IEEE Transaction on Industrial Application Society, Vol. 42, N°4, pp.916-923, 2006.
- [PATT97] PATTON R., CHEN J., «Observer based fault detection and isolation: robustness and application». Control Engineering Practice, Vol.5. N°5, pp. 671-682, 1997.
- [RACO06] RACOCEANU D., «Contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle». Thèse d'habilitation, Université de France-Comté de Besançon, 2006.
- [RAMA11] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J. M., «Principal Components Analysis Method: Application in Electrical Machines Diagnosis», 8<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Noordwykerhout, Pays Bas, 2011.
- [RAMA12] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J. M., «Performances of the PCA method in electrical

machines diagnosis using Matlab», INTECH, MATLAB/Book 1, ISBN 979-953-307-77-4-0, 2012.

- [RAZI02] RAZIK H., «Modélisation de la machine asynchrone à cage. Application à la simulation de moteur à cage défaillante. Spectres des courants des moteurs défaillants», CNRS/GREEN, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2002.
- [RAZI06] RAZIK H., «La machine asynchrone à vitesse variable : capteurs, modèles, contrôle et diagnostic», Editeur Hermès Science, 2006.
- [RODR05] RODRIGUES M., THEILLIOL D. and SAUTER D., «Fault Tolerant Control of Nonlinear Systems using LMI gain Synthesis», 16<sup>th</sup> IFAC World Congress Prague, Czech Republic, Version 1, 2009.
- [ROTH10] ROTH M., «Identification and Fault Diagnosis of Industrial Closed-loop Discrete Event-Systems», Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan and Universität Kaiserslautern Germany, 2010.
- [MONN04] MONNIN M., PALLUAT N., RACOCEANU D. and ZEROUNI N., «Diagnosis method using artificial intelligence: Application of fuzzy PETRI nets and Neuro- Fuzzy systems». Laboratoire d'Automatique de Besançon, 2004.
- [SIRC09] SIRCOULOMB V., RAGOT J., CHAFOUK H. and HOBLOS G., «Une nouvelle méthode d'estimation d'état en présence d'entrées inconnues: Application aux systèmes de navigation». Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués (IRSEEM), CRAN, Université de Nancy, 2009.
- [TALE04] TALEB S., LESECQ S. and STUECHER R., «Torsional vibrations detecting using torque measurement of a main drive of a hot rolling mill with wavelet transform», 11<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal processing, Nancy, France 2004.
- [VASE09] VASEGHI B., TAKORABET N. and MEIBODY- TABAR F., «Stator turn fault study and parameter extraction of induction machines using FEM», Journal COMPELS, 2009.

- [VELL06] VELLEMAN P., BILLAUDEL P. and RIERA B., «Traceability, a new approach to obtain decision-making aid», European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, EAM'06, Valenciennes, France, 2006.
- [WILL76] WILLSKY A. S., «A survey of design methods for failure detection in dynamic systems». Automatica, Vol 12, page 301-611, 1976.
- [ZEMO03] ZEMOURY M., «Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamique: Application à la e-maintenance». Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 2003.
- [ZWIG95] ZWINGEISTEIN G., «Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels». Édition Hermès, pp. 55-13, 1995.

# Chapitre 2 : Modélisation de la Machine Asynchrone à Rotor

## Bobiné

### 2.1 GENERALITES

Depuis des nombreuses années, la détection de défauts dans les machines électriques a fait l'objet de réflexions et de recherches dans les différents laboratoires tant industriels que scientifiques. Il y a plusieurs décennies, le moteur à courant continu et le moteur synchrone occupaient la première place d'utilisation sur le plan industriel, en effet les recherches de fiabilité étaient orientées vers ces deux types de machines. Avec l'évolution technologique et le progrès de l'électronique de puissance et surtout l'enjeu économique, l'utilisation de la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné occupent de plus en plus de place dans tous les domaines, transport, production d'énergie et entraînements électriques grâce à leur robustesse, leur fiabilité et leur coût moins élevé [SEGU82]. Les deux types de machine sont les plus utilisés dans l'industrie et les plus vendus [BENB00]. Malgré les travaux de recherches effectués, ainsi que les améliorations apportées, ces deux machines demeurent des sièges potentiels de défaillances, aussi bien au niveau stator que rotor.

Dans ce chapitre, la machine asynchrone étudiée est la machine asynchrone à rotor bobiné. Après avoir rappelé les éléments constituant la MARB, suivis par une brève citation des différentes méthodes de modélisation de ce type de machine, une mise en équation de la machine est proposée, en vue de la surveillance et du diagnostic des défauts.

### 2.2 ELEMENTS CONSTITUANTS DE LA MARB

Dans cette partie, on se propose de donner quelques précisions sur les éléments de la machine asynchrone à rotor bobiné. La machine asynchrone triphasée se divise en deux parties principales :

- **Le stator** est l'ensemble fixe constitué d'une carcasse et d'un circuit magnétique bobiné. Le bobinage du circuit magnétique est constitué de fils ronds émaillés pour les machines de faible puissance et de bobines réalisées en fils méplats émaillés et guipés pour les autres moteurs. Ils sont recouverts de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique

- **Le rotor** comporte un arbre qui peut être soit lisse soit comporter des bras. Pour le moteur asynchrone à rotor bobiné, l'enroulement est généralement un bobinage triphasé. L'enroulement de la machine de faible puissance est réalisé avec du fil rond en cuivre isolé ou

émaillé, souvent, l'isolation de la masse est constituée par des U d'encoche. Tandis que pour les moteurs de plus forte puissance, les bobinages sont réalisés à l'aide des barres perforées en cuivre et isolées par enrubannage ou émaillage. Le rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné comporte aussi des bagues et des portes balais.

## **2.3 METHODE DE MODELISATION D'UNE MACHINE ELECTRIQUE**

### **2.3.1. Introduction**

La modélisation et l'identification des paramètres de la machine électrique avec ou sans défaut sont des étapes importantes du diagnostic. Les modèles doivent présenter un compromis entre simplicité et précision. En fait, les modèles sont nécessaires pour étudier le comportement de la machine. L'étude de comportement des machines électriques grâce à ces modèles permet la prédiction des grandeurs externes qui peuvent être mesurées et exploitées par des techniques de surveillance et de diagnostic [MAHY09].

La modélisation de la machine asynchrone fait intervenir la matrice de transformation d'un repère  $(a, b, c)$  vers d'autres repères statique ou dynamique  $(d, q)$  ou  $(\alpha, \beta)$  pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court [ABED99] et [BAGH97]. Actuellement, suite à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons nous passer de ces transformations dans le cas de la machine asynchrone à rotor bobiné.

A ce jour, les modèles qui présentent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent être décomposés en deux parties [DIDI02] :

- Les modèles physiques régissant les lois de l'électromagnétisme. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [CASI05], les plus répandus de ces modèles sont basés sur :

- La méthode des éléments finis,
- La méthode des réseaux de perméance,
- La méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Ces trois types de modèles peuvent être traités avec des différentes approches qu'elles soient spatiales, temporelles ou fréquentielles.

- Les modèles comportementaux utilisent le modèle physique mais y incorporent d'autres paramètres. Les nouveaux paramètres permettent la détection et la localisation du défaut observé.

Par la suite nous développerons ces différentes méthodes de modélisation pour mieux comprendre les problèmes propres à chacune d'entre elles.

### **2.3.2. Méthode des éléments finis**

La modélisation des dispositifs électromagnétiques basée sur le calcul de la répartition du champ est la méthode locale. Cette méthode peut être mise en œuvre à l'aide du calcul analytique ou de méthodes numériques. La méthode des éléments finis est une approche qui demande un temps de calcul important mais c'est la plus adéquate et la plus répandue pour le calcul du champ magnétique statique ou quasi-statique. La méthode consiste à découper en plusieurs éléments de faible dimension, le circuit magnétique de la machine, en vue de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes [NEGR06]. On peut utiliser les équations de Maxwell, à partir des formes locales, pour résoudre ces problèmes. La résolution du problème est complexe et le problème du phénomène de saturation est traité mais de façon approchée [DIDI02]. Actuellement, on peut effectuer les analyses de la machine électrique en régimes transitoires, pas à pas dans le temps, grâce à la méthode des éléments finis et à la puissance de calcul des ordinateurs actuels. Par conséquent la méthode apporte plus d'information et de précision pour l'identification des paramètres caractérisant une machine électrique. Le but de la méthode est de trouver la cartographie du champ magnétique présent, afin d'en optimiser le dimensionnement.

### **2.3.3. Méthode des réseaux de perméance**

La méthode est basée sur la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit de la machine, et chaque tube est caractérisé par sa perméance qu'il se trouve dans l'air ou dans le fer. Et c'est à partir de la décomposition obtenue qu'on construit le réseau de perméance [DELF95]. On peut assimiler ce réseau à un circuit électrique en utilisant le flux et les différences de potentiels magnétiques au lieu des courants et différences de potentiels électriques. Cette méthode permet de prendre en compte les caractéristiques du fer de la machine asynchrone. Le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant la valeur précise de la perméabilité relative du fer. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine [RAMI06].

### **2.3.4. Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés**

Tout circuit magnétique, qu'il soit statique ou dynamique peut être modélisé par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés. Pour le circuit magnétique dynamique, la méthode est basée sur les influences des inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant

apparaître au sein de la machine. Ainsi, une modélisation précise de ces inductances, permet d'apporter plus d'information sur les signaux des variables de sortie de la machine, tels que le courant statorique et le courant rotorique ou encore la vitesse rotorique. C'est une approche qui offre plus de compromis, entre la précision de modélisation et le temps de simulation. Avec cette méthode de modélisation, on peut prendre en compte tous les défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court circuit pour les enroulements statoriques ou enroulements rotoriques, les défauts de rupture de barre et/ou de portion d'anneau de court circuit pour la machine asynchrone à cage d'écurueil et la variation de résistance en fonction de la température. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique. Dans le cas des machines électriques triphasées, on parle souvent des grandeurs dans le repère  $(abc)$  pour désigner les trois phases. Parfois, on peut transformer le modèle triphasé en modèle diphasé afin de réduire le nombre de variables d'état de la machine à un nombre minimal de variable. La transformation de Concordia ou celle de Clarke étant les plus utilisées.

### 2.3.5. Transformation des grandeurs triphasées $(abc)$

Chaque grandeur triphasée, comme la tension, le courant ou le flux, peut être représentée par un vecteur dans  $\mathbb{R}^3$ , repère dans le référentiel  $(abc)$ . Le modèle dans le référentiel  $(abc)$  peut se transformer dans le référentiel diphasé  $\alpha$ - $\beta$  ou dans le repère tournant d-q. Étant donné que dans la plupart des machines triphasées les courants de phases sont à somme nulle, alors le vecteur courant se trouve dans un plan  $(\alpha\text{-}\beta)$  passant par l'origine « 0 » figure 2.1, et perpendiculaire à un axe appelé l'axe homopolaire (O-h). En effet la composante homopolaire du courant est nulle. Les composantes homopolaires des autres grandeurs triphasées comme la tension, la force électromotrice et le flux ne contribuent donc pas à la conversion électromécanique d'énergie, ceci permet de réduire l'ordre du système [SEMA05].

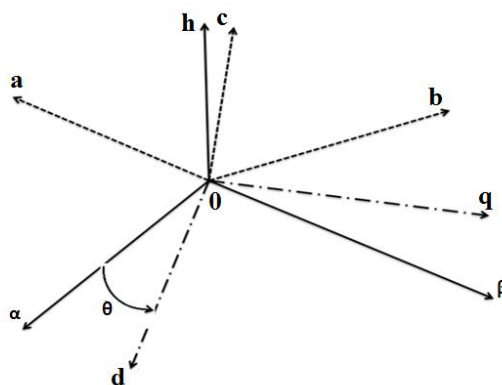


Fig. 2.1: Représentation des référentiels  $(abc)$ ,  $(\alpha\beta)$ ,  $(hdq)$



### 2.3.5.1. Transformation triphasé-diphasé

On considère un système sinusoïdal triphasé  $(x_a, x_b, x_c, x_o)$  représentant des grandeurs physiques de la machine dont les courants, les tensions ou les flux magnétiques. Dans le référentiel standard, on a :

$$x_a = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$

$$x_b = A \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-2)$$

$$x_c = A \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2-3)$$

Et la composante homopolaire  $x_o$  est donnée par :

$$x_o = x_a + x_b + x_c \quad (2-4)$$

Le système d'équation est dit équilibré, lorsque la composante homopolaire est nulle à chaque instant. Ceci nous permet de simplifier les équations de représentation d'un système triphasé  $(x_a, x_b, x_c)$  vers un système de représentation diphasé  $(x_\alpha, x_\beta)$ , ou inversement, d'une machine à courant alternatif à l'aide de la matrice de Concordia  $C_{32}$ .

Avec:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

et qui vérifie la relation :

$$C_{32}^t * C_{32} = I \quad (2-6)$$

où  $I$  la matrice identité.

La transformation des équations dans le référentiel triphasé standard vers le référentiel diphasé alpha et beta et inversement est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

### 2.3.5.2. Transformation du repère fixe vers le repère tournant (d, q)

Pour la transformation du repère fixe vers le repère tournant (d, q), on peut utiliser la matrice de rotation de Park, notée par  $P(\theta)$ , où  $\theta$  est la position angulaire du repère tournant :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Alors le passage du repère tournant (d, q) vers le repère fixe diphasé ( $\alpha, \beta$ ) est donné par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta)^t \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

où  $P(\theta)^t$  est la matrice transposée de  $P(\theta)$

Et le passage du repère tournant (d, q) vers le repère fixe triphasé (a, b, c) est exprimé par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta)^t C_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

En résumé une matrice unique de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

En conséquence,

$$[i_{s,r_{dq0}}] = [T][i_{s,r_{abc}}] \quad (2-13)$$

$$[V_{s,r_{dq0}}] = [T][V_{s,r_{abc}}] \quad (2-14)$$

$$[\varphi_{s,r_{dq0}}] = [T][\varphi_{s,r_{abc}}] \quad (2-15)$$

L'angle électrique  $\theta$  est l'angle entre le stator et l'axe d. L'indice 0 est l'indice des composantes homopolaires, ces composantes sont nulles pour le système triphasé équilibré.

Dans le cas où l'angle électrique est nul, la matrice de transfert devient la matrice de Concordia et on a :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Dans ce cas, les axes (d, q) sont appelés axes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) et le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  est lié au changement de base.

Dans la suite de cette thèse nous optons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler la machine asynchrone en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant.

## 2.4 MODELE DE LA MARB

### 2.4.1. Introduction

L'étape de modélisation s'avère indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître. Dans cette partie les modèles mathématiques de la machine asynchrone à rotor bobiné seront présentés et utilisés pour l'étude de la surveillance et du diagnostic. La particularité de la méthode que nous allons aborder est de n'introduire aucune transformation ni de Park ou Clarke ni de Concordia où la méthode utilisée est dite « *méthode des circuits électriques magnétiquement couplés* ».

Nous développerons ensuite les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques pour permettre la résolution numérique du modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné. L'objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone (courants, vitesse, ...). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques.

### 2.4.2. Hypothèses de départ

Dans l'approche proposée, nous avons supposé que [RAMA11a] :

- Le circuit magnétique est linéaire et non saturé (ce qui permet d'exprimer les flux comme une fonction linéaire des courants et parfaitement feuilleté au stator et au rotor, par

conséquent, seul les enroulements sont parcourus par des courants et que la densité de courant peut être considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires

- L'effet de peau est négligé pour qu'il n'expulse pas le courant à la surface des conducteurs.

- L'effet de la température, l'effet de peau, l'hystérésis et le courant de Foucault sont négligeables.

- L'épaisseur d'entre fer est uniforme afin que l'on ait la même répartition sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer en négligeant les effets d'encoche.

- La force magnétomotrice créée par les enroulements statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.

### 2.4.3. Mise en équation de la partie électrique

En tenant compte les hypothèses citées ci-dessus, les tensions triphasées du stator et les tensions triphasées du rotor, les courants statoriques et courants rotoriques sont reliés aux flux magnétiques totaux par les équations différentielles matricielles [RAZI02], [IBRA06] et [RAMA11b]. La figure 2.2 montre le circuit électrique équivalent du MARB. Chaque bobine de l'enroulement statorique et rotorique est modélisée par une résistance et une inductance montées en séries, figure 2.3. Sur cette figure  $V_j$ ,  $I_j$  et  $\Phi_j$  ( $j: A, B, C$  représentent les phases du stator et  $a, b, c$ , pour les phases du rotor) sont respectivement les tensions, les courants électriques et le flux magnétique du stator et du rotor, et  $\theta$  est la position angulaire du rotor par rapport au stator [RAMA12a].

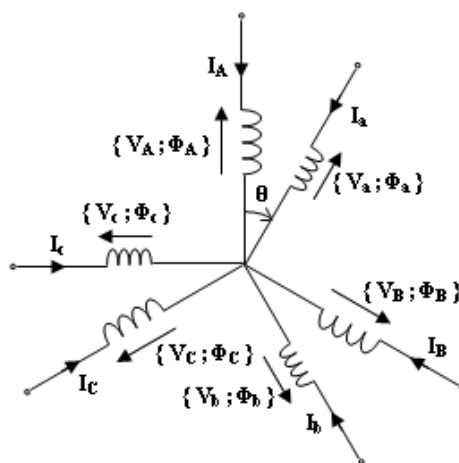


Fig.2.2: Circuit électrique équivalent de la machine

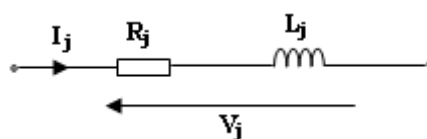


Fig.2.3: Circuit électrique équivalent d'un enroulement du MARB

On note par  $[V_s]$ ,  $[V_r]$  les vecteurs tensions,  $[I_s]$ ,  $[I_r]$  les vecteurs courants et  $[\Phi_s]$ ,  $[\Phi_r]$  le vecteur flux, respectivement du stator et du rotor de la machine.

L'expression sous forme différentielle de la tension au stator est donnée par :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad (2-17)$$

Et celle de tension au rotor s'écrit :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (2-18)$$

Avec

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \\ \Phi_C \end{bmatrix} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

et

- $v_A$  ,  $v_B$  ,  $v_C$  sont les tensions d'alimentation appliquées aux trois phases de l'enroulement statorique.
- $r_A$  ,  $r_B$  ,  $r_C$  sont les résistances de l'enroulement statorique.
- $v_a$  ,  $v_b$  ,  $v_c$  sont les tensions des trois phases rotoriques.
- $r_a$  ,  $r_b$  ,  $r_c$  sont les résistances de l'enroulement rotorique.
- $\Phi_A$  ,  $\Phi_B$  ,  $\Phi_C$  ,  $\Phi_a$  ,  $\Phi_b$  ,  $\Phi_c$  sont les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques.
- Les indices A, B, C et a, b, c font référence au stator et au rotor.

Sous forme condensée, les équations  $[V_s]$  et  $[V_r]$  deviennent :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d\{[L_s][i_s]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{sr}][i_r]\}}{dt} \quad (2-21)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d\{[L_r][i_r]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{rs}][i_s]\}}{dt} \quad (2-22)$$

où

- $[M_{sr}]$  : la matrice spécifique d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor
- $[M_{rs}]$  : la matrice spécifique d'inductance mutuelle entre le rotor et le stator

L'expression du flux magnétique est donnée par :

$$[\phi] = [L][I] \quad (2-23)$$

Ce vecteur de tension peut alors s'écrire :

$$[V] = [R][I] + \frac{d([L][I])}{dt} \quad (2-24)$$

En développant l'expression on a :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d([I])}{dt} + [I] \frac{d([L])}{dt} \quad (2-25)$$

soit encore :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d([I])}{dt} + [I] \frac{d[\theta]}{dt} \frac{d([L])}{d\theta} \quad (2-26)$$

et enfin on a :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d([I])}{dt} + [I] \Omega \frac{d([L])}{d\theta} \quad (2-27)$$

#### 2.4.4. Mise en équation de la partie mécanique

On pose par :

$J_t$  : L'inertie totale ramenée à l'arbre du moteur,

$\Omega$  : La vitesse de rotation de la machine,

$[I] = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]^t$  : Le vecteur courant de la machine,

$f_v$  : Le couple de frottement visqueux,

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique,

$C_r$  : Le couple résistant appliqué à la machine,

$\theta$  : La position angulaire du rotor par rapport au stator.

Par application du principe fondamental de la dynamique au rotor de la machine, on obtient les équations mécaniques de la machine [GHAN05]:

$$J_t \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega = C_{em} - C_r \quad (2-28)$$

avec

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I]^t * \frac{d([L])}{d\theta} * [I] \quad (2-29)$$

et

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-30)$$

On peut regrouper toutes ces équations sous forme «matricielle» tel que :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( [R] + \Omega \frac{d([L])}{d\theta} \right) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} [I]^t \frac{d([L])}{d\theta} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [\dot{I}] \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

#### 2.4.5. Equation différentielle de la MARB

Une forme condensée de la formule (2-31) s'exprime sous l'écriture suivante :

$$[U] = [B][X] + [A][\dot{X}] \quad (2-32)$$

et la matrice des inductances  $[A]$  obtenue, s'écrit sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & 0 & 0 \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

C'est une matrice qui ne dépend pas de l'angle rotorique  $\theta$  et donc il faudra l'actualiser pour ensuite l'inverser à chaque calcul. Les diverses matrices qui constituent la matrice  $[A]$  sont :

- L'inductance spécifique  $[L_{ss}]$  au stator qui est donnée par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

où

$[L_{ss}]$  : la matrice spécifique au stator comprenant :

- o  $L_S$  : l'inductance propre d'un enroulement statorique,
- o  $M_S$  : l'inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques.
- L'inductance spécifique  $[L_{rr}]$  au rotor est donnée par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

où

$[L_{rr}]$  : la matrice spécifique au rotor comprenant :

- o  $L_r$  : l'inductance propre d'un enroulement rotorique,
- o  $M_r$  : l'inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques.
- L'inductance mutuelle spécifique au stator et au rotor et inversement au rotor et au stator :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} L_{sr} f_1 & L_{sr} f_2 & L_{sr} f_3 \\ L_{sr} f_3 & L_{sr} f_1 & L_{sr} f_2 \\ L_{sr} f_2 & L_{sr} f_3 & L_{sr} f_1 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

où

$$\begin{aligned} f_1 &= \cos(p\theta) \\ f_2 &= \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_3 &= \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2-37)$$

avec

$L_{sr}$  : L'inductance mutuelle entre l'enroulement statorique et rotorique,

$p$  : Nombre de paire de pôles de la machine asynchrone.

En ajoutant les hypothèses suivantes :

- Le stator et le rotor ont le même nombre de spires en série par phase,
- Les bobinages sont identiques,
- Le moteur asynchrone est couplé en étoile et connecté au réseau en régime équilibré.

Il vient alors :

$$M_s = -\frac{1}{2}L_s = M_r = -\frac{1}{2}L_r \quad (2-38)$$

et la machine triphasée étant alimentée par 3 fils, nous avons à chaque instant :

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2-39a)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2-39b)$$

et en introduisant l'inductance cyclique  $L_{sc} = \frac{3}{2}L_s$ , la matrice inductance  $[L]$  de la matrice asynchrone à rotor bobiné peut se réécrire sous la forme suivante :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & 0 & L_{sr}f_1 & L_{sr}f_2 & L_{sr}f_3 \\ 0 & L_{sc} & 0 & L_{sr}f_3 & L_{sr}f_1 & L_{sr}f_2 \\ 0 & 0 & L_{sc} & L_{sr}f_2 & L_{sr}f_3 & L_{sr}f_1 \\ L_{sr}f_1 & L_{sr}f_3 & L_{sr}f_2 & L_{sc} & 0 & 0 \\ L_{sr}f_2 & L_{sr}f_1 & L_{sr}f_3 & 0 & L_{sc} & 0 \\ L_{sr}f_3 & L_{sr}f_2 & L_{sr}f_1 & 0 & 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

La matrice  $[B]$  sera quant à elle :

$$[B] = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\Omega \frac{dM_{sr}}{d\theta}\right] & 0 & 0 \\ \left[\Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta}\right] & [R_r] & 0 & 0 \\ [C_1 \ C_2 \ C_3] & [C_4 \ C_5 \ C_6] & f_v & 0 \\ [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

Et d'autre part, les deux autres matrices contenues dans  $[B]$  s'écrivent :

$$\left[\Omega \frac{dM_{sr}}{d\theta}\right] = \left[\Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta}\right]^t = \begin{bmatrix} -L_{sr}g_1 & -L_{sr}g_2 & -L_{sr}g_3 \\ -L_{sr}g_3 & -L_{sr}g_1 & -L_{sr}g_2 \\ -L_{sr}g_2 & -L_{sr}g_3 & -L_{sr}g_1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

avec

$$g_1 = \Omega p \sin(p\theta) \quad (2-43a)$$



$$g_2 = \Omega p \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (2-43b)$$

$$g_3 = \Omega p \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (2-43c)$$

Les éléments de  $C_1$  à  $C_6$  dans la matrice  $[B]$  peuvent s'écrire :

$$C_1 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_a h_1 + i_b h_2 + i_c h_3) \quad (2-44a)$$

$$C_2 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_a h_3 + i_b h_1 + i_c h_2) \quad (2-44b)$$

$$C_3 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_a h_2 + i_b h_3 + i_c h_1) \quad (2-44c)$$

$$C_4 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_A h_1 + i_B h_3 + i_C h_2) \quad (2-44d)$$

$$C_5 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_A h_2 + i_B h_1 + i_C h_3) \quad (2-44e)$$

$$C_6 = 0.5M_{sr} \cdot p(i_A h_3 + i_B h_2 + i_C h_1) \quad (2-44f)$$

avec

$$h_1 = \sin(p\theta) \quad (2-45a)$$

$$h_2 = \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (2-45b)$$

$$h_3 = \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (2-45c)$$

Sous forme condensée la dérivée du vecteur d'état  $[\dot{X}]$  peut s'écrire :

$$[\dot{X}] = [A]^{-1}([U] - [B][X]) \quad (2-46)$$

L'équation différentielle de la machine asynchrone à rotor bobiné peut s'exprimer par :

$$[\dot{X}] = [A]^{-1}[U] - [A]^{-1}[B][X] \quad (2-47)$$

où :

$$[X] = \begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

Dans le référentiel fixe  $(a, b, c)$ , le vecteur  $[V]$  peut s'écrire :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

et la dérivée du vecteur d'état s'exprime par :

$$[\dot{X}] = \begin{bmatrix} [\dot{i}] \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

En développant ce vecteur, on obtient :

$$[\dot{X}] = \left[ \frac{di_A}{dt}, \frac{di_B}{dt}, \frac{di_C}{dt}, \frac{di_a}{dt}, \frac{di_b}{dt}, \frac{di_c}{dt}, \frac{d\Omega}{dt}, \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (2-51)$$

Il existe beaucoup d'autres représentations d'état de la machine. Les différences viennent du choix du référentiel et les variables d'état. Mais dans ce rapport de thèse, on peut utiliser ce modèle de machine asynchrone triphasée à rotor bobiné dans le repère  $(abc)$  en cas de fonctionnement sain et défaillant du rotor ou du stator pour générer les données des variables d'état.

Les modèles de la machine obtenus sont simulés et programmés sous l'environnement SIMULINK/MATLAB.

#### **2.4.6. Variables d'états à surveiller de la machine**

Les modèles de la machine asynchrone à rotor bobiné sont caractérisés par des paramètres mécaniques et électriques. A partir du modèle triphasé dans le repère  $(abc)$  de la machine et en résolvant l'équation différentielle (2-36), les variables d'état obtenues de la machine sont :

- Les courants statoriques  $(i_A, i_B, i_C)$ ,
- Les courants rotoriques  $(i_a, i_b, i_c)$ ,
- La vitesse angulaire  $\Omega$ ,
- La position angulaire  $\theta$ .

Les variables d'état de la machine asynchrone à rotor bobiné peuvent être en fonctionnement sain ou en fonctionnement défaillant.

## **2.5 RESULTATS DE LA SIMULATION**

### **2.5.1. MARB en fonctionnement sain**

Ce modèle mathématique de la machine asynchrone à rotor bobiné (MARB) sera utilisé pour simuler à la fois le fonctionnement sain et le fonctionnement défaillant du système, Certains auteurs [RAZI02] ont déjà appliqué ce modèle pour étudier les spectres des courants des moteurs défaillants. Le modèle a été mis en œuvre par une programmation sous Matlab pour mettre en évidence le comportement du moteur. Les paramètres et les données de la machine sont présentés en annexe 1. Le couple mécanique est introduit à l'instant  $t= 2s$ . La résolution de l'équation différentielle est réalisée par la méthode de RUNGE KUTTA d'ordre 4. Dans cette partie on va présenter et étudier les différentes grandeurs électriques et

électromécaniques de la machine. Les résultats de simulation sont donnés par la figure ci-après.

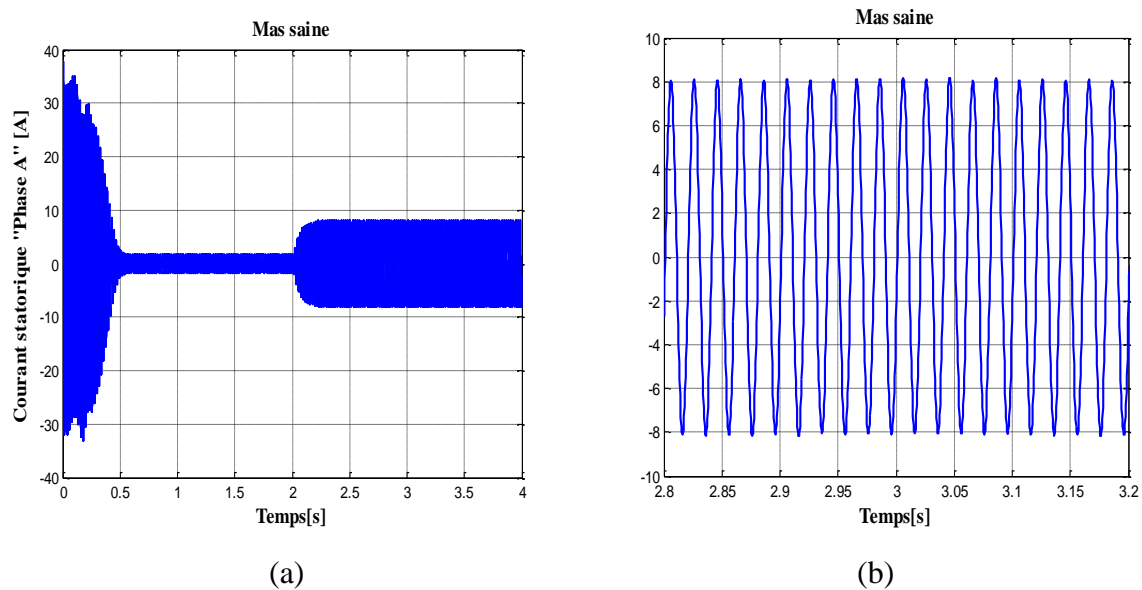


Fig. 2.4: Variation temporelle du courant de la phase « A » du stator (a : réelle et b : zoom)

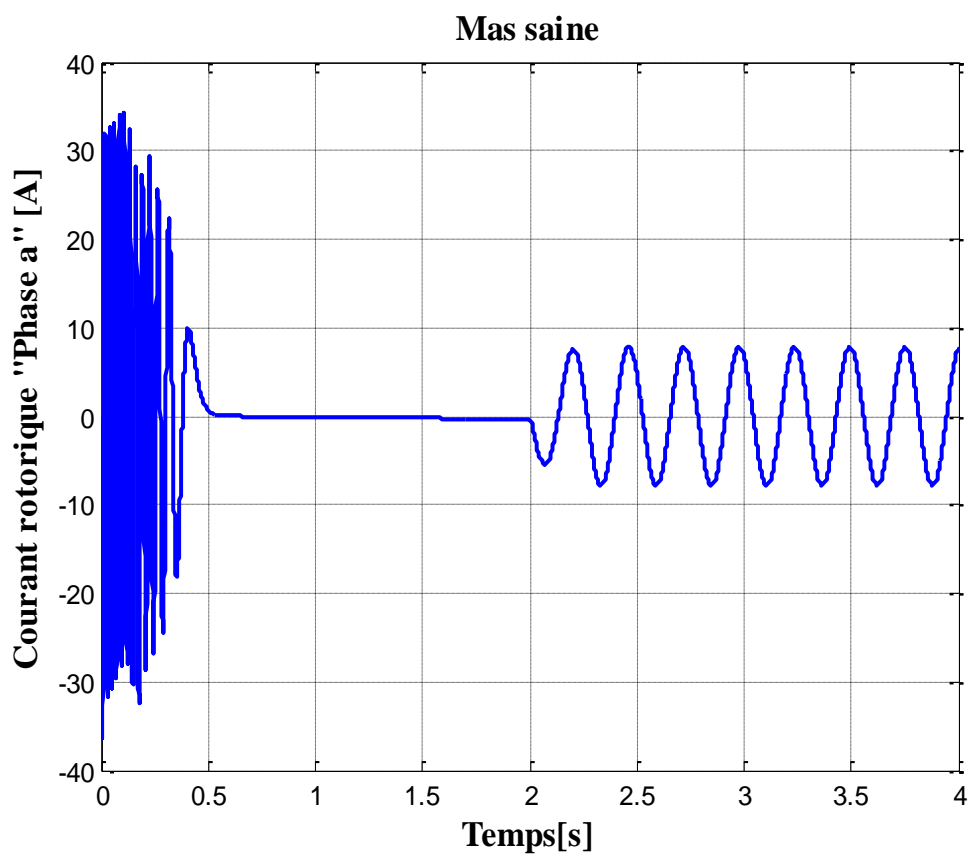


Fig. 2.5: Variation temporelle du courant de la phase «a» du rotor

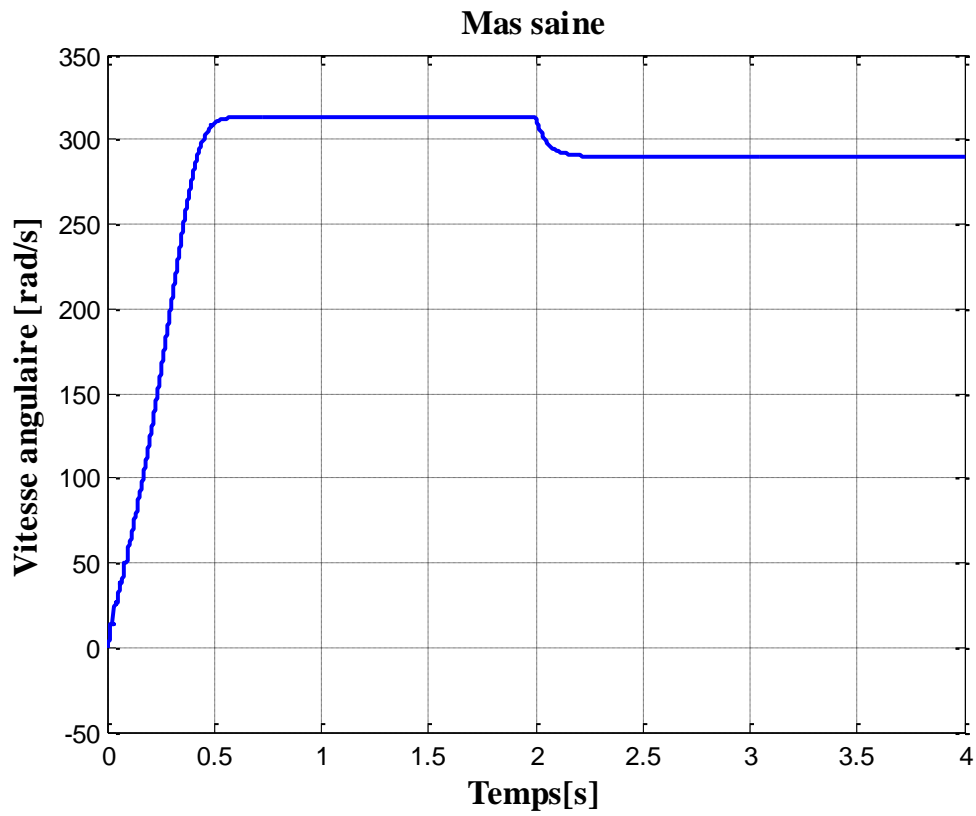


Fig. 2.6: Variation de la vitesse angulaire

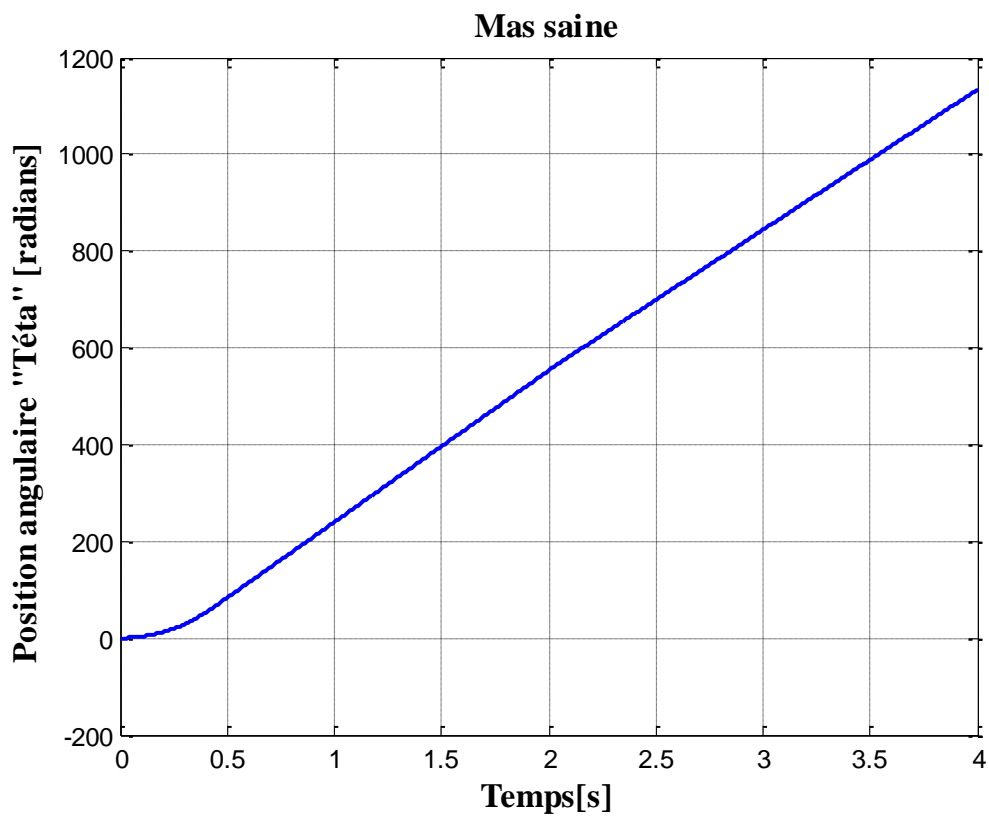


Fig. 2.7: Position angulaire « téta »

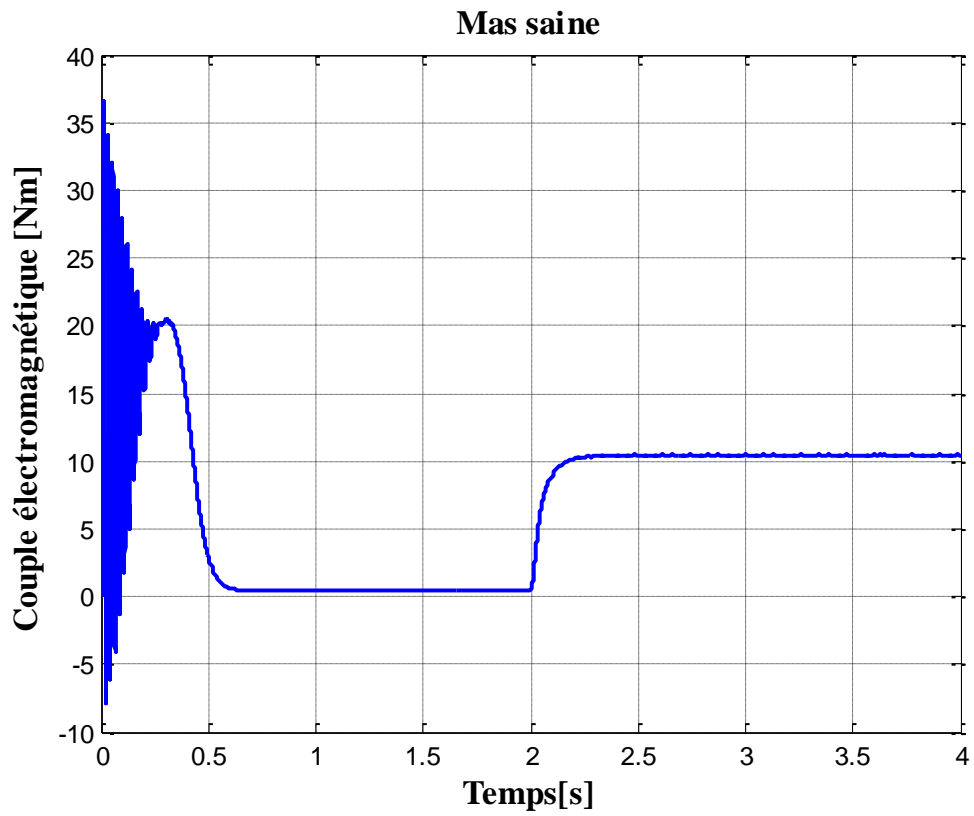


Fig. 2.8: Couple électromagnétique

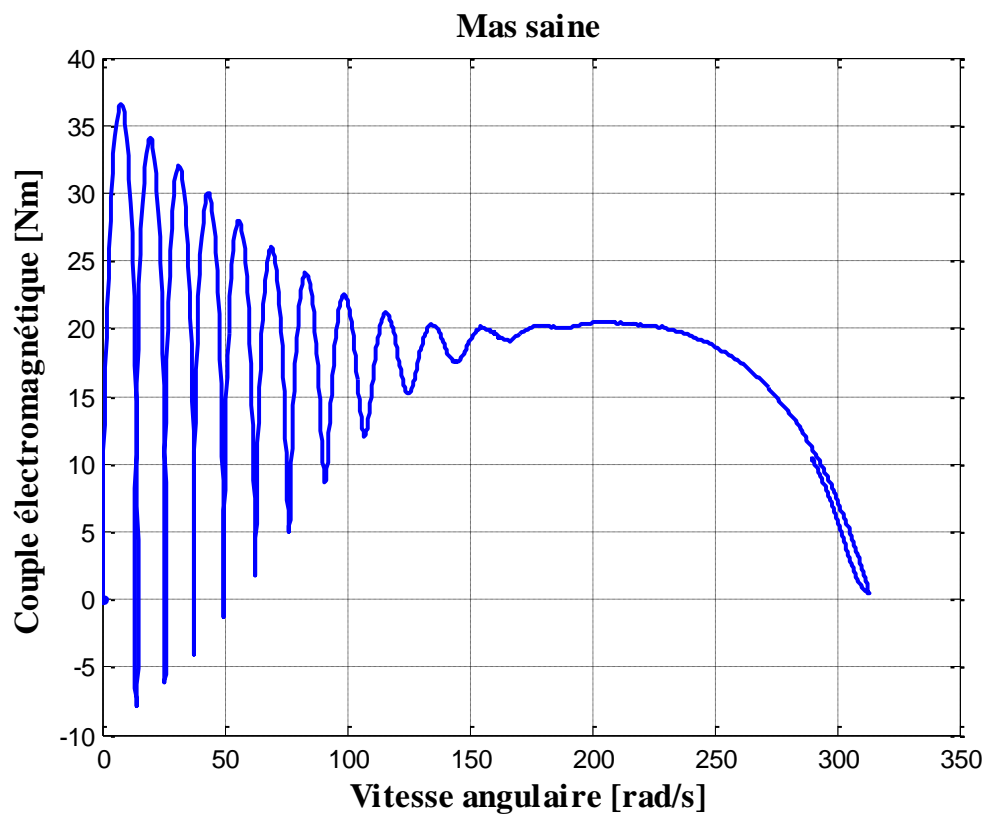


Fig. 2.9: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire

En fonctionnement sain, nous pouvons étudier la variation des grandeurs temporelles de la machine telle que les courants statoriques et les courants rotoriques, la position angulaire, la vitesse angulaire et le couple électromagnétique, figure 2.4 à figure 2.9. Nous avons trouvé les mêmes résultats de simulation en fonctionnement sain de la MARB que ceux effectués par Razik [RAZI02] et ceux de Casimir [CASI05]. De l'instant initial à  $t=2$  [s], la machine électrique fonctionne à vide et à partir de 2 [s], nous procédons à une augmentation de charge avec un couple résistant de 10 [Nm]. L'actionneur est alimenté par une tension sinusoïdale équilibrée. La figure 2.8b représente un zoom de la phase « A » du courant statorique en régime permanent avec le couple résistant. La figure 2.9 montre l'allure du couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire. Les figures 2.4 à 2.9 montrent les états stables et états transitoires au démarrage de la machine. On voit sur toutes les figures le changement de comportement de la machine après la mise place du couple résistant comme l'augmentation des amplitudes du courant statorique, rotorique et du couple électromagnétique, diminution de la vitesse de rotation. Ces résultats de simulation correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone en charge.

## **2.5.2. MARB en fonctionnement défaillant**

Grâce à sa flexibilité, la simulation est l'outil privilégié pour évaluer les performances et les comportements des systèmes sous des conditions différentes, en mode normal, en mode défaillant ou en mode extrême de fonctionnement. La simulation est la mise en application du modèle mathématique de la machine asynchrone. Dans le cadre du diagnostic et de la surveillance de la machine, l'objectif le plus important est de trouver un modèle de simulation fiable pour détecter la présence ou non de défaillances dans le système.

### **2.5.2.1. Défauts dans la Machine Asynchrone**

Quoique robuste, la machine asynchrone à rotor bobiné peut présenter différents types de défauts. La figure 2.10 suivante représente les différents types de défauts dans la machine asynchrone. En général, les défauts sur la machine électrique se divisent en deux, les défauts électriques et les défauts mécaniques [KHAL10]. Les causes et les effets de défauts sont variables (cf.1.3).

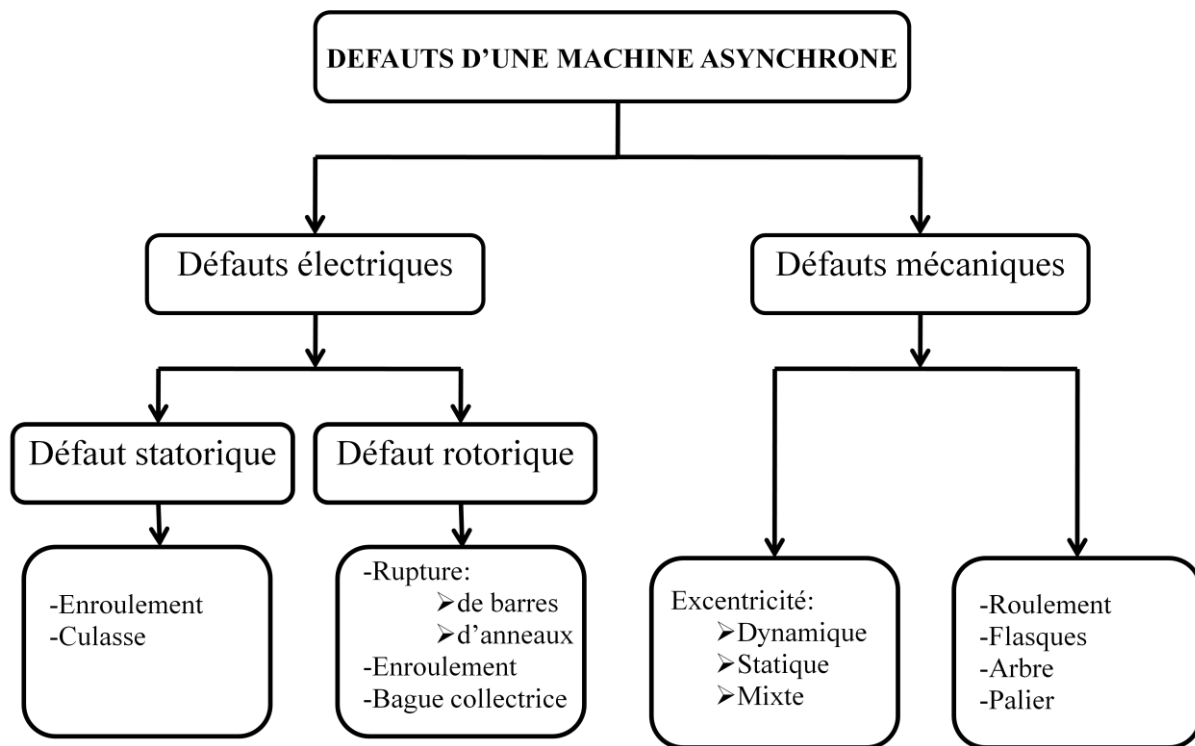


Fig. 2.10: Différents types de défauts d'une machine asynchrone

#### 2.5.2.2. Défaut des enroulements

Comme il est expliqué dans le chapitre précédent, les défauts d'enroulements statoriques et rotoriques sont plus fréquents, par rapport aux autres défauts, dans la machine asynchrone de faible et moyenne puissance. Les défauts de l'enroulement sont dus à un échauffement successif de la machine qui provoque une dégradation de l'isolant. Cette dégradation de l'isolant peut entraîner un court circuit entre deux spires d'un enroulement d'une même phase, un court circuit entre spire et spire de phase différente ou entre spire et masse. Le défaut sur le bobinage, par exemple entre spire, du stator ou du rotor de la machine asynchrone à rotor bobiné provoque un courant de circulation dans les spires en défaut dont l'amplitude peut être très importante. L'augmentation de la chaleur due au court-circuit peut également conduire à la dégradation totale de l'enroulement. Par conséquent, l'augmentation élevée de la température des enroulements peut entraîner la destruction en cascade des isolants et par effet cumulatif, la destruction complète de la machine asynchrone à rotor bobiné.

#### 2.5.2.3. Variation de température dans les enroulements

Les paramètres caractéristiques de la machine asynchrone à rotor bobiné peuvent aider à déterminer la présence de défaut ou non dans le système. Dans la répartition des défauts d'une machine électrique, les défauts des enroulements présentent un pourcentage élevé par rapport

à d'autres défauts [cf. 1.3.3]. En effet, dans ce qui suit, les défauts considérés sont les défauts des enroulements. En fonctionnement normal, une variation de la valeur d'une résistance par rapport à sa valeur nominale à la température ambiante de 25 °C signifie l'apparition d'une défaillance de la machine, soit pouvant être due à la surcharge de la machine ou soit être due au défaut de l'enroulement [CASI03] et [RAMA12b, c]. L'expression d'une résistance des enroulements en fonction de la température est donnée par :

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2-52)$$

avec

- $R_0$ : la valeur de R à  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,
- $\alpha$ : le coefficient de température de la résistance,
- $\Delta T$ : la variation de la température.

Les défauts sur les enroulements sont les plus fréquents dans la machine électrique. En effet, dans cette thèse le défaut considéré est l'augmentation de la résistance des enroulements statoriques ou rotoriques de la machine asynchrone.

### ***Défaut à $t=0s$***

Dans la littérature, plusieurs méthodes sont utilisées pour analyser les signaux, en particulier pour le diagnostic des machines électriques [BAGH97] ou l'analyse des défauts par la méthode des signatures de Benbouzid [BENB00]. Dans notre cas, on peut citer la représentation temporelle de la figure 2.11 à la figure 2.14 et l'analyse de la fréquence du signal [RAMA11a]. Elles peuvent être simulées avec une transformation mathématique (figure 2.16 et figure 2.17) ou sans transformation mathématiques (figure 2.19) [RAMA11a, b]. Seuls les résultats de la simulation avec des défauts statoriques sont présentés parce que les comportements globaux des variables d'état, en présence des défauts des enroulements statoriques et des enroulements rotoriques sont presque similaires. Les figures suivantes représentent les variations temporelles du courant de la phase «A» du stator, du courant de la phase «a» du rotor, de la vitesse angulaire, du couple électromagnétique et la représentation dans les deux axes du courant statorique, avec la transformation de Park et Concordia, en fonctionnement sain et défaillant. Pour visualiser l'évolution du comportement du MARB en fonctionnement normal et en fonctionnement défaillant, on procède à l'augmentation de la valeur de la résistance de 10, 20, 30, 40 pour cent par rapport à la valeur nominale. Les défauts sont introduits au démarrage de la machine.



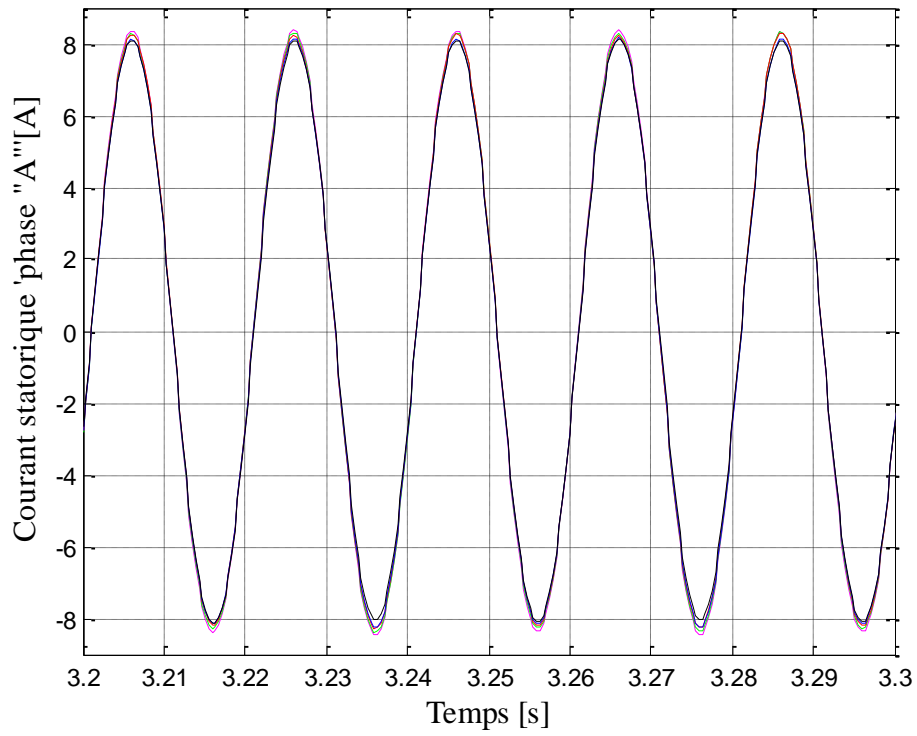


Fig. 2.11: Variation temporelle de la phase «A» du courant statorique en fonctionnement sain et défaillant du MARB

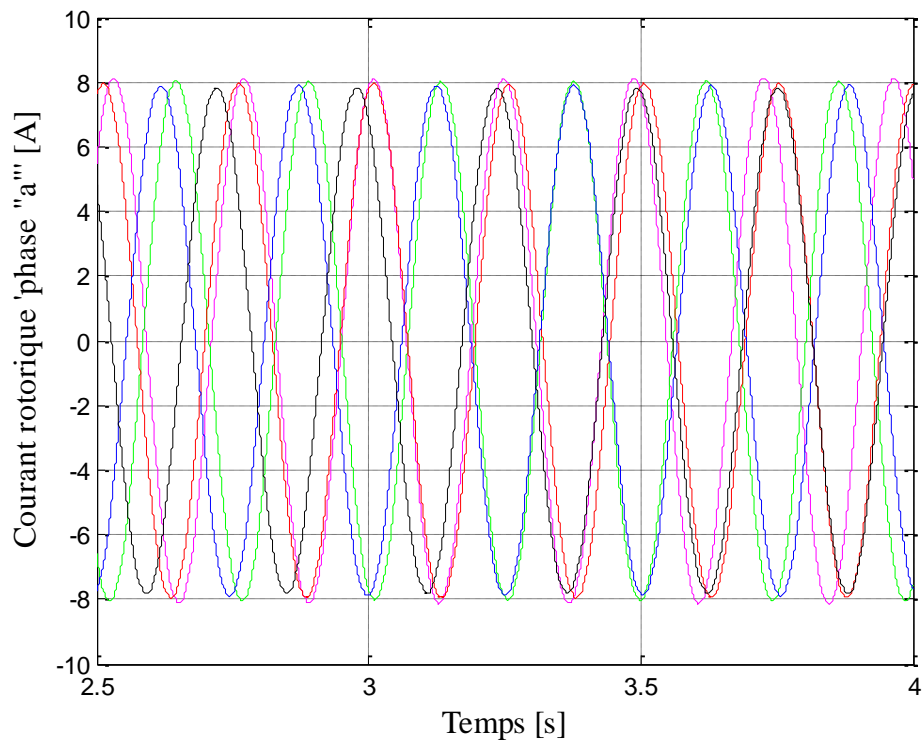


Fig. 2.12: Variation temporelle de la phase «a» du courant rotorique en fonctionnement sain et défaillant du MARB

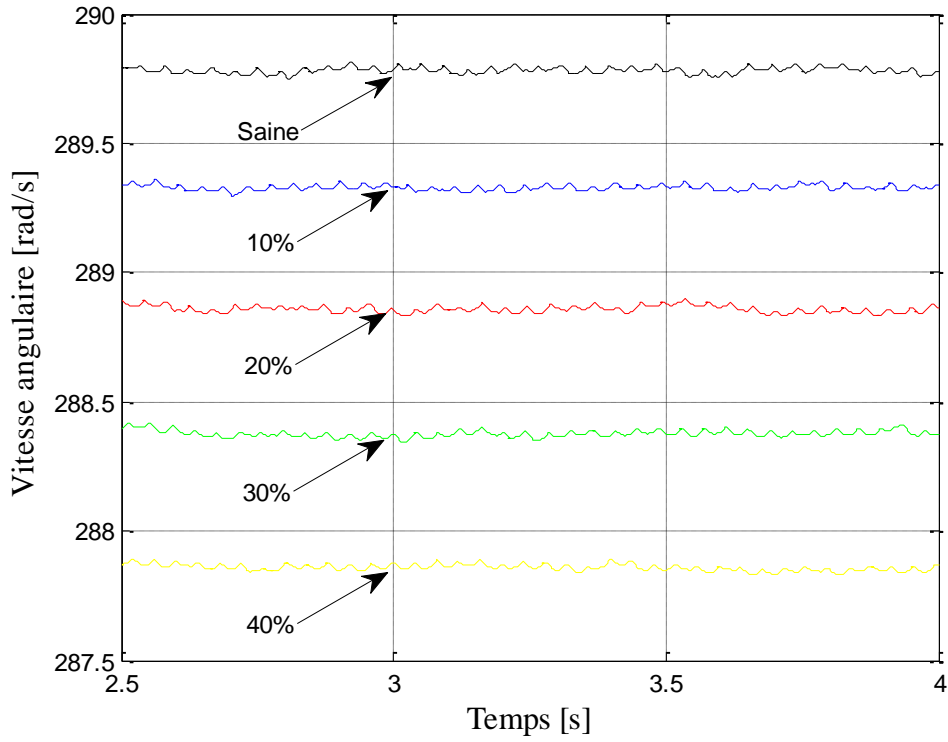


Fig. 2.13: Variation temporelle de la vitesse angulaire en fonctionnement sain et défaillant

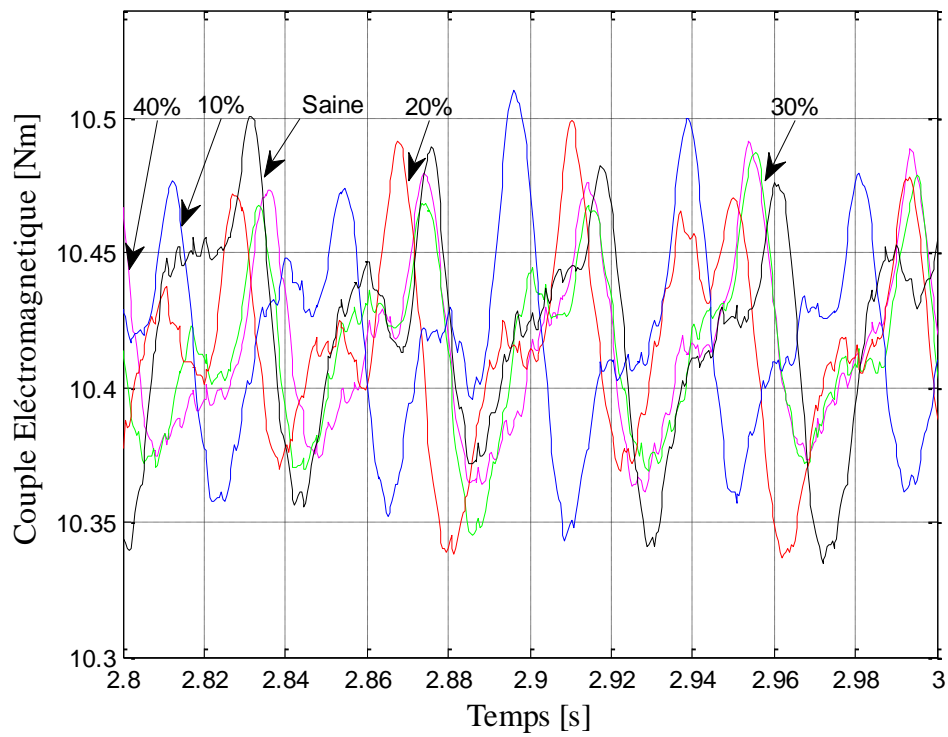


Fig. 2.14: Variation temporelle du couple électromagnétique en fonctionnement sain et défaillant du MARB

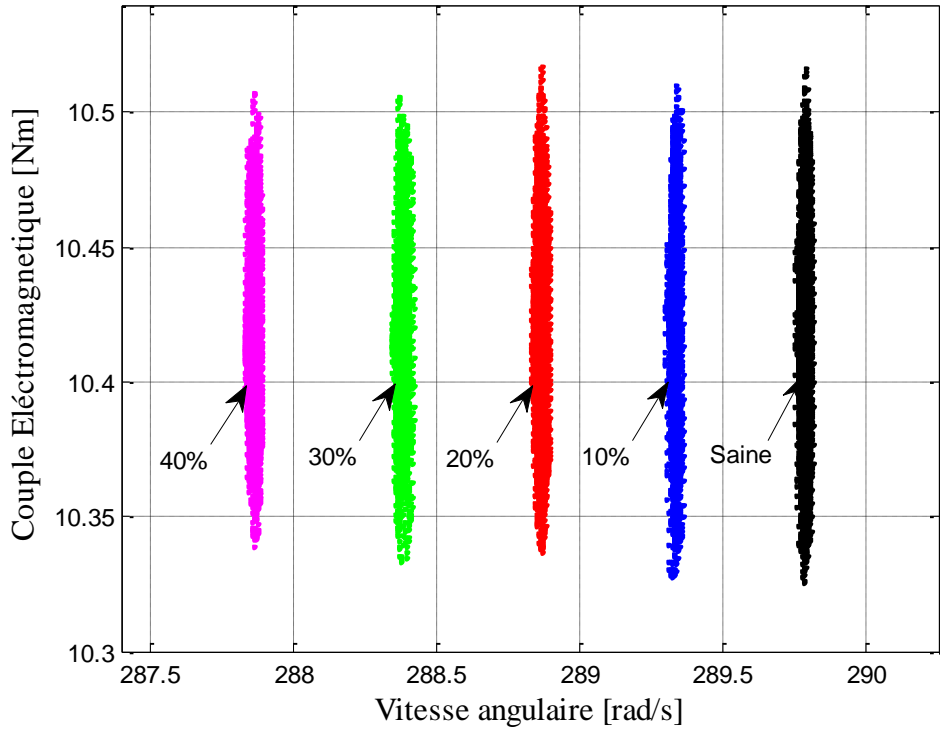


Fig. 2.15: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire

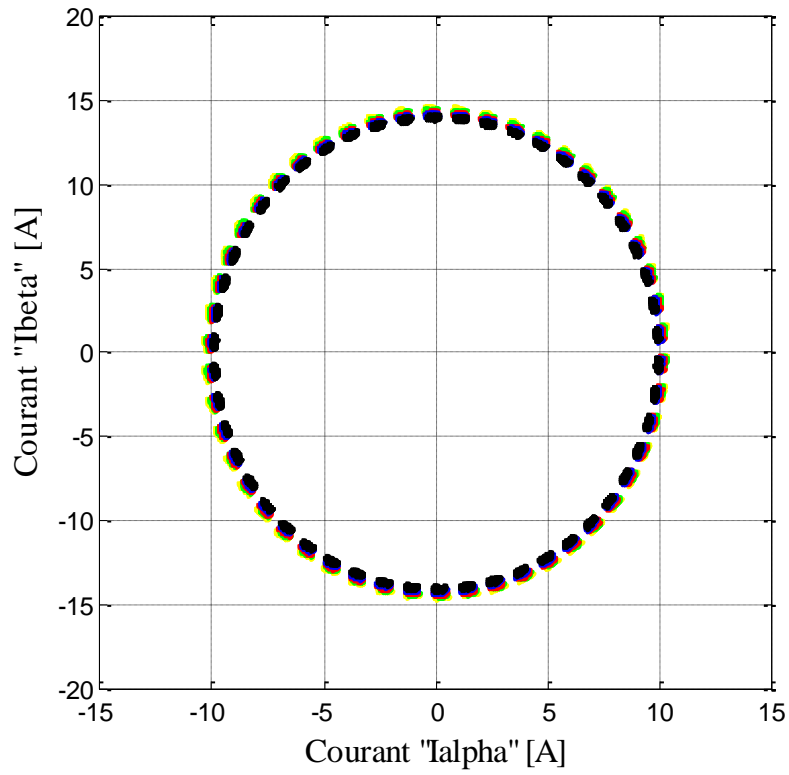


Fig. 2.16: Variation temporelle en fonction sain et défaillant de courant beta en fonction du courant alpha du stator

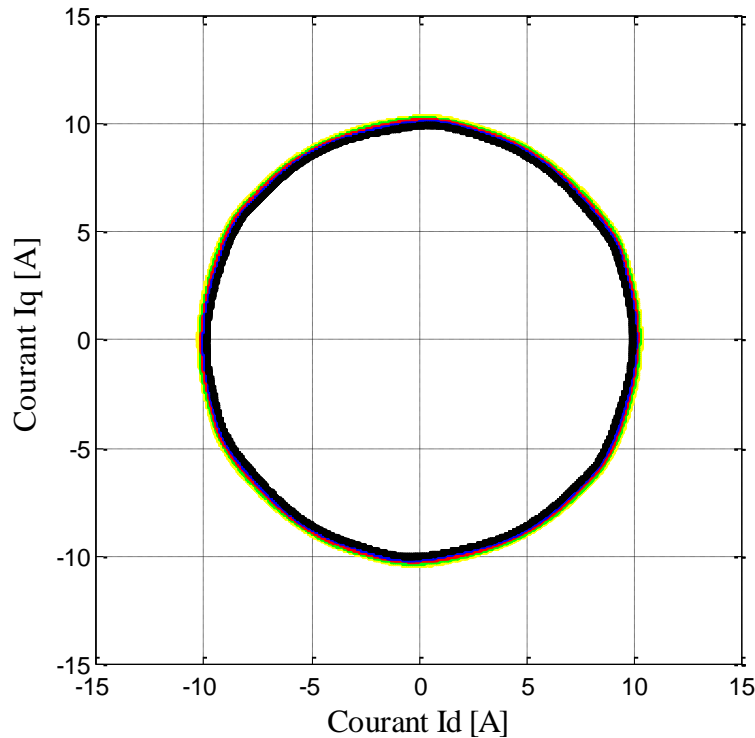


Fig. 2.17: variation temporelle en fonctionnement sain et défaillant du courant en quadrature et du courant direct d'une phase du stator

Pour la représentation temporelle, les variables d'état dont le courant rotorique (figure 2.12) et la vitesse angulaire (figure 2.13), sont des variables qui produisent plus d'informations sur le comportement de la machine en présence de défauts [RAZI04]. Pour le courant rotorique, les défauts se produisent sur la fréquence des signaux, on constate un léger déphasage entre le fonctionnement sain et les fonctionnements défaillants. La figure 2.13 montre une variation des amplitudes de vitesse angulaire pour les quatre signaux, la vitesse angulaire diminue à chaque augmentation de défauts.

En outre, les variations de couple électromagnétique par rapport à la vitesse de rotation de l'arbre (figure 2.15) montrent clairement le comportement du MARB en présence de défauts. Contrairement à cela, les représentations temporelles avec des transformations de Park et de Concordia ne fournissent pas d'informations pour le diagnostic de la machine [WIEC10]. On voit que les courants statoriques demeurent presque inchangés en présence de défauts (figure 2.16 et figure 2.17) [DIDI03].

### *Défauts à $t=2s$*

Nous avons vu les évolutions des signaux des variables d'état de la machine où les défauts du système sont apparus au début du démarrage de l'actionneur à surveiller. En général, les

défauts se produisent en cours de fonctionnement de la MARB, par conséquent, la suite de l'étude est axée sur l'évolution des signaux de neuf variables d'état où les défauts sont introduits à l'instant  $t=2s$  pour les différentes simulations. La machine est couplée avec un couple résistant de 10 Nm [CASI03]. Les défauts considérés sont la variation de la résistance statorique avec une augmentation de 10%, 20%, 30% et 40% de sa valeur normale. La figure 2.18 montre la variation temporelle des variables d'état du MARB. On constate qu'il est difficile de visualiser la présence de défaut sur les signaux du courant statorique et rotorique, même la résistance de l'enroulement statorique est augmentée de 40% [RAMA11b]. Dans la représentation temporelle le couple électromagnétique et la vitesse angulaire sont très sensibles au défaut. Pour mettre en évidence l'effet de la variation du défaut sur la machine étudiée, on utilise la représentation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire, on remarque une augmentation des amplitudes et des fréquences d'oscillations des couples électromagnétiques et des diminutions de vitesse de rotation de l'arbre pour chaque variation de défauts, c'est qui entraîne un accroissement des amplitudes du courant et par conséquent l'élévation de la température [VASE09].

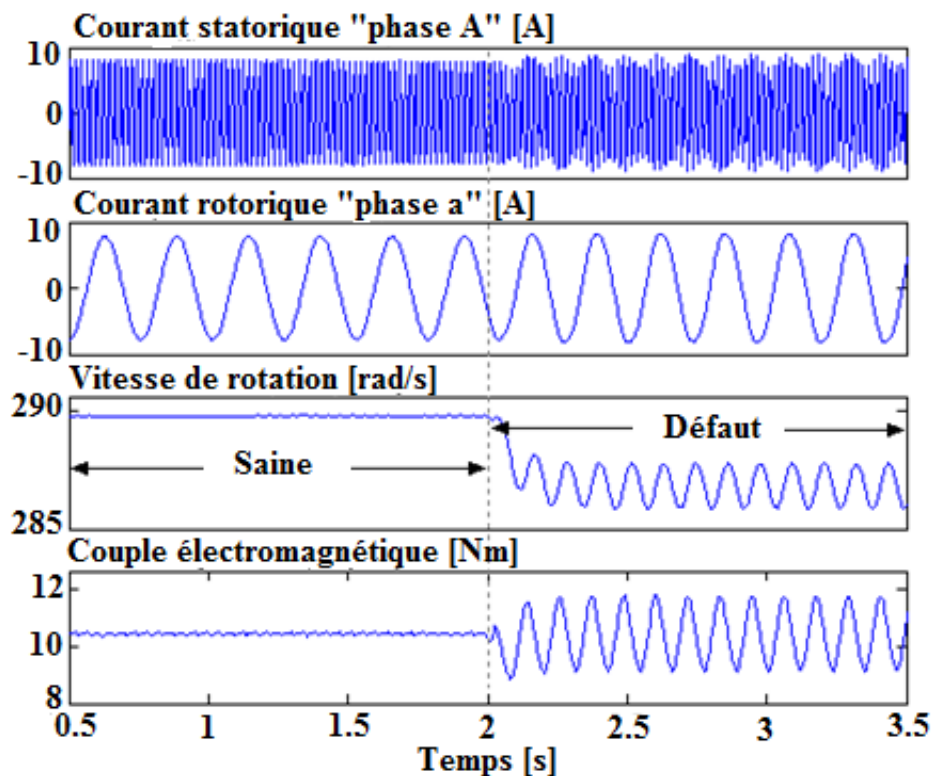


Fig. 2.18: Variation temporelle des variables d'états du MARB (résistance de l'enroulement statorique augmenté de 40%)

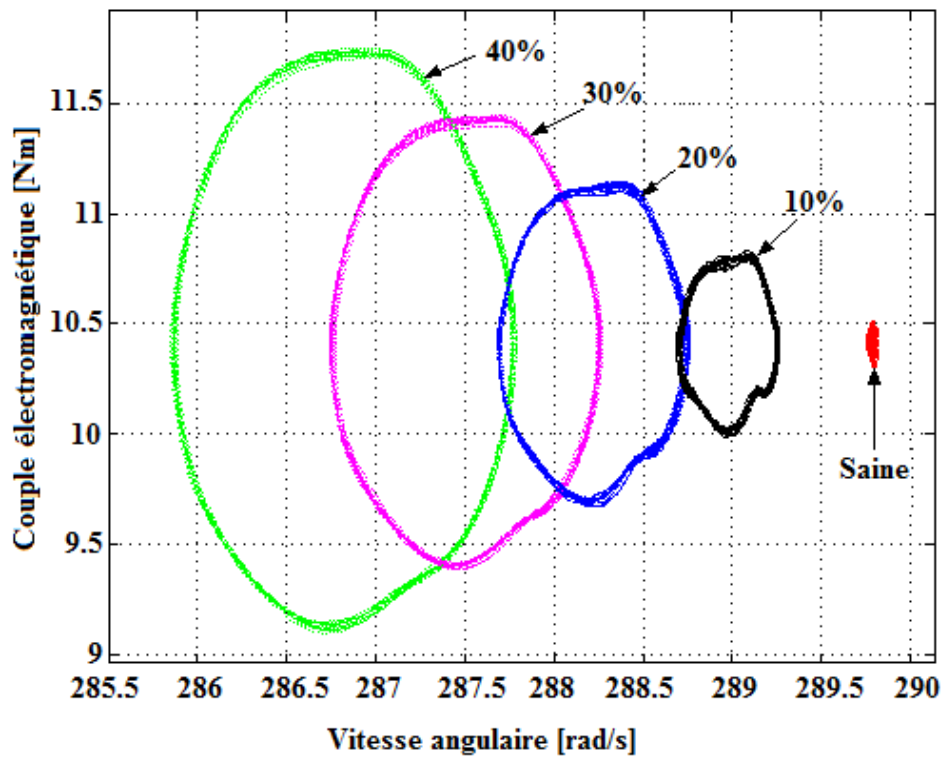


Fig. 2.19: Variation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation en fonctionnement sain et en fonctionnement défailants

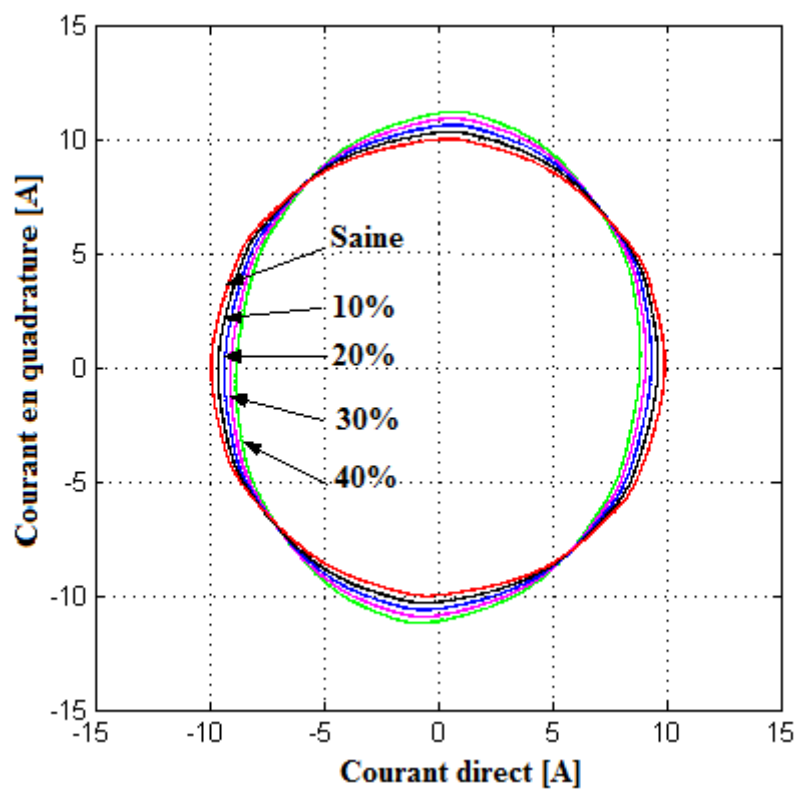


Fig. 2.20: Variation du courant en fonctionnement sain et défailants en quadrature  $I_q$  en fonction du courant direct  $I_d$

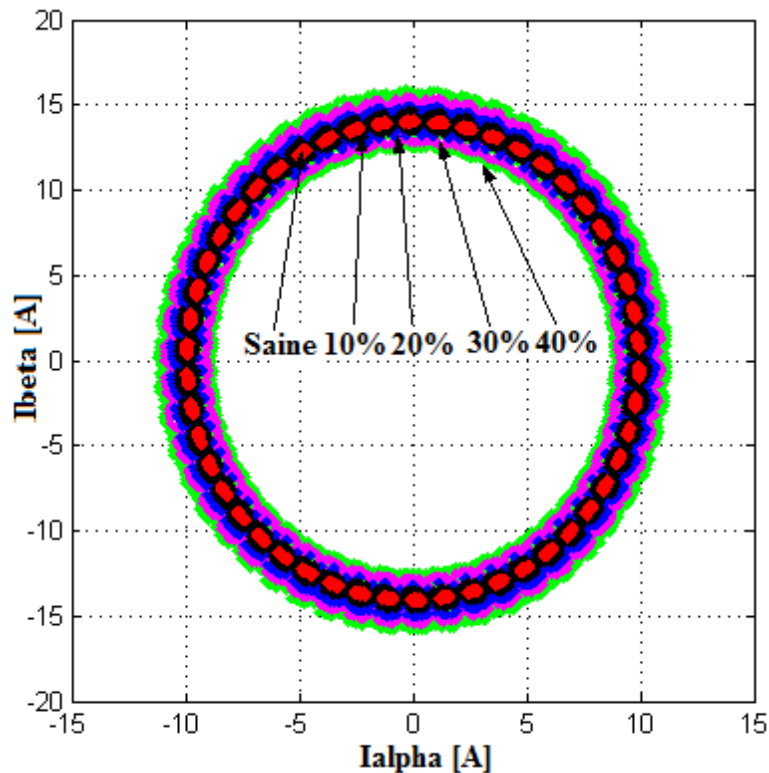


Fig. 2.21: Variation du courant en fonctionnement sain et défaillant dans l'axe Beta en fonction du courant dans l'axe Alpha

La figure 2.20 utilise la transformation mathématique de Park pour tracer les allures du courant en quadrature en fonction du courant direct. En fonctionnement sain, l'allure du courant est proche d'un cercle et elle devient de plus en plus elliptique en présence de défauts [CARD99]. Pour le cas de figure 2.21 obtenue par la transformation de Concordia, qui montre le courant dans les deux axes ; axe beta en fonction de l'axe alpha. On observe que l'épaisseur de la courbe augmente pour chaque changement de défauts [ONEL07].

## 2.6 UTILISATION DE LA MARB EN GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLEMENT ALIMENTEE

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible.

Comme nous avons démontré au paragraphe 2.2, la machine asynchrone à rotor bobiné a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. La différence radicale n'est autre que la partie rotor, il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulement triphasés disposés

de la même manière que les enroulements statoriques. La figure 2.22 montre que le rotor est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

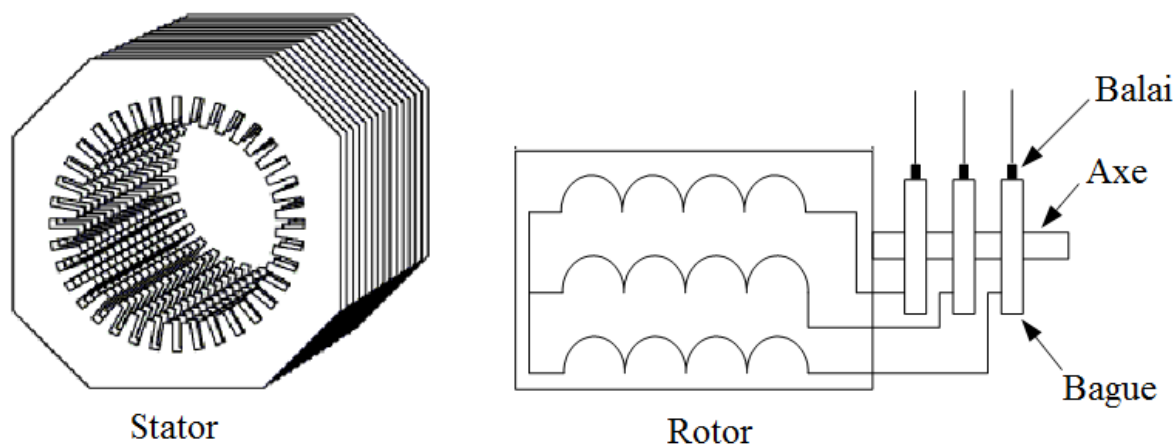


Figure 2.22 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MARB

En fonctionnement moteur, le MARB a la capacité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, particulièrement en y reliant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone [MARQ99] [POIT03]. Ce principe de réversibilité permet de faire fonctionner la MARB en génératrice à vitesse variable. La machine est aussi appelée machine généralisée due à sa structure qui permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone, à la différence près, que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

### 2.6.1 Application des machines asynchrone doublement alimentées

La première application importante de la MADA (à rotor bobiné) est son fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Pour les autres machines (asynchrone à cage d'écureuil ou synchrone), la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. Mais pour le fonctionnement à vitesse



variable on peut varier la fréquence d'alimentation de la machine. Cette possibilité est réalisée à l'aide d'un redresseur et d'un onduleur commandé, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine [BENN11]. Avec la MADA, la taille de ces convertisseurs peuvent diminuer d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Par conséquent, ce dispositif est plus économique et n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même en être fournisseur [SALL05].

On peut utiliser le même principe au fonctionnement en génératrice, dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable, permet de délivrer une fréquence fixe au stator, même en cas de variation de vitesse. Avec ce fonctionnement, la MADA est une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques, dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

La MADA peut fonctionner à vitesse variable avec de très bonnes performances avec deux convertisseurs, un au rotor et un au stator. Avec ce dispositif, on peut varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante [VIDA03].

## 2.6.2 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure 2.23 suivante montre les quatre quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur.

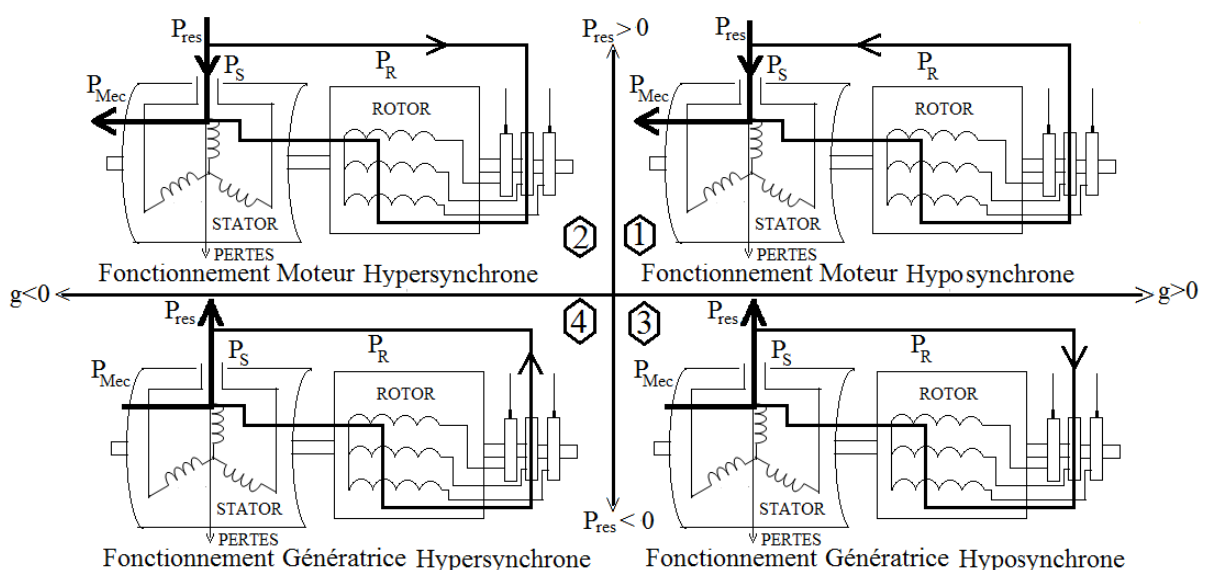


Fig. 2.23 : Différentes configurations de fonctionnement de la MADA [KELB00]

avec

$P_{\text{res}}$  : la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau,

$P_s$  : la puissance transitant par le stator,

$P_R$  : la puissance transitant par le rotor,

$P_{\text{Mec}}$  : la puissance mécanique.

En fonctionnement moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement en cascade hyposynchrone. En fonctionnement hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement de la MADA est analogue, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En fonctionnement hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, et une partie de cette puissance correspondant à la valeur du glissement en multipliant par la puissance mécanique est transmise par l'intermédiaire du rotor. En mode de fonctionnement hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

Pour l'utilisation dans le système éolien, les deux quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas plus ou moins 30% en deçà 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 [POIT03].

### **2.6.3 Comparaison de puissance produite entre MAS à cage et MADA**

La figure 2.24 montre la caractéristique de la production optimale pour les deux types de machines asynchrones utilisées dans la production d'énergie par éolienne. La machine asynchrone à cage d'écureuil est avec un convertisseur. Si cette machine est capable de produire de l'énergie avec une très faible vitesse du vent, l'énergie produite diminue et tend vers la puissance nominale lorsque la machine atteint une vitesse très légèrement supérieure au synchronisme. On voit que la MADA ne produit de l'énergie qu'à partir de 1000 tr/min, vitesse correspondante à 70% de la vitesse de synchronisme, pour éviter l'augmentation de la taille du convertisseur rotorique.

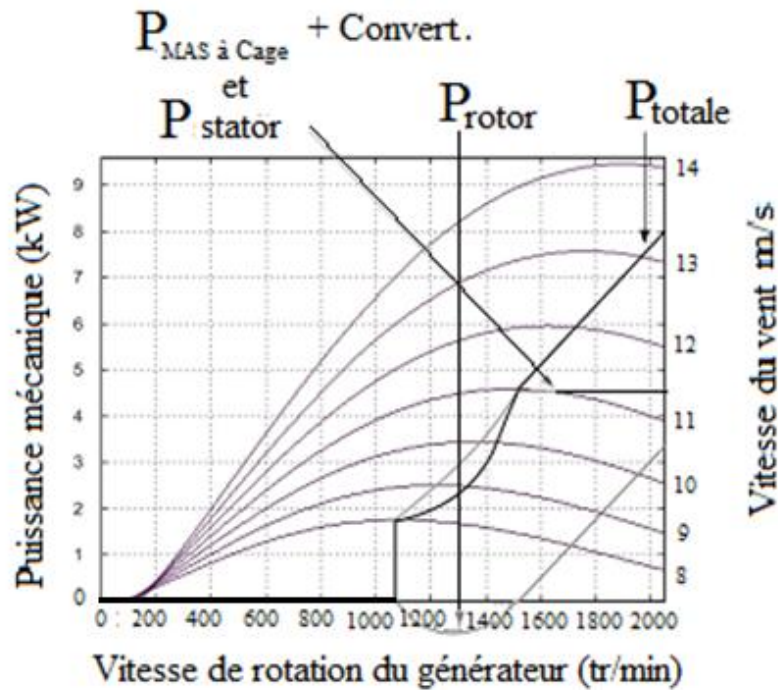


Fig. 2.24: Caractéristique de production de puissance de deux machines asynchrones

On sait que la puissance totale produite par la machine asynchrone doublement alimentée (à rotor bobiné) est la somme de deux puissances statorique et rotorique. Or en deçà de la vitesse de synchronisme, la puissance rotorique est négative c'est qui entraîne une légère diminution de la puissance produite par la MADA par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil. Par contre, on voit que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min (vitesse de synchronisme plus 30%), ce qui n'est pas possible pour la machine asynchrone à cage d'écureuil.

## 2.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a modélisé la machine asynchrone à rotor bobiné par la méthode du circuit électrique magnétiquement couplé, pour les différents fonctionnements sains et défaillants. On a considéré les défauts des enroulements pour étudier le comportement des variables d'état de la machine car ce type de défaut est très fréquent comme cause de défaillance [DIDI03]. Pour la détection de défaut sur les variables d'état des courants, statoriques ou rotoriques, la méthode de représentation temporelle n'est pas efficace pour le diagnostic. Une transformation dans les deux axes a été évoquée pour étudier et comparer l'effet des défauts sur les variables à surveiller. On observe que pour la MARB l'utilisation de la représentation triphasée donne plus d'information que la représentation diphasée.

Avec les défauts insérés au démarrage de la machine où à un instant quelconque de fonctionnement, on constate qu'il est difficile de détecter la présence de défaut dans les variables d'état du MARB. Seule la représentation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation donne plus d'information. Par conséquent, nous avons opté pour une autre méthode de diagnostic, basé sur l'Analyse en Composantes Principales permettant la détection et la localisation de défauts.

Un dernier paragraphe de ce chapitre est consacré à l'utilisation de la MARB. Nous avons montré qu'on peut faire fonctionner la MARB en génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA). Dans ce cas la MARB ne fonctionne pas en mode moteur mais en mode génératrice [SEDI12]. En effet la MADA ne consomme pas d'énergie sur le réseau mais produit de l'énergie vers le réseau par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques, en augmentant sa vitesse au delà de la vitesse de synchronisme. On peut aussi remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hyper ou hypo synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement. Due à l'électronique de puissance, l'utilisation de la MARB en GADA occupe de plus en plus de place dans la production des énergies renouvelables de type éolien [CRUZ03]. C'est pour cette raison que nous allons appliquer la méthode de détection de défaut déjà utilisée pour la MARB pour la GADA, afin d'améliorer la performance du système éolien à produire de l'énergie.

## 2.8. REFERENCES DU CHAPITRE 2

- [ABED99] ABED A., BAGHLI L., RAZIK H. and REZZOUG A., «Modelling induction motors for diagnostic purposes», European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-8, Lausanne, Autriche, 1999.
- [BAGH97] BAGHLI L., HEIN D., RAZIK H. and REZZOUG A., «Modelling rotor cage induction motors for default detection», International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 1997.
- [BENB00] BENBOUZID M. E. H., «A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, N° 5, pp. 984-993, 2000.
- [BENN11] BENNANI H. «Machine Asynchrone à Double Alimentation : Les lois de commande en régime permanent», Université Laval, Québec, 2011.
- [CARD99] CARDOSO A. J. M., CRUZ S. M. A., FONSECA D. S. B. «Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, Pp: 595-598, P-3030 Coimbra, Portugal, 1999.
- [CASI03] CASIMIR R., BOUTLEUX E. and CLERC G., «Fault diagnosis in an induction motor by pattern recognition methods», Proc. IEEE SDEMPED Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 294-299, Atlanta, GA, USA, 2003.
- [CASI05] CASIMIR R. et al., «Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts», Journal RIGE, Vol. 8, N° 2, pp. 287-300, 2005.
- [CRUZ03] CRUZ S. M. A., CARDOSO A. J. M., « Modelling and simulation of DTC induction motor drives for stator winding faults diagnosis », EPE 2003, 10th European Conference on power electronics and Applications, Toulouse, France, 2003.

- [DELF95] DELFORGE C. and LEMAIRE-SMAIL B., «Induction machine modelling using finite elements and permeance network methods», IEEE Transaction. on magnetic, Vol. 31, N° 3, pp. 2092-2095, 1995.
- [DIDI02] DIDIER G., RAZIK H., REZZOUG A., «On the modelling of induction motor including the first space harmonics for diagnosis purposes», ICEM, Belgium 2002.
- [DIDI03] DIDIER G., RAZIK H., REZZOUG A., «Rotor cage fault detection in induction using global modulation index on the instantaneous power spectrum», Symposium on diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta, GA, USA 2003
- [GHAN05] GHANES M., DELEON J. and GLUMINEAU A., «Validation of an Interconnected High Gain Observer for Sensorless Induction Motor On Low Frequencies Benchmark: Application to an Experimental Set-up», IEE Proc. Control Theory and Applications. Vol. 152, No. 4, pp. 371-378, 2005.
- [IBRA06] IBRAHIM A., ELBADAOUI M., GUILLET F. and YOUSSEF W., «Electrical signals analysis of an asynchronous motor for bearing fault detection», In Proceedings of IEEE, IECON'06, pp. 4975-4980, Paris, France, 2006.
- [KELB00] KELBER C. and SCHUMACHER W., «Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines», VSSH00, European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 2000.
- [KHAL10] KHALAF S. G., HAIDER A.F.M., «Diagnostic and fault tolerant control of the induction motors techniques a review», Australian journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 4, N°2, ISSN 1991-8178, pp. 22è-246, 2010.
- [MAHY09] MAHYOB A., REGHEM P., BARAKAT G., «Permeance Network Modeling of the Stator Winding Faults in Electrical Machines», IEEE Transactions on magnetics, Vol. 45, N° 3, pp. 947, 2009.
- [MARQ99] MARQUES G.D., «Numerical Simulation Method for the Slip Power recovery System», IEEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 146, N° 1, pp. 17-24, 1999.

- [NEGR06] NEGREA M. D., «Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines», TKK Dissertations 51, Helsinki University of Technology, Espoo 2006.
- [ONEL07] ÖNEL I.Y., BENBOUZID M.E.H., «Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study», IEEE pp 1073 1078, 2007.
- [POIT03] POITIERS F., «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Rapport de thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [RAMA11a] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Principal Components Analysis Method: Application in Electrical Machines Diagnosis», 8<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Noordwykerhout, Pays Bas, 2011.
- [RAMA11b] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., « Faults detection of wound rotor induction motor with principal components analysis method», 21<sup>th</sup> International Conference on Production Research», Stuttgart, Germany 2011.
- [RAMA12a] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., BENNOUNA O., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Modeling & Fault Diagnosis System for Electric Vehicles», The 38<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, ETS Montréal, Canada, October 2012.
- [RAMA12b] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Performances of the PCA Method in Electrical Machines Diagnosis Using Matlab», Intech, "MATLAB / Book 1", ISBN 979-953-307-774-0, 2012.
- [RAMA12c] RAMAHLEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «On the Sensitivity of Principal Components Analysis Applied to the Wound Rotor Induction Machines Faults Detection and Localization», International Journal Energy Science IJES, accepted, 2012.

- [RAMI06] RAMINOSOA T., «Optimisation Des Performances Des Machines Synchro Reluctantes par Réseaux de Perméances», Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, 2006.
- [RAZI02] RAZIK H., «Modélisation de la machine asynchrone à cage. Application à la simulation de moteurs à cage défaillante. Spectres des courants des moteurs défaillants», article, Centre National de la Recherche Scientifique, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Université Henri Poincaré, Nancy 1. 2002.
- [RAZI04] RAZIK H., DIDIER G., « A novel method of induction motor diagnosis using the line-neutral voltage», EPE-PEMC'2004, Riga, Létonie, 2004.
- [SALL05] SALLOUM G., GHOSN R., PIETRZAK-DAVID M., DE FORNEL B., «A Comparison of Sensorless Speed Estimation for a Doubly Fed Induction Machine», EPE, Dresden, Germany, 2005.
- [SEDI12] SEDIKI H. ABDESLAM Dj. O., OTMANE-CHERIF T., BECHOUCHE A., MESBAH K., « Steady-State Analysis and control of double feed induction motor», World Academy of Science, Engineering and Technology 61, pp. 181-189, 2012.
- [SEGU82] SEGUIER G., NOTTELET F., «Électrotechnique industrielle», Tec et Doc (Lavoisier), 1982.
- [SEMA05] SEMAIL E., MEIBODY-TABAR F., BENKHORIS M. F., RAZIK H., PIETRZAK-DAVID M., MONMASSON E., BOUSCAYROL A., DAVAT B., DELARUE P., FORNEL B., HAUTIER J. P., LOUIS J. P. et PIEFEDERICI S., «Représentations systèmes multimachines (SMM) de machines polyphasées», Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 8, pp. 221-239, 2005.
- [VASE09] VASEGHI B., TAKORABET N., MEIBODY-TAHAR F., « Fault Analysis and Parameter Identification of PM Motors by the Finite Element Method », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, Issue 9, 2009.
- [VIDA03] VIDAL P. E., «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Actes de JCGE 03, pp. 177-182, Saint- Nazaire, 2003.



[WIEC10] WIECZOREK M., RASOŁOWSKI E., «Modelling of induction motor for simulation of internal faults, Modern Electric Power Systems, MEPS'10, paper P29, Wrocław, Poland

## **Chapitre 3: Modélisation de la Génératrice Asynchrone**

### **Doublement Alimentée (GADA)**

#### **3.1 GENERALITES**

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Elle était exploitée en mer pour faire avancer les bateaux et sur terre pour moulin du grain [ACKE02]. Avec l'évolution technologique, le progrès de l'électronique de puissance et surtout l'enjeu économique suite à la très prochaine disparition des sources d'énergie d'origine fossile et à la disponibilité permanente des sources d'énergie renouvelable, la production d'énergie d'origine renouvelable est de plus en plus en vogue et elle est devenue exploitable par sa souplesse d'utilisation [MEKT09]. Les modes et les moyens de production d'énergie éolienne sont amenés à subir de profonds changements au cours des années à venir [JOSH06]. Le système a besoin de plus de surveillance dû aux exigences des industriels de produire à moindre coût mais avec une qualité accrue. Et dans le domaine de la production d'énergie renouvelable, l'aérogénérateur à vitesse variable et à régulation pitch occupe de plus en plus de place grâce à leurs robustesses et fiabilités. Suivant les régimes de vent, l'introduction de la vitesse variable dans le système permet d'avoir un gain de production de 8 à 10%. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. On contrôle les puissances actives et réactives grâce aux composantes électroniques afin de minimiser le taux d'harmonique injectés au réseau [MULT12]. La connexion directe au réseau est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Malgré les travaux de recherches effectués ainsi que les améliorations apportées, ces aérogénérateurs demeurent des sièges potentiels de défaillances aussi bien au niveau électrique, électronique que mécanique. En effet la surveillance et le diagnostic des défauts en temps réel deviennent une préoccupation des constructeurs. Par conséquent, depuis quelques décennies ces derniers mobilisent des chercheurs tant au niveau académique qu'industrie. Par conséquent, des laboratoires de recherches académiques et des chercheurs des sociétés constructeurs ne cessent d'améliorer les qualités tant au niveau production qu'industriel. Dans la littérature, Balasubramaniam et al. ont travaillé sur la modélisation et l'analyse de la génératrice [BALA09], Vladislav Akhmatov a étudié le problème d'injection de puissance sur le réseau [VLAD03], Phani Shree et Nitesh Reddy ont mis en place une nouvelle technique pour améliorer la production [PHAN11]. Dans le domaine de surveillance, Dimitrios et al. ont étudié le comportement

dynamique de la GADA si un circuit est ouvert sur la partie électronique, redresseur ou onduleur [DIM12], En ne citant que ces travaux, on voit que les recherches sur l'énergie éolienne sont encore très ouverts. Dans ce chapitre, on propose une autre méthode pour la détection de défauts sur la génératrice asynchrone doublement alimentée en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (ACP) basée par l'analyse des résidus des ses variables d'états. Pour traiter le problème, une modélisation de la chaîne de production est nécessaire. On a opté par le modèle utilisé par Haritza Camblong [CAMB03] pour minimiser l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la production d'électricité, et de Ouadie Bennouna et al. pour le diagnostic de défaut par l'analyse des signatures [BENN09]. Pour modéliser et étudier le comportement en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant de cet actionneur, une mise en équation de la GADA est nécessaire. Après la modélisation analytique du système, on introduit des défauts sur les enroulements statoriques ou rotoriques pour détecter la(es) défaut(s) sur les variables d'état de la génératrice. La figure 3.1 suivante montre le modèle électrique de l'éolienne étudiée.

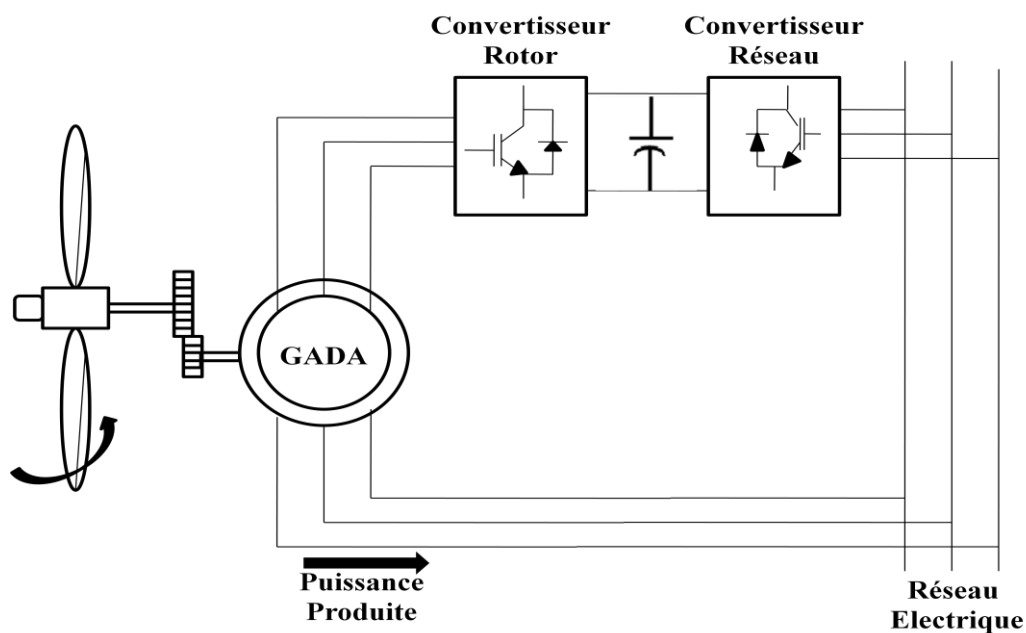


Fig. 3.1: Modèle électrique de l'éolienne

## 3.2 MODELE DE LA GADA

### 3.2.1 Hypothèses de départ

Dans le domaine de la génération d'énergie éolienne, les machines asynchrones à cage d'écureuil dominent les marchés car elles offrent des performances attractives en termes de coût d'investissement et elles sont directement connectées au réseau. Mais lorsqu'il s'agit de réaliser un entraînement à vitesse variable, on leur préfère des machines à rotor bobiné

doublement alimentées qui présentent bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles et elles offrent d'excellents compromis performances/coûts [KEND11] et [AHME04]. Le modèle de la génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA) est basé sur la théorie des deux axes. Mais avant de modéliser la génératrice asynchrone il est nécessaire de faire les hypothèses suivantes :

Les forces magnétomotrices sont à répartition sinusoïdales, il y a asymétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements :

- Les résistances sont considérées comme constantes,
- L'effet thermique et l'effet de peau sont négligés,
- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les enroulements,
- L'hystérésis et les courants de Foucault dans les parties magnétiques sont négligeables,
- Les grandeurs électriques sont définies par leur module et leur phase.

Alors on peut représenter ce modèle dans un système de référence à deux axes

### 3.2.2 Référentiel à deux axes

Le système de référence est illustré dans la figure 3.2. On peut utiliser la transformée de Park pour le passage des grandeurs électriques dans les référentiels standards associés aux trois enroulements statoriques et rotoriques vers les référentiels à deux axes  $\alpha$  et  $\beta$  liés au stator de la machine. La transformée de Concordia est utilisée pour le référentiel tournant d et q.

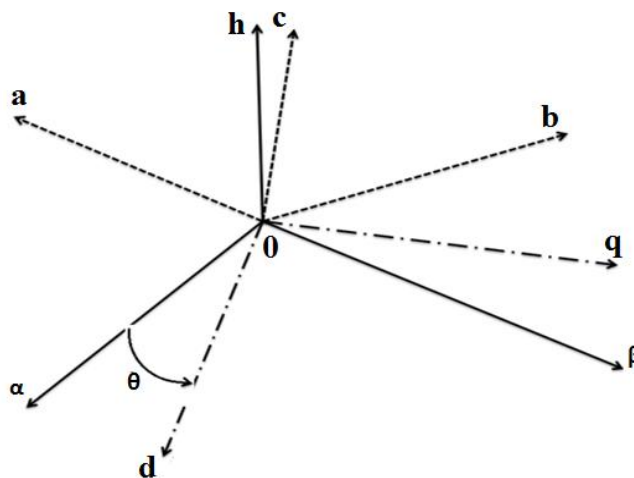


Fig. 3.2 : Représentation des référentiels  $(abc)$ ,  $(h\alpha\beta)$ ,  $(hdq)$

### 3.2.3 Equation de la machine sur le référentiel $\alpha, \beta$

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la machine liées au référentiel  $\alpha$  et  $\beta$  sont données par [CAMB03], [ZELLA08], [MIGU09] et [BENN09] :

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} \quad (3-1)$$

$$\underline{u}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} - j\omega_m \underline{\psi}_r \quad (3-2)$$

où les indices «  $s$  » et «  $r$  » identifient respectivement les grandeurs du stator et du rotor et  $\omega_m$  est la vitesse de rotation du rotor.

Les équations du flux s'écrivent :

$$\underline{\psi}_s = L_s \underline{i}_s + L_h \underline{i}_r \quad (3-3)$$

$$\underline{\psi}_r = L_r \underline{i}_r + L_h \underline{i}_s \quad (3-4)$$

En remplaçant ces équations du flux dans les équations aux tensions (3-1) et (3-2), on obtient :

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + L_s \frac{d\underline{i}_s}{dt} + L_h \frac{d\underline{i}_r}{dt} \quad (3-5)$$

$$\underline{u}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} + L_h \frac{d\underline{i}_s}{dt} - j\omega_m L_r \underline{i}_r - j\omega_m L_h \underline{i}_s \quad (3-6)$$

En combinant les deux dernières expressions aux tensions on trouve les équations d'état sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \underline{i}_s \\ \underline{i}_r \end{pmatrix} = \frac{1}{(L_s L_r - L_h^2)} \begin{pmatrix} -R_s L_r - j\omega_m L_h^2 & L_h R_r - j\omega_m L_h L_r \\ L_h R_s + j\omega_m L_s L_h & -R_r L_s + j\omega_m L_s L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{i}_s \\ \underline{i}_r \end{pmatrix} + \frac{1}{(L_s L_r - L_h^2)} \begin{pmatrix} L_r & -L_r \\ -L_h & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}_s \\ \underline{u}_r \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

Le nouveau référentiel  $(\alpha, \beta)$  est obtenu à partir de la transformation de Park de la base classique  $(a, b, c)$  et nécessite donc la connaissance de l'angle téta qui détermine la position du rotor par rapport au stator, l'équation d'état (3-7) devient :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix} = \frac{1}{(L_s L_r - L_h^2)} \begin{pmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_h^2 & L_h R_r & \omega_m L_h L_r \\ -\omega_m L_h^2 & -R_s L_r & -\omega_m L_h L_r & L_h R_r \\ L_h R_s & -\omega_m L_s L_h & -R_r L_s & -\omega_m L_s L_r \\ \omega_m L_s L_h & L_h R_s & \omega_m L_s L_r & -R_r L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix} + \frac{1}{(L_s L_r - L_h^2)} \begin{pmatrix} L_r & 0 & -L_h & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_h \\ -L_h & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_h & 0 & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \\ u_{\alpha r} \\ u_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

où :

$i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{\alpha r}, i_{\beta r}$  sont respectivement les courants statoriques et rotoriques sur les phases alpha et beta,

$u_{\alpha s}, u_{\beta s}, u_{\alpha r}, u_{\beta r}$  sont respectivement les tensions statoriques et rotoriques sur les phases alpha et beta,

$\omega_m$  est la vitesse de rotation de la génératrice,

$L_s, L_r, L_h$  sont respectivement les inductances statorique, rotorique et mutuelle,

$R_s, R_r$  sont respectivement la résistance du stator et du rotor.

Avec ces équations, on peut étudier le comportement dynamique des variables électriques de la machine. Et on déduit de ces variables électriques le couple électromagnétique :

$$T_{em} = K_t p \operatorname{Im}(\underline{\psi}_s^* \underline{i}_s) = K_t p L_h \operatorname{Im}(\underline{i}_r^* \underline{i}_s) = K_t p L_h (i_{\alpha r} i_{\beta s} - i_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (3-9)$$

où

$K_t$  est un paramètre dépendant du type de transformation de Park réalisée (à puissance constante ou à amplitude constante) et «  $p$  » est le nombre de paires de pôles de la GADA. En utilisant les valeurs des tensions au stator et au rotor et les conditions initiales, on est capable de trouver les variables d'état de la machine, respectivement les courants au stator et les courants au rotor et par conséquent le couple électromagnétique de la GADA. L'aérogénérateur est connecté au réseau électrique de puissance infinie alors la tension au stator est constante, et la tension au rotor est celle fournie par le convertisseur de puissance.

### 3.2.4 Equation de la GADA sur le référentiel d-q

Dans le référentiel d-q, les équations des tensions s'écrivent sous les formes générales suivantes :

$$\underline{u}_{ds} = R_s \underline{i}_{ds} + \frac{d\underline{\psi}_{ds}}{dt} - \theta_s \Psi_{qs} \quad (3-10)$$

$$\underline{u}_{qs} = R_s \underline{i}_{qs} + \frac{d\underline{\psi}_{qs}}{dt} - \theta_s \underline{\psi}_{ds} \quad (3-11)$$

$$\underline{u}_{dr} = R_r \underline{i}_{dr} + \frac{d\underline{\psi}_{dr}}{dt} - \theta_r \Psi_{qr} \quad (3-12)$$

$$\underline{u}_{qr} = R_r \underline{i}_{qr} + \frac{d\underline{\psi}_{qr}}{dt} - \theta_r \underline{\psi}_{dr} \quad (3-13)$$

Les expressions des flux s'expriment par :

$$\Psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \quad (3-14)$$

$$\Psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \quad (3-15)$$

$$\Psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \quad (3-16)$$

$$\Psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \quad (3-17)$$

Le couple mécanique et le couple électromagnétique sont donnés par les relations suivantes :

$$T_{mec} = T_r + f\Omega + j \frac{d\Omega}{dt} \quad (3-18)$$

$$T_{em} = -p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \Psi_{qs} - I_{qr} \Psi_{ds}) \quad (3-19)$$

Ces modèles mathématiques de la génératrice asynchrone doublement alimentée dans les référentiels à deux axes seront utilisés et programmés sous l'environnement MATLAB/Simulink, pour étudier le comportement de la GADA en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant. Dans cette thèse, la surveillance de défauts sur l'éolienne est axée sur sa génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA). Le modèle de la GADA est programmé dans l'environnement Simulink de l'ensemble présenté sur la figure 3.3. Les tests sont évalués sur le simulateur numérique d'une éolienne à vitesse variable et avec une régulation pitch basé sur des modèles simples validés avec des données d'un aérogénérateur à vitesse fixe. Le modèle simule des données de la génératrice en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant.

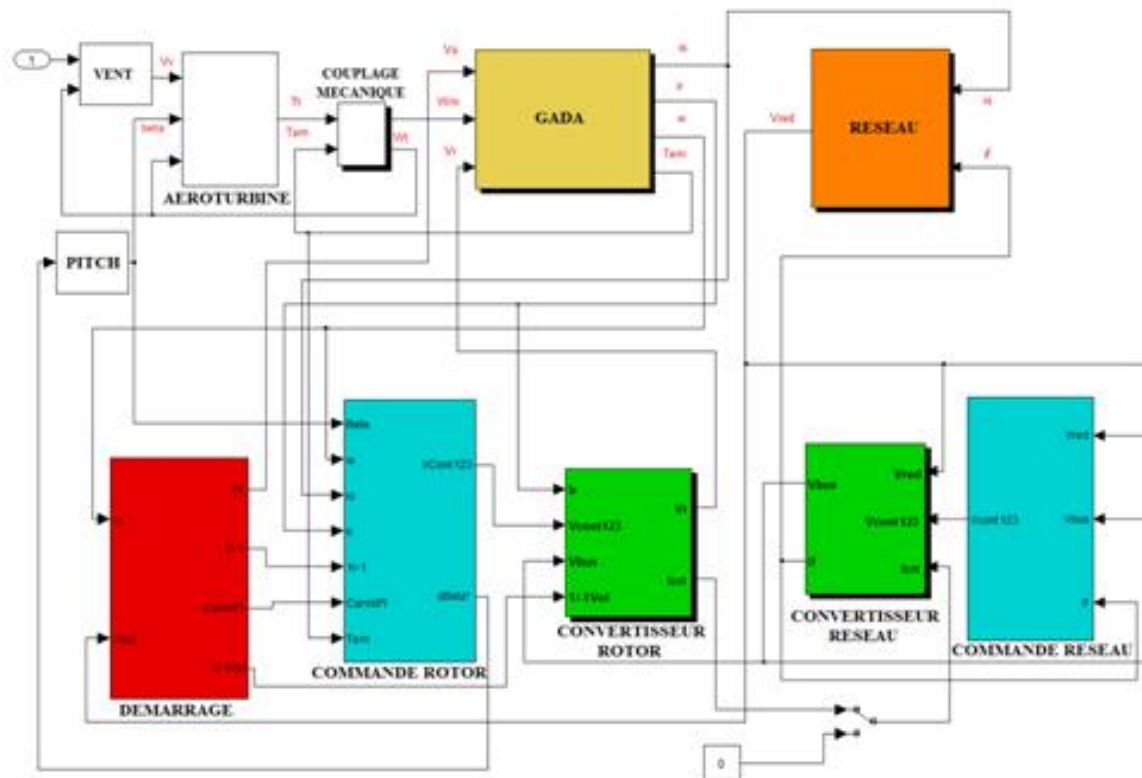


Fig. 3.3: Schéma bloc sous Simulink

### 3.2.5 Description des constituants de l'éolienne

L'ensemble du modèle de l'éolienne est modulable, la flexibilité de l'ensemble est importante car elle permet de tester indépendamment chaque module, et permet de modéliser facilement, en changeant simplement la structure ou les paramètres d'un module, la modélisation de chaque module dépend de la puissance de calcul disponible et de l'objectif recherché dans la simulation du modèle [CAMBO2] et [CAMB03].

L'ensemble du système éolien étudié, figure 3.3, est composé de huit blocs dont :

- **Le vent.** Le modèle du vent utilisé pour le calcul du couple capté par l'aéroturbine est obtenu en utilisant les données des coefficients du couple et les données des coefficients de puissance en fonction de la vitesse spécifique de la turbine  $\lambda$ , figure 3.4. C'est un vent fictif exprimé en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine et qui permet de retrouver le couple proche de celui donné par le vent réel.

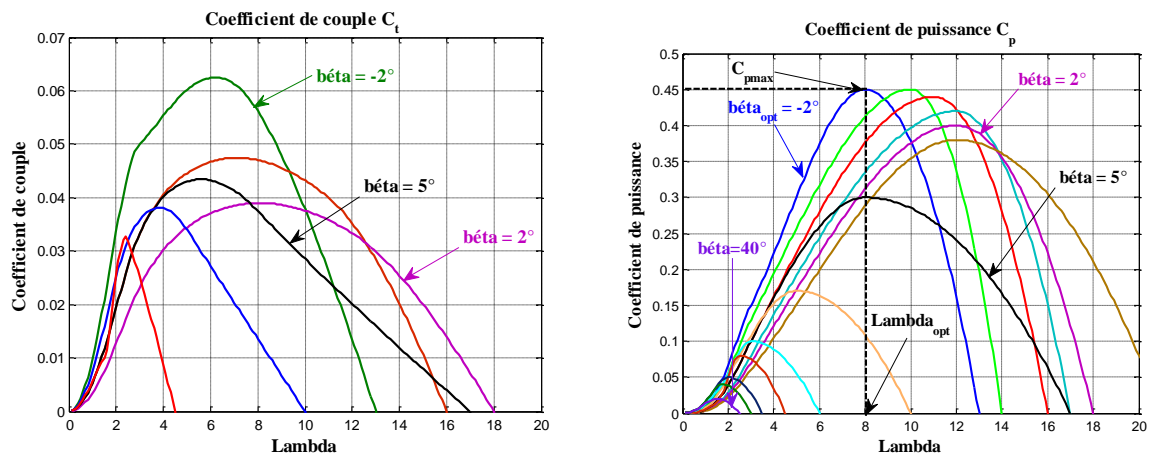


Fig. 3.4: Courbes des coefficients de couple et puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$

- **L'aéroturbine.** L'aéroturbine étudiée dans cette thèse est un aérogénérateur tripale à vitesse variable à axe horizontal et une régulation de puissance de type pitch (cf. fig. 3.1). La possibilité de faire varier l'angle de calage augmente le degré de liberté du système.

- **Le couplage mécanique.** Le système mécanique d'un aéroturbine est très complexe. La représentation du couplage mécanique de l'aéroturbine est le modèle à deux masses. Dans cette modélisation, toutes les grandeurs sont ramenées dans l'axe de grande vitesse. Les deux masses considérées sont l'inertie côté turbine et l'inertie côté machine électrique. En fait, ces deux masses d'inertie ne représentent pas forcément l'aéroturbine et la machine électrique car si la fréquence de résonance fondamentale du train vient des pales, alors une partie de l'inertie de l'aéroturbine est représentée dans l'inertie du côté de la machine électrique. Le modèle à deux masses exprime le mode principal du comportement dynamique du train de puissance.



- **La GADA.** C'est une génératrice asynchrone doublement alimentée. Les équations de la GADA sont représentées dans le système de référence lié au stator qui correspond aux axes (d, q) (cf. 3.2.4). Ce système de référence permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du stator ou celles du flux et du couple. Les expressions du flux (3-14) à (3-17) permettent d'exprimer les courants du stator en fonction de ceux du rotor et du courant de magnétisation, et on voit que le couple ne dépend que de la composante quadratique du courant du rotor. Le couple est contrôlé par la composante quadratique du courant au rotor [SEDI12].

- **La régulation pitch.** Dans la littérature, il existe plusieurs types de régulation de l'angle de calage des pales. Le calage peut intervenir sur le long de la pale ou sur le bout des pales. Divers systèmes sont utilisés pour commander l'angle de calage des pales, soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système avec des moteurs électriques, qui ont besoin d'une source d'énergie externe pour les éoliennes de grande puissance, ou soit par un système hydraulique pour les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance [HEIE00]. En effet, le régulateur est conçu en fonction du système à commander : pour toutes les pales ou pour chacune d'elles. La régulation indépendante donne plus de degrés de liberté mais exige plus d'intelligence dans le système de commande des aérogénérateurs, car elle peut entraîner un déséquilibre aérodynamique dans la turbine. L'éolienne étudiée dans cette thèse utilise la régulation par l'angle de calage par un système linéaire du premier ordre contenant la dynamique principale définie par la constante de temps, c'est-à-dire en fonction de la vitesse de variation de l'angle de calage. Elle est limitée à environ 10°/s lors des procédures normales et à 20°/s pour les cas d'urgences [HEIE00].

- **Les convertisseurs.** Dans le système étudié, on utilise deux convertisseurs: le premier est le convertisseur rotor et le second le convertisseur réseau. Le convertisseur rotor a été utilisé pour commander le couple électromagnétique du générateur et la puissance réactive transférée par le stator. Le convertisseur rotor étant un onduleur de tension et la variable de contrôle est le courant au stator. Comme avec le convertisseur rotor, les courants dans le référentiel (d, q) peuvent être commandés par les tensions à la sortie du convertisseur réseau. La conversion de puissance est formée par deux onduleurs de tension en cascades équipés des dispositifs semi-conducteurs IGBT et connectés au travers d'un bus continu de courant continu. L'onduleur en cascade a beaucoup plus d'avantage que le système de Kramer et Scherbious [CAMB03] et [RODR00] tel que la faible distorsion des tensions et des courants du stator et du rotor. Il permet le transfert de flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat. La commande du

couple de la machine électrique et de la puissance réactive injectée par le rotor sont indépendantes et il est possible de contrôler le facteur de puissance du système.

- **Le système de démarrage.** Ce bloc transforme le référentiel triphasé en référentiel diphasé en utilisant la matrice de Clarke et permet de mettre en marche le processus de démarrage de la génératrice asynchrone doublement alimentée.

- **Les systèmes de commande.** L'aérogénérateur a deux niveaux de commande. Le premier niveau se charge de la commande des actionneurs dont le système de régulation de la génératrice asynchrone. Le deuxième niveau de commande est celui qui contrôle les fonctionnalités de l'aérogénérateur et qui se charge de donner les références de la commande de niveau 1.

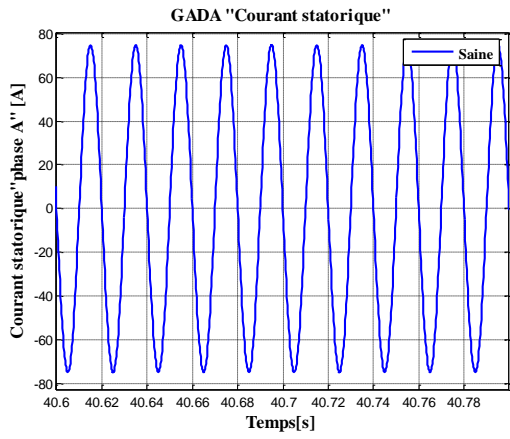
- **Le réseau.** Le réseau électrique est modélisé par des lignes d'inductance, de résistance et d'une source de tension triphasée idéale. C'est un réseau de forte puissance et sa pulsation au stator est indirectement à la sortie du convertisseur. Le modèle du réseau étudié n'est pas valable pour représenter des systèmes isolés.

### **3.2.6 Résultats de simulation**

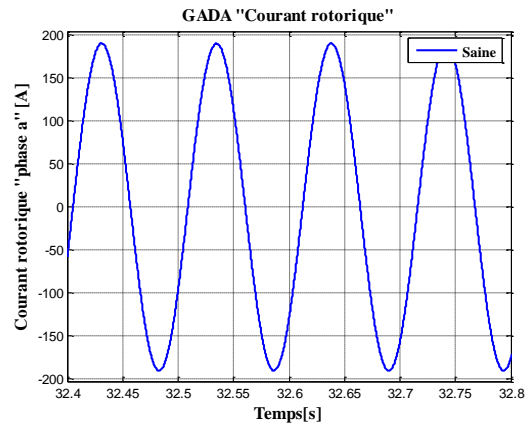
Dans cette thèse, les valeurs des paramètres de l'aérogénérateur étudié sont des paramètres réels utilisés par Camblong avec un banc d'essai d'éolien à vitesse fixe de 180 kW [CAMB03]. Des séries temporelles de la vitesse du vent et de la puissance active produite par le système ont été utilisées pour la simulation de l'ensemble. Les séries temporelles sont utilisées pour ajuster les valeurs des paramètres et pour valider le comportement dynamique de l'interaction vent-pales, du couplage mécanique et de la machine électrique. La simulation du système est effectuée sans les convertisseurs et avec la génératrice asynchrone directement connectée au modèle du réseau électrique mais lancée avec une série temporelle du vent incident sur l'aérogénérateur. En fait, on fait fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable modélisé comme un aérogénérateur à vitesse fixe.

#### **3.2.6.1 Fonctionnement sain**

Pour simuler le fonctionnement sain de l'aérogénérateur utilisant la GADA, les paramètres du système sont inchangés mais on tient compte les hypothèses de départ. Comme l'objectif de la recherche est de diagnostiquer la génératrice asynchrone d'une éolienne, alors le but de la simulation est d'étudier les évolutions des variables d'état de la GADA. Les figures suivantes montrent l'évolution des variables d'état de la GADA.

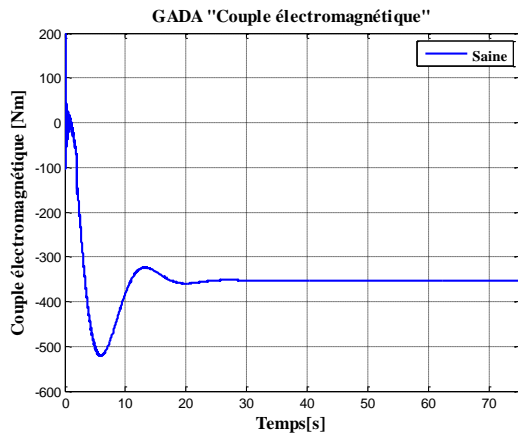


(a)

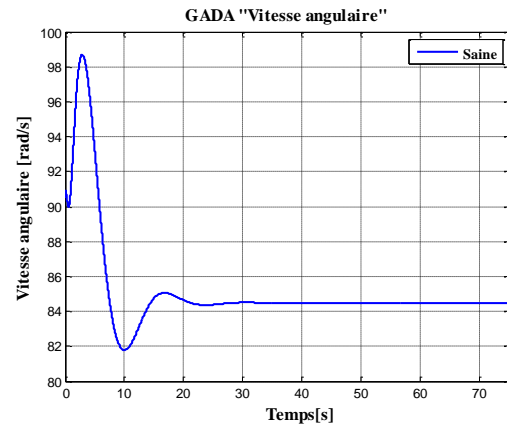


(b)

Fig. 3.5: Evolution temporelle du courant statorique (a) et rotorique (b)

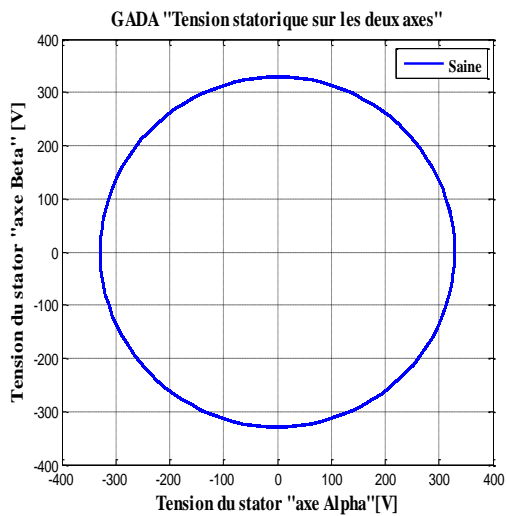


(a)

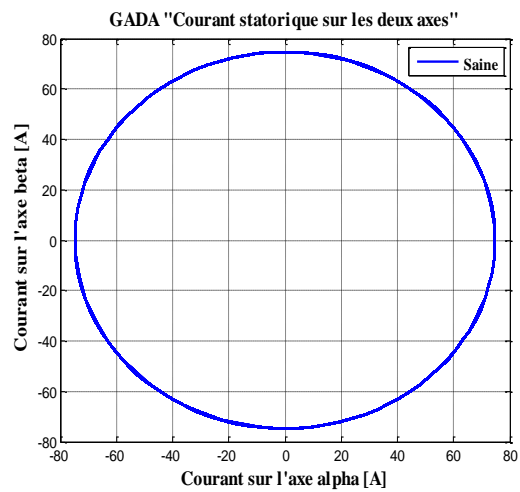


(b)

Fig. 3.6: Evolution temporelle du couple électromagnétique (a) et la vitesse angulaire (b)



(a)



(b)

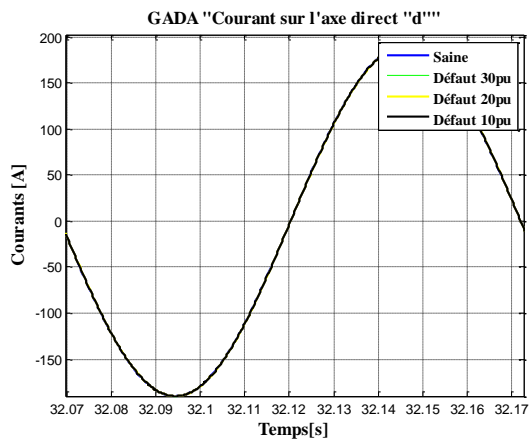
Fig. 3.7: Tension (a) et courant (b) du stator sur le système d'axe alpha beta

La figure 3.5 à 3.6 représentent l'évolution temporelle des variables d'état dans le référentiel standard triphasé (a, b, c). Les deux figures 3.5a et 3.5b évoquent les allures des courants statorique et rotorique. Le temps de simulation varie de 0 à 75 [s], le temps entre 0 et 10 [s] est le régime de démarrage dont l'amplitude des variables à surveiller est très élevée et à partir de 20 [s] le régime permanent où les courbes prennent les valeurs normales de fonctionnement. La figure 3.6 montre la variation temporelle du couple électromagnétique et la vitesse angulaire par rapport à l'axe du rotor. La figure 3.7 correspond à la tension (fig. 3.7a) et la figure 3.7b au courant du stator dans le référentiel (d, q).

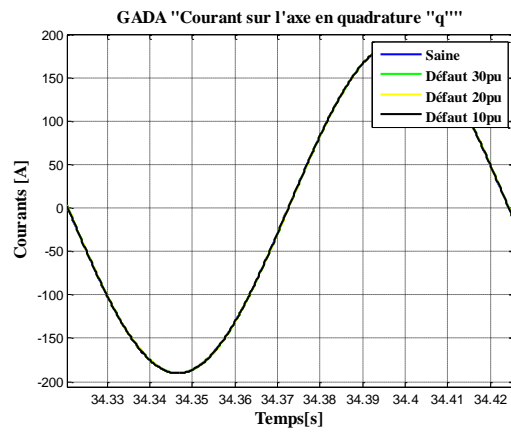
### 3.2.6.2 Fonctionnement défaillant

Pour étudier le comportement de la génératrice asynchrone en fonctionnement défaillant, on modifie les paramètres caractéristiques de la machine. En utilisant la même méthode que le moteur asynchrone à rotor bobiné (MARB), une augmentation de la valeur de la résistance des enroulements rotoriques ou de la résistance des enroulements statoriques par rapport à la valeur normale à la température ambiante de 25°C correspond à l'apparition d'une défaillance de fonctionnement de la GADA [RAZIK02], [CASI03], [RAMA11] et [RAMA12a, b]. Pour la génératrice asynchrone doublement alimentée, on fait varier la résistance des enroulements statoriques par palier de 10 pour cent jusqu'à 30%.

Les figures 3.8 à 3.13 représentent les allures des variables d'état de la GADA en fonctionnement défaillant (courants et tensions du stator et du rotor sur les systèmes d'axes d, q et  $\alpha$ ,  $\beta$ , le couple électromagnétique et le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation) [RAZIK02]. Plusieurs types de représentations sont utilisés dans le domaine du traitement des signaux en particulier pour le diagnostic des machines électriques. On peut citer la représentation temporelle (figures 3.8, 3.10, 3.11 à 3.13a) et la représentation fréquentielle. Bien qu'il soit prouvé leur efficacité, les représentations des variables d'état entre elles montrent aussi leurs avantages (figures 3.9, 3.11 et 3.13b), elles peuvent être avec ou sans transformation mathématique [CASI03] et [ONEL07].



(a)



(b)

Fig. 3.8: Evolution temporelle du courant Direct (a) et en Quadrature (b)

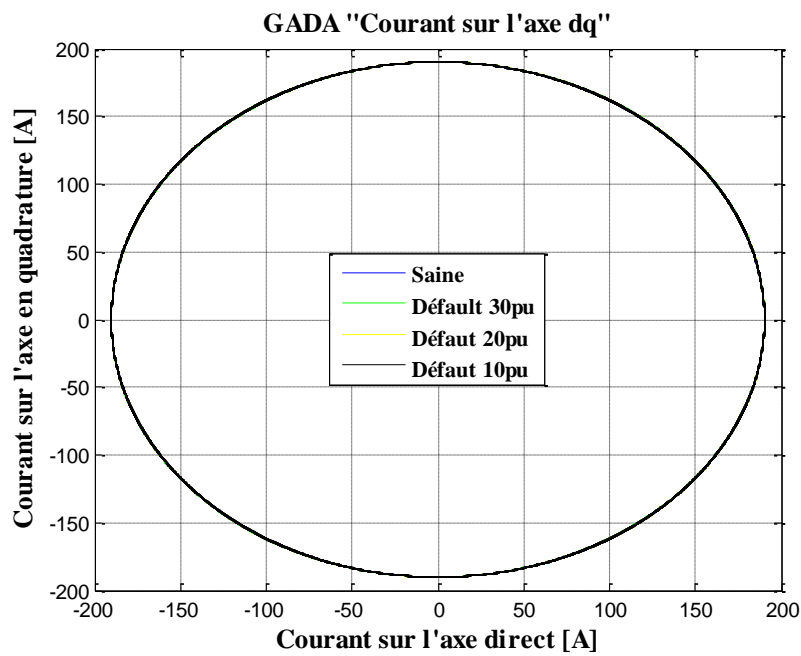
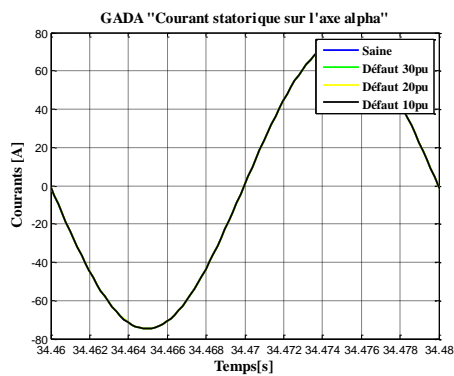
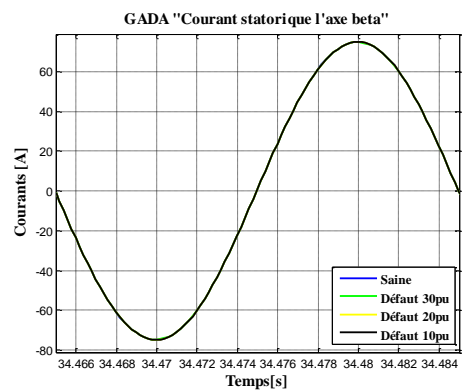


Fig. 3.9: Evolution du courant du stator sur le référentiel d et q



(a)



(b)

Fig. 3.10: Evolution temporelle du courant statorique sur l'axe alpha et beta

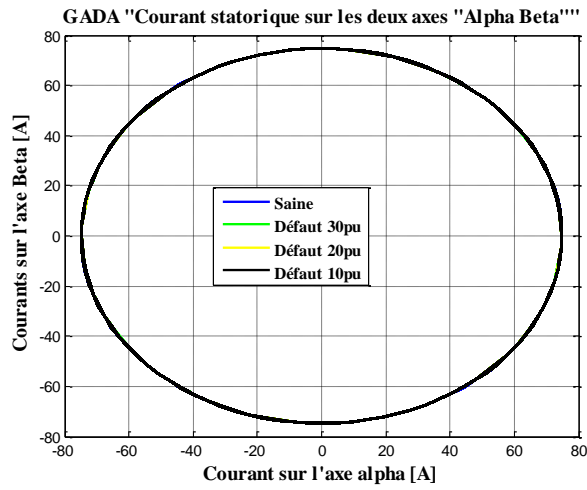
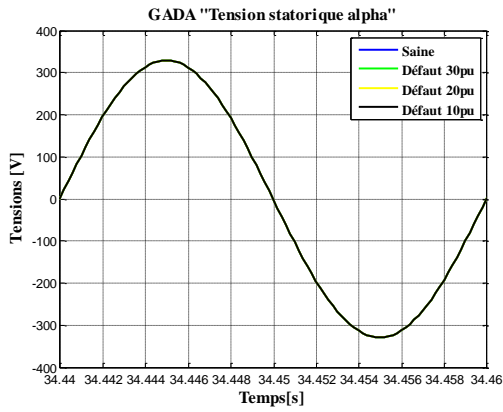
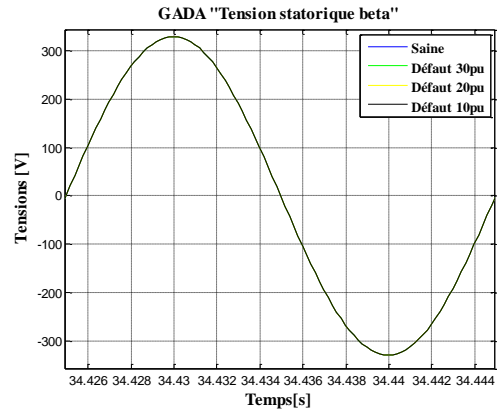


Fig. 3.11: Courants statoriques sur les deux axes «alpha-béta»

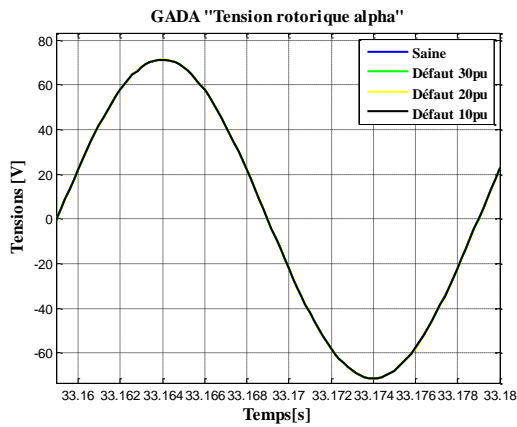


(a)

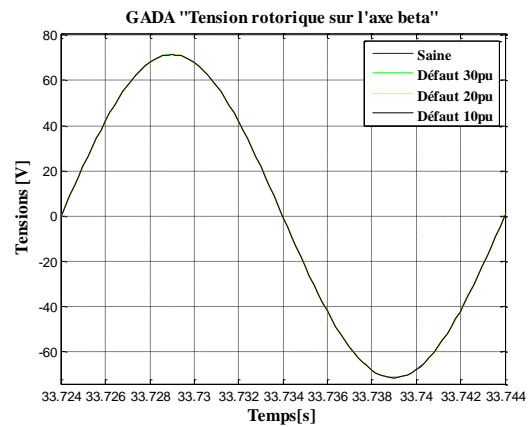


(b)

Fig. 3.11: Evolution temporelle de la tension statorique sur l'axe alpha (a) et beta (b)



(a)



(b)

Fig. 3.12: Evolution temporelle des tensions rotorique sur l'axe alpha et beta

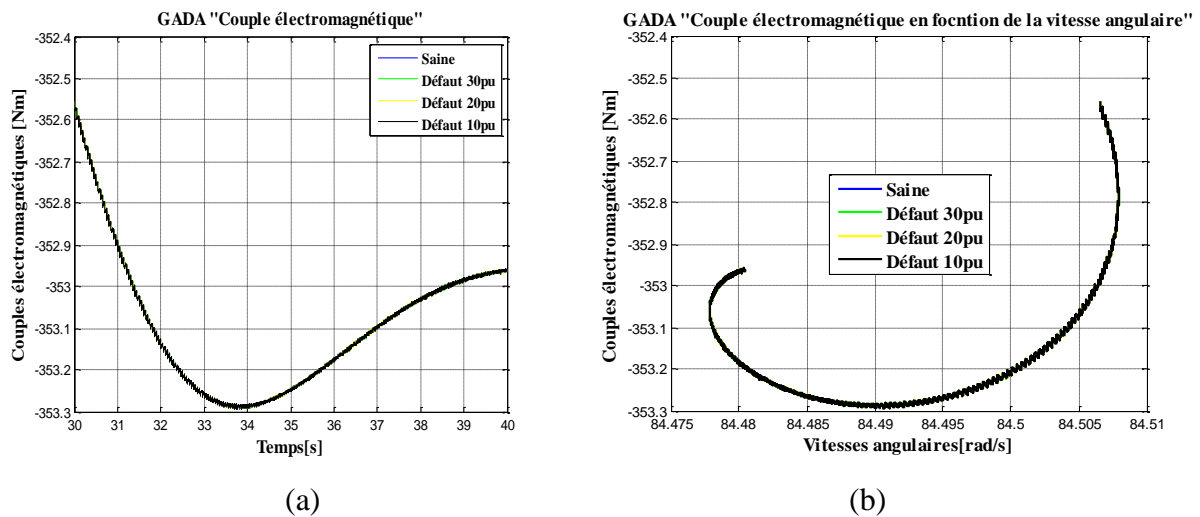


Fig. 3.13: Allures des couples électromagnétiques (a) et des couples électromagnétiques en fonction des vitesses angulaires (b) en régime permanent

Les figures 3.9 et 3.11 évoquent les représentations entre des courants du stator et du rotor dans les deux systèmes d'axes. Sur les quatre figures, on constate qu'il est difficile de distinguer l'effet de la variation des valeurs des résistances de l'enroulement statorique (de 0 à 30 % par palier de 10%). De même avec les allures des tensions (figures 3. 11 et 3.12), le couple électromagnétique (figure 3.13a) et le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation (figure 3.13b) ne fournissent pas des informations pertinentes sur la présence de défaut sur la GADA. L'allure en fonctionnement sain, en bleu, et en fonctionnement défaillant, en d'autres couleurs, sont identiques quelque soit les variations des résistances sur les enroulements.

### 3.3 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la génératrice asynchrone doublement alimenté (GADA). Le modèle de la machine choisit est un système à deux axes. L'équation de la GADA dans le référentiel standard (a, b, c) est présenté dans le référentiel fixe ( $\alpha, \beta$ ) et dans le référentiel tournant (d, q). En utilisant la transformation de Park et Concordia, les équations des tensions, les flux respectivement, statoriques et rotoriques, liées aux deux référentiels ont été établies, ainsi que les équations des couples.

Nous avons ensuite présenté les différents éléments constituant l'ensemble de l'éolienne à surveiller. Le modèle de la GADA a été introduit dans l'ensemble du modèle de l'éolienne pour simuler le fonctionnement sain et fonctionnement défaillant de la GADA sous MATLAB/SIMULINK.

Dans le deuxième volet, nous nous sommes intéressés aux résultats de simulation de la GADA. En fonctionnement sain, nous avons présenté l'évolution temporelle des tensions, des courants, du couple électromagnétique et de la vitesse angulaire dans le référentiel standard et dans les référentiels à deux axes. Pour étudier le comportement de la GADA en fonctionnement défaillant, nous avons introduit des défauts sur les enroulements statoriques et rotoriques. Une augmentation de 10, 20 et 30 pour cent de la résistance des enroulements par rapport à la valeur normale a été introduite. Les résultats de simulation des variables d'état de la génératrice à surveiller sur les deux fonctionnements ont été présentés

Dans ce chapitre, on peut constater qu'il est difficile de détecter la présence de défaut sur les variables d'état de la GADA. Par conséquent, l'étude du comportement de l'éolienne par la méthode temporelle et fréquentielle ne permet pas de détecter la présence de défaut sur les paramètres de l'actionneur. En effet, par la suite, on propose d'utiliser la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour la détection des défauts de l'éolienne, un système beaucoup plus complexe vu ses éléments constituants.



### 3.4 REFERENCES DU CHAPITRE 3

- [ACKE02] ACKERMANN T., «An overview of wind energy- status 2002». Renewable and Sustainable Energy Reviews 6, pp. 67-128, 2002.
- [AHME04] AHMED B. H., MULTON B., NICHITA C., ROBOAM X., GERGAUD O. et DAKYO B., «Aérogénérateurs électriques». Techniques de l'Ingénieur, D3960, 2004.
- [BALA09] BALASUBRAMANIAM B., RAJAPALAN A., «Modelling, simulation and analysis of doubly fed induction generator for wind turbines, Journal of Electrical Engineering, Vol. 60, N°2, 79-85, 2009.
- [BENN09] BENNOUNA O., HÉRAUD N., CAMBLONG H., RODRIGUEZ M. and KAHYEH M. A., «Diagnosis and fault signature analysis of a wind turbine at a variable speed, Journal of risk and reliability», vol. 223 (1), p. 41-50, 2009.
- [CAMB02] CAMBLONG H., SANTOS M. et RODRIGUEZ M., «Logiciel de simulation d'éoliennes à vitesse variable», Rapport du projet SIMEOLE, Fonds Commun de Coopération Aquitaine-Euskadi, 2002.
- [CAMB03] CAMBLONG H., «Minimización del Impacto de las Perturbaciones de Origen Eólico sobre la Producción de Electricidad en Aerogeneradores de Velocidad Variable», Tesis Doctoral, Escuela Politécnica Superior, Mondragon Unibertsitatea, 2003.
- [CASI03] CASIMIR R., BOUTLEUX E., and CLERC G., «Fault diagnosis in an induction motor by pattern recognition methods», Proc. IEEE SDEMPED-Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 294-299, Atlanta, GA, USA, 2003.
- [DIMI12] DIMITRIOS G. G. , ATHANASIOS S. , SAVVAS T., «Dynamic Behaviour of a Wind Energy Conversion System Including Doubly-Fed Induction Generator in Fault Conditions, International Journal Of Renewable Energy Research, Vol.2, No.2, 2012.
- [HEIE00] HEIER S., «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Wiley, ISBN 0-471-97143-X, 2000.

- [JOSH06] JOSHI D., SANDHU K.S. and SONI M.K., «Constant Voltage Constant Frequency operation for a self-excited Induction Generator», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°1, 228 - 234, 2006.
- [KEND11] KENDOULI F., NABTI K., ABED K. and BENALLA K., «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, N°1, 109 - 120, 2011.
- [MEKT09] MEKHTOUB S., IBTIOUEN R. et BACHA S., «Analyse dynamique des générateurs éoliens lors d'un creux de tension du réseau», Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2, pp. 225-235, 2009.
- [MIGU09] MIGUEL G. A., RODRÍGUEZ A. and IWANSKI G., «Applications of the Doubly Fed Induction Machine (DFIM) », Ingeteam, Escuela Politecnica Superior, Mondragon, 2009.
- [MULT12] MULTON B., GERGAUD O., BEN AHMED H., ROBOAM X., ASTIER S., DAKYO B. et NICHITA C., «Etat de l'art dans les Aérogénérateurs Electriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN, l'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables, ISBN 2-912154-8-1, 2, version 1, 2012.
- [PHAN11] PHANI SHREE K.H., NITEESH REDDY T., «Novel Techniques To Enhance The LVRT Capability Of DFIG In Wind Power Plant, International Journal Of Advanced Engineering Sciences And Technologies, (IJAEST), Vol. 10, N° 2, 360-365, 2011.
- [RAMA11] RAMAHALEOMIARANTSOA J.F., HÉRAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Principal components analysis method, application in electrical machines diagnosis», The proceedings of the 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), SciTePress-Science and Technology Publications, ISBN: 978-989-8425-74-4, Vol 1, pp.167-175, 2011.
- [RAMA12a] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., BENNOUNA O., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Modeling & Fault

Diagnosis System for Electric Vehicles», The 38<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, ETS Montréal, Canada, October 2012.

[RAMA12b] RAMAHALEOMIARANTSOA J.F., HÉRAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Performances of the PCA method in electrical machines diagnosis using Matlab», INTECH, MATLAB / Book 1, ISBN 979-953-307-774-0, 2012.

[RAZI02] RAZIK H., «Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art», La revue 3EI, n°29 (2002), 48-52.

[RODR00] RODRIGUEZ J.L., «Análisis Dinámico y Diseño del Sistema de Control de Aeroturbinas de Velocidad Variable con Generador Asíncrono de Doble Alimentación», Thèse de Doctorat à l'Université Carlos III de Madrid, 2000.

[SEDI12] SEDIKI H., ABDESLAM Dj. O., OTMANE-CHERIF T., BECHOUCHE A., MESBAH K., « Steady-State Analysis and Control of Double Feed Induction Motor », World Academy of Science, Engineering and Technology 61, pp. 181-189, 2012.

[ONEL07] ÖNEL I.Y., BENBOUZID M.E.H., « Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study», IEEE, pp 1073-1078, 2007.

[VLAD03] VLADISLAV Z., «Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power, PhD Thesis, Electric Power Engineering, Orsted DTU, Technical University of Denmark, 2003.

[ZELLA08] ZELLAGUI M., «Variable speed of the wind turbine generator with DFIG connected to electric grid», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°3 pp.453 - 464, 2008.

# Chapitre 4 : Analyse en Composantes Principales

## 4.1 INTRODUCTION

L'Analyse en composantes principales (ACP) est l'une des plus connue et des plus utilisée technique d'analyse exploratoire. Elle a été étudiée en 1901 par Karl Pearsona [RAGO09], a été développée en France dans les années 60 par Jean-Paul Benz. Elle ne s'appuie pas sur un modèle probabiliste mais elle dépend d'un modèle géométrique, dans la mesure où ceux sont des méthodes descriptives.

Le principe de l'ACP s'appuie sur l'algèbre linéaire simple et on peut l'utiliser comme outil d'exploration et d'analyse de données ainsi que pour la conception de modèles, il est facile à interpréter géométriquement. L'ACP est basée sur une transformation de l'espace de représentation des données de simulation, le nouvel espace étant de dimension inférieure à celui de l'espace initial, elle est classée parmi les méthodes sans modèle. Les données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage, de l'observation ou bien d'une mesure des systèmes en cours de fonctionnement afin de surveiller leur comportement. Selon les domaines d'application, l'ACP est aussi connue sous le nom de transformation de Karhunen-Loève, de transformation de Hotelling ou encore de décomposition orthogonale. Elle peut être considérée comme une méthode d'identification de système à part entière, la méthode met en œuvre une décomposition en valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance des données ou encore une décomposition en valeurs singulières de la matrice des données [HUAN01] et [LI W01]. Elle est classée parmi les méthodes sans modèle, mais elle élabore implicitement les modèles du système à partir des données expérimentales prélevées sur le système. L'ACP est utilisée pour la surveillance et le diagnostic de nombreux systèmes complexe [HARK06]. L'ACP permet d'obtenir directement les relations de redondance entre les variables sans identifier les matrices de la représentation d'état du système, tâche souvent délicate à réaliser. Dans ce chapitre, la méthode ACP traite les données en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant, d'abord d'une machine asynchrone à rotor bobiné (MARB), puis d'une éolienne notamment de sa génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA). L'objectif est de surveiller le comportement de deux actionneurs avec ou sans défaillance de ses paramètres. En effet, la méthode est utilisée pour générer les résidus des variables d'état des deux machines afin de les diagnostiquer. Par conséquent, le principe et la méthode de construction du modèle sont abordés et suivis par les résultats de la validation de la méthode et enfin par le diagnostic des défauts de deux actionneurs.

## 4.2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

### 4.2.1 Principe de la méthode

Soit un vecteur de mesure

$$x_i(j) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_m] \quad (4-1)$$

ou :

- $i$  représente les variables de mesure à surveiller et varie de 1 à  $m$
- $j$  le nombre de mesure effectuées pour chaque variable « $m$ », et varie de 1 à  $N$ ,

La matrice des données de mesure  $X_d \in R^{N \times m}$  s'écrit :

$$X_d = \begin{pmatrix} x_1(1) & \dots & x_m(1) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_1(N) & \dots & x_m(N) \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

L'objectif de l'analyse en composantes principales est de décrire cette matrice de données avec le plus petit ensemble possible de variables. C'est une projection orthogonale linéaire d'un sous espace de dimension  $m$  dans un sous espace de dimension inférieure  $\ell$  ( $\ell < m$ ). La méthode consiste alors à identifier le modèle ACP et repose sur deux étapes [HARK06], [RAMA11a] :

- la détermination de la structure du modèle, qui consiste à calculer le nombre de composantes à retenir « $\ell$ » dans le modèle ACP,
- la construction du modèle ACP en tenant compte du nombre de composantes à retenir « $\ell$ », pour déterminer les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de covariance  $R$ .

#### 4.2.1.1 Construction de modèle

Afin de rendre le résultat indépendant des unités utilisées pour chaque variable à surveiller, il est indispensable de normaliser c'est-à-dire de centrer et de réduire les variables. La nouvelle matrice des mesures normalisées obtenue est de la forme :

$$X = [X_1 \ \dots \ X_m] \quad (4-3)$$

Et la matrice de corrélation ou covariance  $R$  est donnée par :

$$R = \frac{1}{N-1} X X^T \quad (4-4)$$

En décomposant la matrice de covariance(ou corrélation)  $R$ , on a :

$$R = P \Lambda P^T \text{ avec } P P^T = P^T P = I_m \quad (4-5)$$

$\Lambda$ : est la matrice diagonale des valeurs propres de la matrice R où les termes diagonaux sont ordonnés dans l'ordre décroissant des modules :  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_m$  et  $P$  est la matrice de vecteurs propres donnée par :

$$P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_m], \text{ de dimension } (m \times m) \quad (4-6)$$

où  $p_i$  : les vecteurs propres et orthogonaux, correspondant aux valeurs propres  $\lambda_i$ .

D'où la matrice de composantes principales T :

$$T = XP \quad (4-7)$$

avec

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_m], \text{ de dimension } (N \times m)$$

avec  $t_i$  : les composantes principales.

En partitionnant les matrices de composantes principales T, de vecteurs propres P et de valeurs propres  $\Lambda$  [HUAN01], on a :

$$T = \begin{bmatrix} T_p^{N \times 1} & T_r^{N \times (m-1)} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_p^{N \times 1} & P_r^{N \times (m-1)} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda^{1 \times 1} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \Lambda^{(m-1)(m-1)} \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

avec :

- $T_p$  et  $T_r$  : respectivement la partie principale et résiduelle de la matrice T de Composantes Principales,
- $P_p$  et  $P_r$  : respectivement la partie principale et résiduelle de la matrice P de vecteurs propres.
- L'indice  $\ell$  correspondant au nombre de composantes principales retenues, associées aux plus grandes valeurs propres dans l'ordre décroissant de  $\Lambda$ .

Compte tenu des équations (4-8) et (4-9), la matrice centrée réduite X peut s'écrire :

$$X = P_p T_p^T + P_r T_r^T \quad (4-11)$$

Les « $\ell$ » premiers vecteurs propres  $P_p \in R^{m \times \ell}$  constituent l'espace principal des données (PCS : *Principal Component Subspace*) et les  $(m-\ell)$  derniers vecteurs propres  $P_r \in R^{m \times (m-\ell)}$  constituent l'espace résiduel (RS : *Residual Subspace*).

En posant :

$$X_p = P_p T_p^T = \sum_{i=1}^l P_i t_i^T \quad (4-12a)$$

$$X_p = \sum_{i=1}^l X P_i P_i^T \quad (4-12b)$$

$$E = P_r T_r^T = \sum_{i=l+1}^m P_i t_i^T \quad (4-13a)$$

$$E = \sum_{i=l+1}^m X P_i P_i^T \quad (4-13b)$$

La matrice des données devient :

$$X = X_p + E \quad (4-14)$$

Avec :

$X_p$  : les variations modélisées à partir de  $\ell$  ( $\ell < m$ ) composantes,

$E$  : les variations non modélisées à partir de  $(m - \ell)$  composantes.

La matrice  $X_p$  est aussi la matrice principale estimée, et la matrice  $E$ , la matrice estimée des résidus à partir de la matrice normalisée  $X$ .

On peut montrer aussi que les matrices  $X_p$  et  $E$  sont données par :

$$X_p = C_p X \quad (4-15)$$

et  $E = C_r X \quad (4-16)$

Les matrices  $C_p$  et  $C_r$  sont les matrices de projection sur le sous espace principal et le sous espace résiduel du système :

où :

$$C_p = P_p P_p^T \quad (4-17)$$

$$C_r = I_m - C_p \quad (4-18)$$

Ainsi la matrice des résidus  $E$ , qui représente la perte d'information induite par la réduction de dimension de matrice de donnée  $X$ , peut s'écrire :

$$E = X - X_p \quad (4-19)$$

Alors la matrice  $E$  est la différence entre la représentation exacte et approchée de  $X$ . Cette matrice est associée aux plus faibles valeurs propres  $\lambda_{l+1}, \dots, \lambda_m$ . Par conséquent, la compression de données préserve d'autant mieux l'information qu'elle ne véhicule que ces valeurs propres qui ont de faibles valeurs.

Généralement, la phase de détection de défaut dans le cas du diagnostic à base de modèle analytique est liée à l'étape de génération des résidus qui a pour but de générer des signaux révélateurs de la présence de défauts. Les résidus étant la différence entre la valeur estimée et les mesures prises sur le système. Quand l'écart de ces deux valeurs est proche de zéro il n'y a pas de présence de défaut, si l'écart entre ces deux valeurs est très différent de zéro, il y a présence de défaut. A partir de l'analyse de ces résidus, l'étape de prise de décision doit alors indiquer si un défaut est présent ou non. L'approche pour la génération des résidus peut être l'approche par estimation d'état ou l'approche par estimation des paramètres.

#### 4.2.1.2 Détermination du nombre de composante à retenir

Pour obtenir le modèle ACP, il faut déterminer le nombre de composante à retenir « $l$ ». Cette étape est très importante pour la construction du modèle ACP. La figure 4-1 suivante montre les différentes étapes pour la détermination du nombre de composantes à retenir :

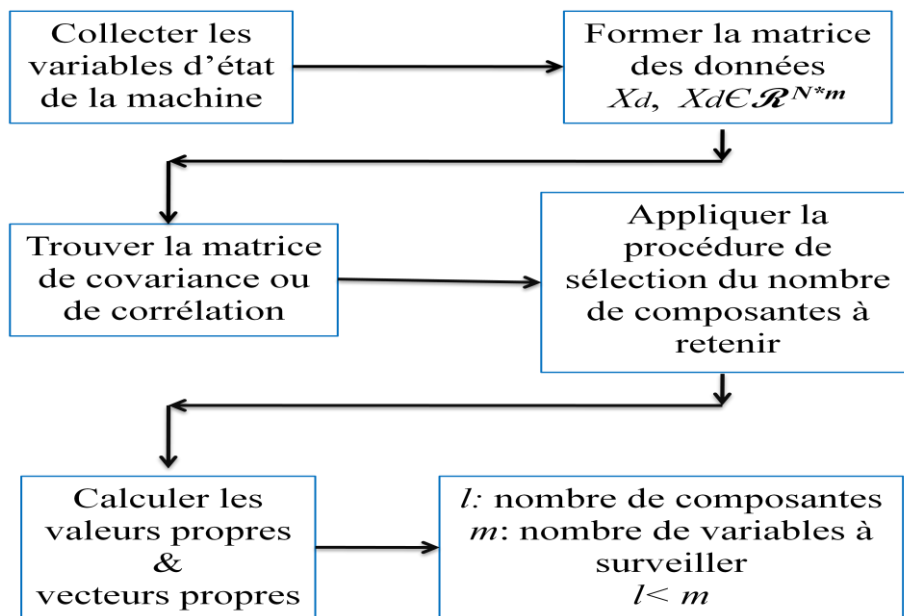


Fig. 4-1: Différentes étapes pour la détermination du nombre de composantes à retenir

Dans la littérature, de nombreuses règles ont été proposées [BESS93], [VALL99] et [HARK03]. La plupart sont issues de méthodes heuristiques parfois subjectives ou de critères utilisés en identification qui privilégient l'approximation de la matrice de données. On peut citer :

- **L'approche empirique** : avec cette approche la détermination du nombre de composantes principales  $l$  à retenir est obtenue de deux façons :
  - o Dans l'ACP centrée, où l'on utilise la matrice de covariance empirique.



$$\Sigma = \frac{1}{N-1} \mathbf{X}_c^T \mathbf{X}_c \quad (4-20)$$

avec :

$\mathbf{X}_c$ : la matrice des données centrées,

$N$  : le nombre de mesure pour chaque variable.

$\Sigma$  est une matrice symétrique. Elle est définie positive si les «  $m$  » variables ne sont pas liées linéairement. La trace de la matrice de covariance  $\Sigma$  est égale à la somme des variances empiriques des «  $m$  » variables. Le nombre des composantes principales à retenir est obtenu en calculant le pourcentage de chaque variance par rapport à la trace de la matrice de covariance, on se contente souvent de prendre le nombre  $\ell$  dans un sous espace engendré par les «  $\ell$  » premiers valeurs propres, si ce sous-espace explique un pourcentage proche de 1. On peut ainsi réduire l'analyse à un sous-espace de dimension  $\ell < m$ .

○ Dans l'ACP normée, si l'on reprend tous les calculs de l'ACP simple, mais en remplaçant les variables de départ par les variables centrées réduites, on voit que ce n'est plus la matrice de covariance, mais la matrice de corrélation «  $R$  » qui intervient dans la recherche des nouveaux axes principaux.

$$\mathbf{X}_{cr} = (\mathbf{D}_\Sigma)^{-1/2} \mathbf{X}_c \quad (4-21)$$

où  $(\mathbf{D}_\Sigma)^{-1/2}$  : la matrice diagonale qui a sur sa diagonale principale, les inverses des écarts-type empirique des variables,

$\mathbf{X}_{cr}$  : la matrice des données centrées et réduites.

Et la matrice de corrélation est donnée par :

$$\mathbf{R} = \frac{1}{N-1} \mathbf{X}_{cr}^T \mathbf{X}_{cr} \quad (4-22)$$

Avec l'ACP normée, la matrice corrélation «  $R$  » n'a que des 1 sur sa diagonale principale. Alors sa trace est toujours égale à «  $m$  ». On a vu que la trace de la matrice est égale à la somme des valeurs propres de «  $R$  » et toujours égale à «  $m$  », calculée avec la distance euclidienne que l'on a choisie. Cette particularité donne une règle supplémentaire pour choisir le nombre de composantes principales à retenir, fondée sur le raisonnement suivant : on a «  $m$  » valeurs propres dont la somme vaut «  $m$  »; on peut ne considérer comme significatives, que les valeurs propres dont la valeur est supérieure à 1, puisque la valeur moyenne des valeurs propres vaut  $\ell$  et leur somme vaut  $m$ . C'est bien sûr une règle empirique mais qui peut servir de guide pour le choix de la dimension du sous-espace que l'on veut garder [HARK06] et [RAMA12a, b].

- **Les critères de généralisation** : Wax et al. [WAX85] ont proposé de déterminer le nombre de composantes principales « $\ell$ » en utilisant les critères d'Akaike [AKAI74]. Cependant, dans le cadre de l'analyse en composantes principales ces deux critères ont une utilisation très limitée car ils ne sont pas définis pour des valeurs propres nulles ou des valeurs propres de petites amplitudes.

- **Les critères de validation croisée** : La base de cette méthode est d'estimer les mesures d'un jeu de données à partir d'un modèle qui a été calculé à partir d'un jeu de données d'identification et de comparer ces estimations avec les valeurs mesurées. Cette procédure de validation croisée est basée sur la minimisation de la quantité *PRESS*. Cette quantité se présente comme la somme des carrés des erreurs entre les données observées et celles prédites ou estimées par le modèle obtenu à partir d'un jeu d'identification différent, l'équation de la quantité est donnée par [HARK03] :

$$PRESS(\ell) = \frac{1}{N*m} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m (x_{pi}^{\ell}(k) - x_i(k))^2 \quad (4-23)$$

avec :

$N$  : la taille du jeu de validation (ou nombre de mesures effectuées),

$m$  : le nombre de jeu d'identification (ou nombre de variables),

$x_{pi}^{\ell}$  : la  $i^{\text{ème}}$  variable modélisée avec  $\ell$  composantes retenues,

$x_i$  : la  $i^{\text{ème}}$  variable du vecteur  $x$ .

- **Le critère de sélection du nombre de composantes** : Le critère de sélection du nombre de composantes à retenir a été proposé par Dunia *et al.* [WANG02] et [DUNI98]. La méthode consiste à rechercher le nombre de composantes  $\ell$  qui minimise la variance de l'erreur de reconstruction et que l'on appelle parfois variance non reconstruite.

- **Les critères heuristiques** : Dans ces critères on peut citer deux tests :

o **Le pourcentage cumulé de la variance totale (PCV)** : Cette méthode est basée sur l'utilisation des valeurs propres de la matrice de corrélation. Notons que chaque composante principale est représentative d'une portion de la variance des mesures du processus étudié. Les valeurs propres sont les mesures de cette variance, donc on peut utiliser pour la détermination du nombre de composantes principales. Le nombre de composante  $\ell$  est le plus petit nombre pris de telle sorte que le pourcentage de la variance totale qu'on veut conserver soit atteint ou dépassé. Les composantes sont choisies successivement dans l'ordre des valeurs propres décroissantes. Le pourcentage cumulé de la variance totale est donné par :

$$PCV(\ell) = 100 \left( \frac{\sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \right) \% \quad (4-24)$$

○ *Moyenne des valeurs propres* : Dans un échantillon aléatoire de mesures constitué de « m » variables, on peut tester l'égalité des  $(m - \ell)$  dernières valeurs propres. Si cette hypothèse est acceptée, on conserve les  $\ell$  premiers axes et on néglige les  $(m - \ell)$  derniers axes. Cependant l'utilisation de ce test conduit souvent à considérer un nombre élevé de composantes, dont certaines risquent de ne présenter aucun intérêt pratique. Des règles empiriques peuvent également guider l'utilisateur. Une de ces règles consiste à ne prendre en considération que les composantes pour lesquelles la valeur propre est supérieure à la moyenne arithmétique de toutes les valeurs propres. Dans le cas des données centrées et réduites, ceci revient à négliger les composantes dont la variance est inférieure à l'unité ( $\frac{1}{m} \text{trace} \mathbf{R} = \mathbf{1}$ ). Avec le modèle ACP normé, calculé à partir de la matrice de covariance  $\mathbf{R}$ , la moyenne arithmétique des valeurs propres est donnée par  $(\frac{1}{m} \text{trace} \mathbf{R})$ . Halligan et al. ont utilisé le critère global pour déterminer le nombre de composantes principales à conserver, où  $t_{hc}$  est un seuil défini par l'utilisateur, le seuil est donné en pourcentage qui mesure la part d'inertie expliquée par l'axe 'i' [HALL09] et [RAMA12a].

$$\left( \frac{\sum_{i=1}^{\ell} \lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \right) * 100 \geq t_{hc} \quad (4-25)$$

On remarque que si le nombre de composantes à retenir  $\ell$  est bien calculé, la dimension du système sera réduite, les variables seront bien reconstruites, dans le cas contraire, il y aura une perte d'information et la représentation sera incomplète. Les deux figures (4-2a et 4-2b) suivantes présentent deux allures justifiant les informations obtenues suite aux choix du nombre de composante à retenir.

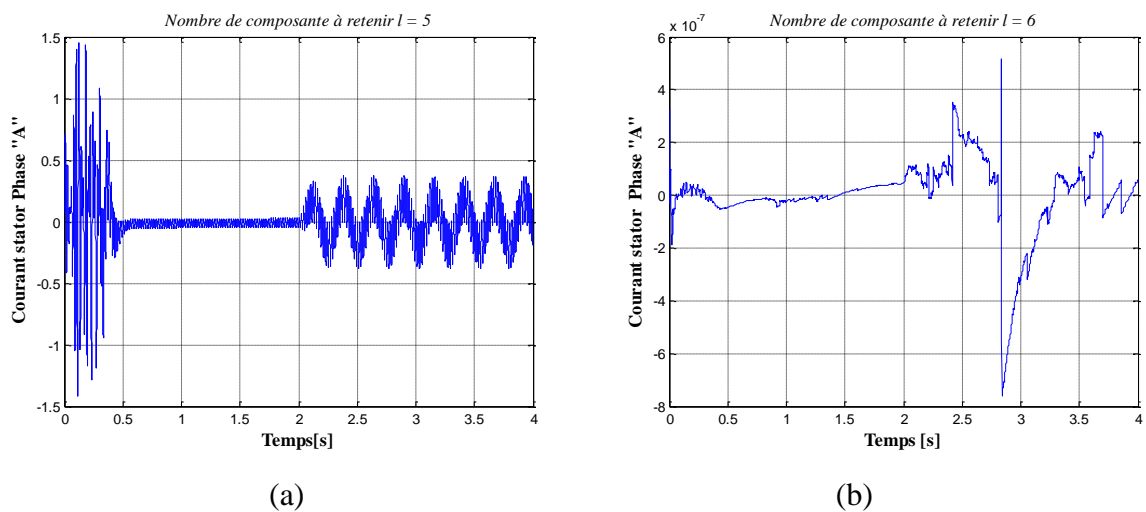


Fig. 4.2: Résidu d'un courant statorique d'une MARB,  $\ell = 5$  et  $\ell = 6$

La figure 4.2 représente le résidu du courant de la phase A du stator de la MARB et montre l'impact du choix de nombre de composante à retenir sur le modèle ACP. La Figure 4.2a est obtenue à partir des 5 premières composantes et la deuxième figure (Figure 4.2b) l'est à partir des 6 premières composantes. On constate que l'information est projetée dans l'espace principal (figure 4.2a). Par contre il est difficile d'exploiter l'information retenue par la figure 4.2b or pour l'approche diagnostic, on étudie l'espace résiduel qui utilise les « $m- \ell$ » composantes restantes, et par conséquent, il est difficile de détecter la présence ou non de défauts dans la variable d'état «courant de la phase A du stator» de la MARB.

#### 4.2.2 Illustration

Comme application, on prend les données de mesures journalières du service Météo de la Compagnie Salinière de Madagascar (CSM) [CSMA05]. Les données, pour illustrer la méthode, sont divisées en trois grandes parties :

- La température en [°C] :
  - o Température maximale «  $T_{\max}$  »,
  - o Température minimale «  $T_{\min}$  »,
  - o Température sèche «  $T_{\text{sèche}}$  »,
  - o Température humide «  $T_{\text{humide}}$  ».
- L'hygrométrie [%] :
  - o Hygrométrie maximale « Max. »,
  - o Hygrométrie minimale « Min. ».
- La vitesse du vent [m/s] :
  - o Vitesse maximale « VitMax »,
  - o Vitesse moyenne « VitMoy ».

Dans ce cet exemple, on travaille sur des données centrées et réduites c'est-à-dire on travaille sur des variables sans dimension car les variables sont hétérogènes, pour normaliser les variables, la méthode consiste à diviser les variables par leur écart type. On a ici 8 variables et 365 échantillons de mesures par variable.

Les années : 2000, 2001, 2002, 2005 sont les quatre années de mesures. Le but de l'analyse en composantes principales sur les échantillons est de visualiser l'évolution et la variation des données chaque jour et pendant les quatre années. Les trois figures suivantes sont obtenues à partir des trois composantes principales différentes : la plus forte, la seconde et la dernière valeur propre.

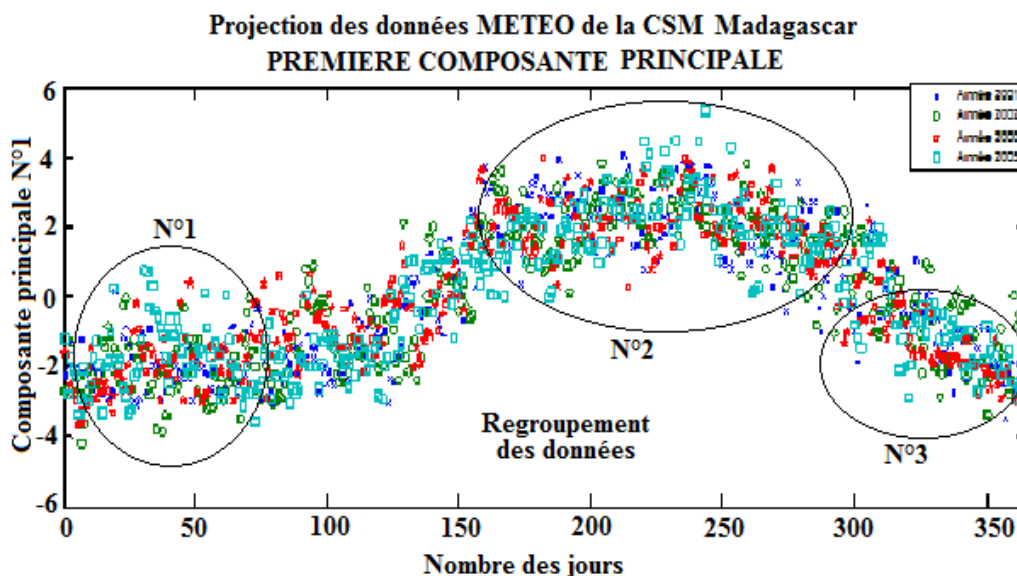


Fig. 4-3: Projection des données « composante principale forte »

La figure 4.3 est celle obtenue, à partir de la première composante principale avec la variance forte, donc avec plus d'information, qui correspond à la variable « vitesse moyenne du vent ». On voit que sur les quatre années d'échantillons, les variations sont stables. La moyenne du vent commence à monter en régime à partir du mois d'avril, entre le 100 et le 150<sup>ème</sup> jour, et atteint une valeur maximale entre le 175 et le 200<sup>ème</sup> jour, mi juillet à mi aout où les « VARATRAZA » ou l'ALIZE soufflent assez fort (saison hivernale), et entament une descende au-delà du 200<sup>ème</sup> jour. Des regroupements (N°1, N°2, N°3) de nuages des points sont vus sur la figure 4.3 : ceci signifie que les données du vent pour les quatre années sont très proches.

La figure 4.4 correspond à la deuxième composante principale, donc moins riche en information que la première. La variable correspondante à cette figure est la vitesse maximale du vent. En 2002, (courbe en noir sur la figure), un pic de la vitesse de vent est atteint entre le 90<sup>ème</sup> jour et le 110<sup>ème</sup> jour, (mois d'avril jusqu'au début du mois de mai), qui correspond au passage d'un cyclone dans la région.

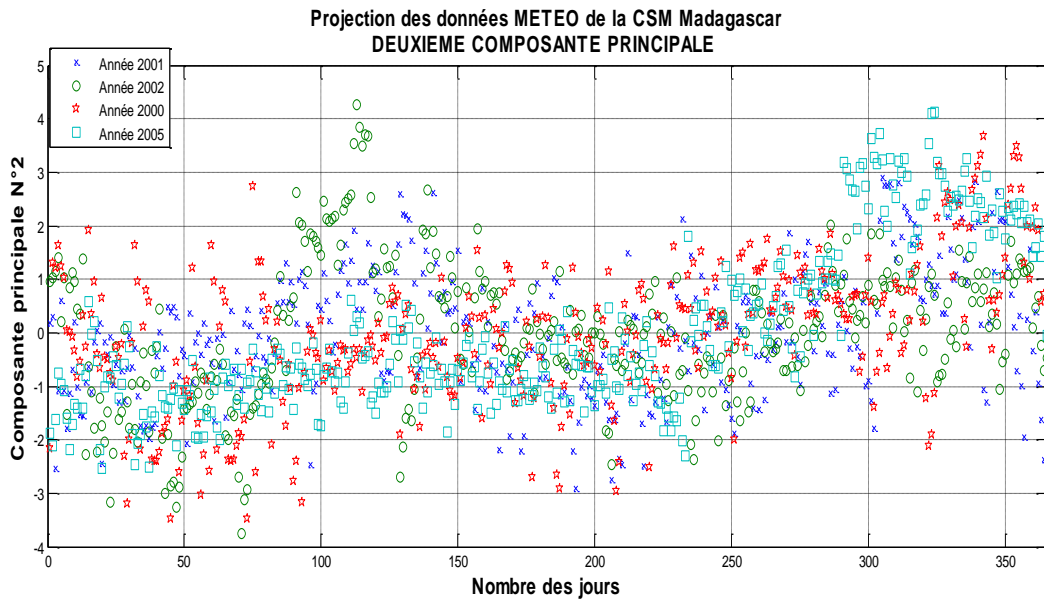


Fig. 4.4: Projection des données « deuxième composante principale »

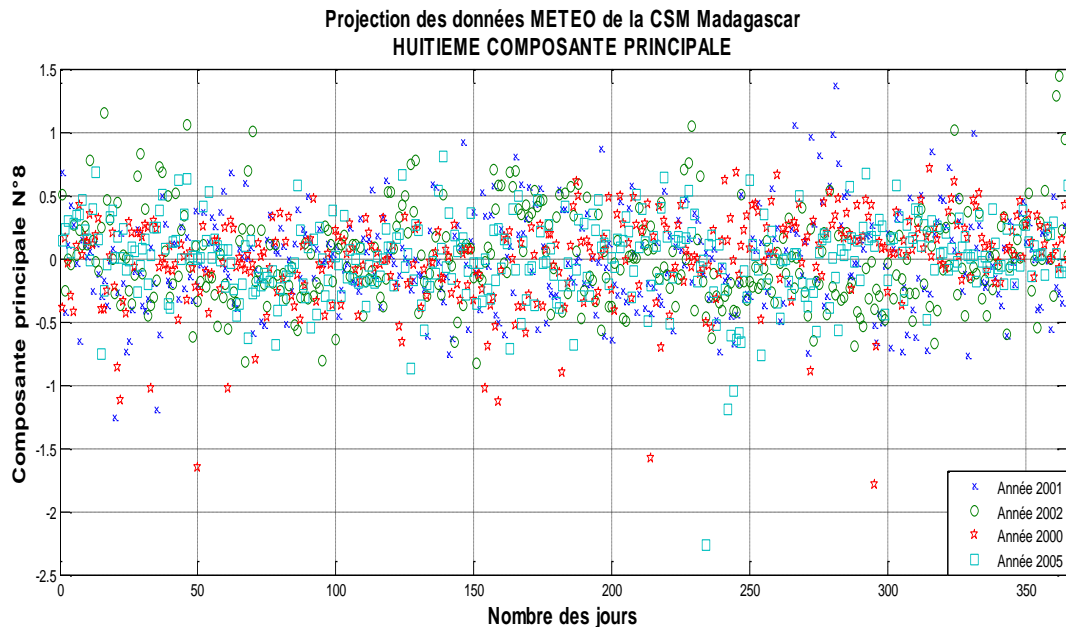


Fig. 4.5: Projection des données « composante principale faible »

La dernière courbe, figure 4.5 est celle obtenue avec la plus faible valeur propre, qui contient le moins d'information. Avec cette courbe, il est très difficile de voir l'évolution des variables pour chaque année.

En comparant les informations obtenues sur les trois figures : les deux premières composantes (figure 4.3 et figure 4.4) sont porteuses d'information contrairement à la dernière. Pour l'estimation des variables originelles, selon Harkat on ne doit conserver que les composantes porteuses d'information significative permettant d'expliquer les différentes variables [HARK03].

### 4.3 DETECTION ET LOCALISATION DE DEFAUTS PAR ACP

Les méthodes de détection et de localisation des défauts utilisant l'analyse en composantes principales ont été largement appliquées pour la surveillance des systèmes industriels complexes [MACG96], [MART97] et [HARK03].

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre le comportement sain et le comportement défaillant du processus modélisé par l'ACP. Les deux méthodes les plus utilisées pour la détection des défauts de mesures sont l'erreur quadratique de prédiction SPE (Square Prediction Error) et la statistique de Hotelling  $T^2$  [DUNI96] et [HARK01]. La première dépend de toutes les variables à surveiller tandis que la deuxième décrit le comportement des variables du processus qui sont corrélées avec les composantes principales. La méthode SPE utilise l'espace résiduel donc cumule les erreurs de modélisation présentes sur chaque résidu et la méthode de Hotelling est calculée à partir de l'espace principal. Depuis ces dix dernières années, plusieurs méthodes de localisation sont exploitées avec l'analyse en composantes principales comme la maximisation de la sensibilité des résidus, l'ACP partielle, et la reconstruction des variables par [DUNI96] et [GERT98]. La localisation des défauts utilisant la structure des résidus et la reconstruction des variables sont les plus développés et les plus utilisées. Harkat et al. [HARA03] ont montré que l'utilisation de la statistique  $T^2$  satisfait rarement la condition de la normalité de la distribution, et dans ce contexte l'utilisation de la statistique de Hotelling engendre une perte d'efficacité du test. La méthode SPE est très sensible aux erreurs de modélisation et on a proposé une nouvelle méthode de détection et localisation des défauts par l'approche utilisant la somme des carrés des dernières composantes principales, appelée indice de détection «  $Di$  » [HARA05], [RAMA12b]. Par la suite cette méthode est utilisée pour le diagnostic des défauts dans cette thèse.

#### 4.3.1 Détection de défauts par l'analyse des résidus

##### 4.3.1.1 Notion de résidu

En général, les données de mesure et les informations recueillies sur le système à surveiller ne permettent pas le diagnostic des défauts de ce processus. On utilise d'autres artifices pour détecter la présence ou non de défaut dans le système. On passe par la génération d'un indicateur de défaut, habituellement appelé « *résidu* ». Ce résidu est défini par une relation de consistance. Dans le cas de bon fonctionnement, le résidu est conçu afin d'être proche de zéro. Les dispersions des signaux autour de zéro sont les « restes » des résidus liés aux bruits [GRAT05]. Dans le cas de fonctionnement en défaut, le résidu s'éloigne de sa valeur moyenne nulle et permet d'indiquer la présence de défaut. Les indicateurs de défauts sont des

variables aléatoires, qui sont liées aux variations provenant des entrées, comme les défauts des actionneurs, des entrées inconnues, des perturbations, du processus lui-même comme les variations de paramètres, les défaillances de composants et des sorties comme les bruits de mesures, les défauts de capteur etc. En fait, les résidus sont des signaux découlant des transformations mathématiques très sensibles aux types de défauts recherchés. Sous forme vectorielle, le vecteur de mesure de dimension  $p$  est lié avec plusieurs vecteurs par une fonction  $f$  relative au comportement du processus dont :

- Le vecteur d'état  $X$ , de dimension  $n$ ,
- Le vecteur de commande  $U$  de dimension  $m$ ,
- Le vecteur des paramètres  $\theta$ , de dimension  $q$ ,
- Le vecteur des bruits  $V$ , de dimension  $b$ ,
- Le vecteur des défauts  $D$ , de dimension  $l$ .

On peut écrire le vecteur de mesure par la relation suivante,

$$Y = f(X, U, \theta, V, D) \quad (4-26)$$

Par définition le vecteur de résidu dépend de la méthode de génération d'indicateur de défaut et du système à étudier, mais avec une expression simple, on peut exprimer le résidu par :

$$R = Y - f(X, U, \theta, V, D) \quad (4-27)$$

Avec  $R \cong 0$  dans le cas de bon fonctionnement du système. Chaque composante du résidu est plus ou moins sensible à la présence de défauts. Dans cette thèse, les résidus sont obtenus en utilisant l'Analyse en Composantes Principales pour générer les indicateurs de défaut suite aux changements des paramètres du processus.

#### 4.3.1.2 Génération de résidu par l'approche ACP

La phase de détection de défauts dans le diagnostic de système est liée à la génération de résidus. Le but est de générer, à partir des données matricielles des simulations en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant du processus, des signaux révélateurs de la présence de défauts, souvent appelés résidus. L'analyse des signaux de résidu indique la présence ou non de défaillance sur le système. Ayant défini et obtenu le modèle ACP du système (cf. 3. 2. 1.1), nous examinons son utilisation pour la détection des défauts. Pour un vecteur quelconque de mesure  $x(k)$ , l'équation (4-14) s'écrit :

$$x(k) = x_p(k) + e(k) \quad (4-28)$$

Le vecteur  $x_p(k)$  représente le vecteur des estimations et  $e(k)$  représente le vecteur des erreurs d'estimation. Le vecteur des composantes principales  $t(k)$  correspondant à  $x(k)$  s'écrit :

$$t(k) = P^T x(k) \quad (4-29)$$



$$t(k) = [ t_p(k) \ t_e(k) ] \quad (4-30)$$

où :

$t_p \in \mathfrak{R}^{N \times l}$  et  $t_e \in \mathfrak{R}^{N \times (m-l)}$  respectivement le vecteur de «  $l$  » premières composantes principales et le vecteur de «  $m-l$  » composantes principales. Avec cette écriture il y a équivalence entre le vecteur de résidu  $e(k)$  et le vecteur des dernières composantes  $t_e(k)$ .

### 4.3.2 Application de l'ACP sur la MARB

La figure 4.6 suivante présente l'approche de simulation et la génération des résidus des données de la MARB par la méthode ACP.

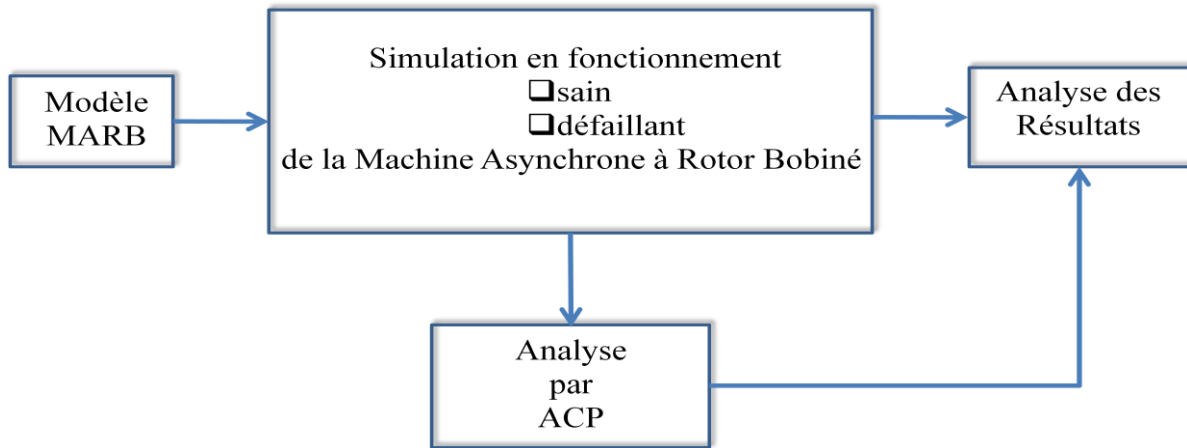


Fig. 4.6: Approche de diagnostic des défauts de la MARB par la méthode ACP

L'approche du diagnostic de défaut de la machine asynchrone à rotor bobiné par la méthode ACP se décompose en quatre étapes. La première étape consiste à la modélisation mathématique de la machine (cf. chap. 2) suivie par la simulation en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant en modifiant les paramètres d'entrée de la machine. La troisième étape est la génération d'indicateur de défaut par la méthode ACP pour la détection et localisation des défauts du système. La dernière étape est consacré à l'analyse des résultats de simulation avec ou sans méthode ACP.

#### 4.3.2.1 Défaut de la MARB à l'instant $t = 0s$

Les figures de simulation suivantes représentent la détection de défaut de la MARB par l'analyse des résidus de ses variables d'état. La méthode d'Analyse en Composantes Principales est utilisée pour générer l'indicateur de défaut ou résidu des variables d'état de la machine asynchrone à rotor bobiné. Les défauts de la machine sont introduits à l'instant initial. La matrice des données des neuf variables d'état de la machine, en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant, dont les courants au stator, les courants au rotor, la

vitesse angulaire, la position angulaire et le couple électromagnétique sont traitées par l'ACP pour générer les résidus. La figure 4.7 et la figure 4.8 présentent respectivement le résidu du courant de la phase « A » du stator et le résidu du courant de la phase « a » du rotor. On constate que le résidu du fonctionnement sain de la machine est égal à zéro. Et en fonctionnement défaillant, les résidus des différentes valeurs des paramètres sont importants avec des amplitudes largement supérieures à zéro. Plus les défauts augmentent plus les amplitudes des résidus s'éloignent de la valeur nulle. Avec la méthode de détection de défaut par l'analyse en composante principale, les courants dans les enroulements statoriques et les courants dans les enroulements rotoriques sont sensibles aux variations des paramètres de la machine.

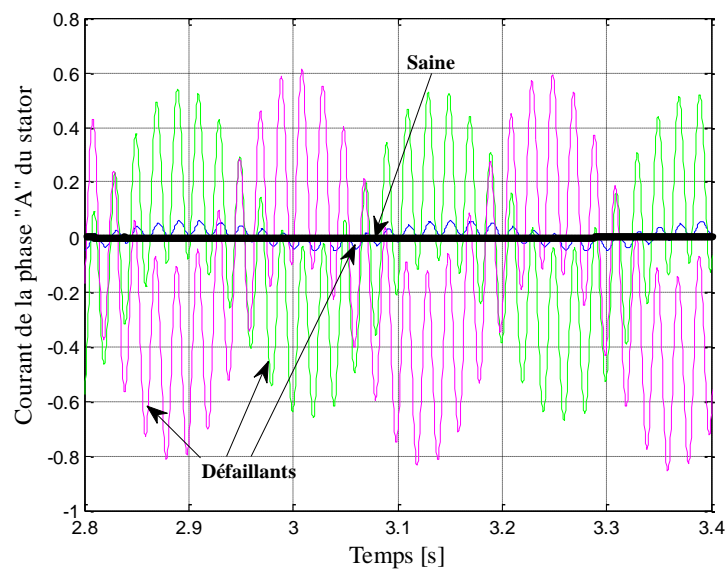


Fig. 4.7: Variation temporelle du résidu du courant de la « phase A » du stator

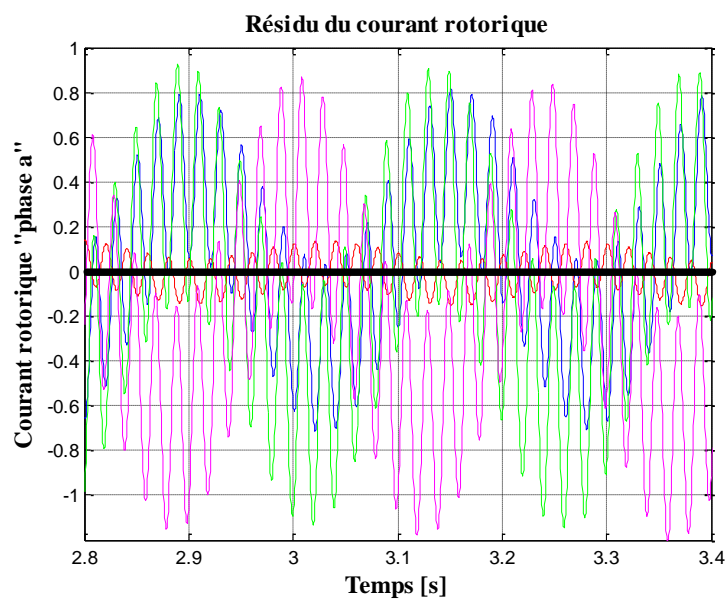


Fig. 4. 8: Variation temporelle du résidu du courant de la « phase a » du rotor

Ces deux figures (fig. 4.7 et fig.4. 8) montrent bien l'efficacité de la génération de résidu par la méthode ACP pour détecter et analyser la présence ou non de défaillance sur les deux courants de la machine asynchrone à rotor bobiné.

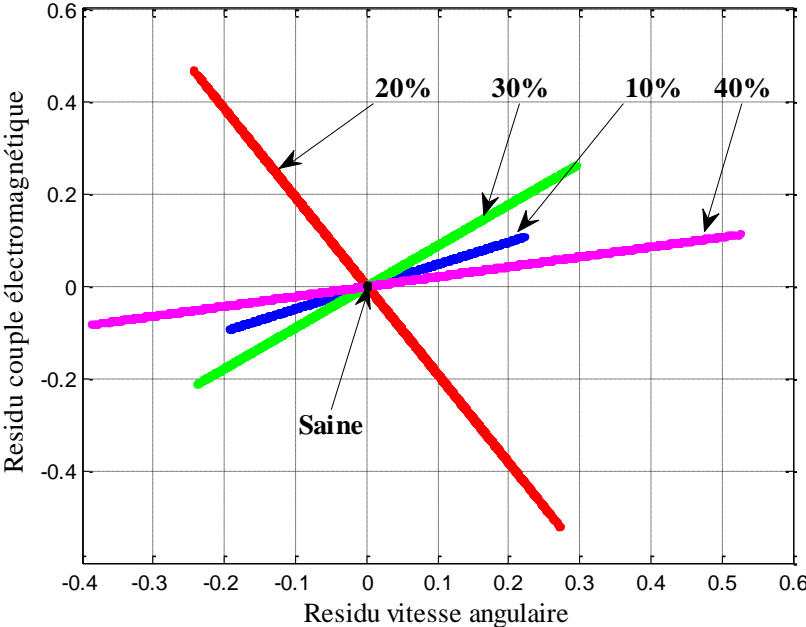


Fig. 4. 9: Résidu du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation

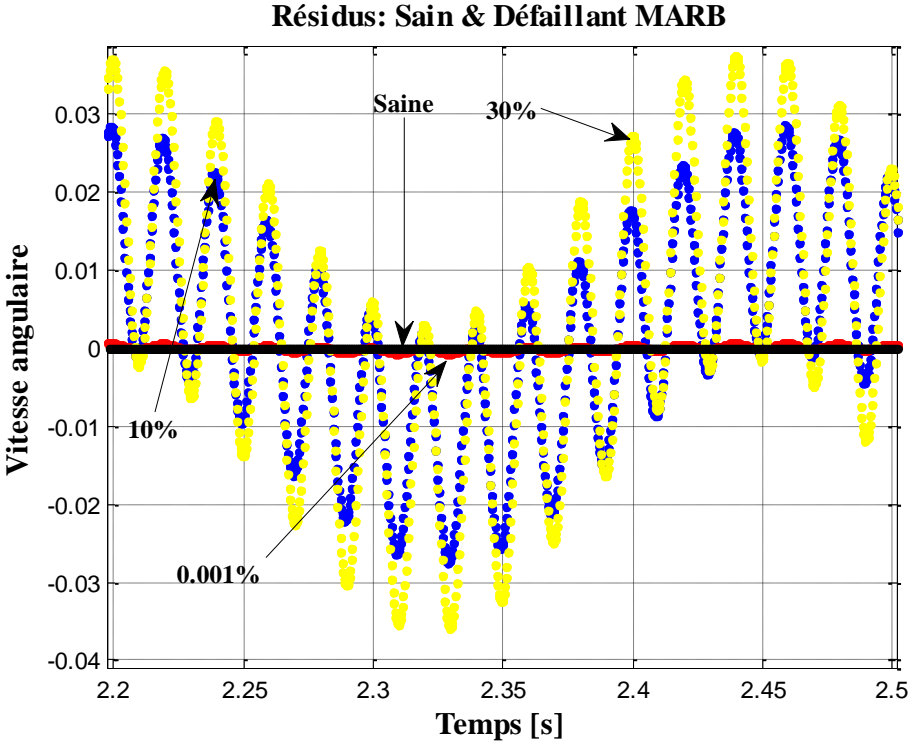


Fig. 4. 10: Variation temporelle de résidu de la vitesse angulaire

Les deux figures (fig. 4. 9 et fig. 4.10) représentent respectivement le couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire, la variation temporelle du résidu de la vitesse angulaire. Le résidu du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation pour le fonctionnement sain de la machine est un point placé sur les origines des deux coordonnées. En outre, on peut noter plusieurs lignes droites qui correspondent respectivement aux défauts de 10%, 20%, 30%, 40% d'augmentation de la valeur des paramètres de la résistance par rapport à la valeur normale. Ce comportement des résidus du couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire est dû à la caractéristique proportionnelle des défauts considérés. Pour les figures représentant la variation temporelle de la vitesse angulaire, on constate que même avec une petite variation de la résistance de l'enroulement statorique (0,001%), on peut toujours détecter le défaut de la MARB par l'analyse du résidu de ses variables d'état avec la méthode ACP [RAMA12c].

#### 4.3.2.2 Défaut de la MARB à l'instant $t = 2s$

En général, les défaillances d'un système dynamique se produisent en cours de fonctionnement [MINA07]. Par la suite, pour étudier l'effet d'un changement de paramètre de la machine en cours de fonctionnement, la défaillance de la machine est introduite à l'instant  $t=2s$ . Par conséquent la MARB fonctionne selon deux comportements, de zéro à 2 secondes, l'actionneur est en fonctionnement sain et au delà de ce temps la machine est en fonctionnement défaillant. La variation de la résistance de l'enroulement statorique considérée, est une augmentation de 0,001%, 10% et 30% par rapport à la valeur normale. Les figures suivantes illustrent les analyses des résidus des défauts sur les variables d'état de la machine. Les figures 4.11 à 4.14 représentent respectivement le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation, la variation temporelle du couple électromagnétique, le zoom du résidu de la variation temporelle du courant de la phase « a » du rotor et le résidu de la variation temporelle du courant statorique. On constate que la méthode ACP détecte le début du défaut de la MARB à l'instant  $t=2s$ . Le résidu de fonctionnement sain, est toujours un point placé sur l'axe des coordonnées égal à zéro, pour le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation [RAMA12b, c]. Les résidus du courant statorique et rotorique montrent un changement des allures en présence de défauts, le fonctionnement sain est une droite d'ordonnée zéro et parallèle à l'axe du temps.

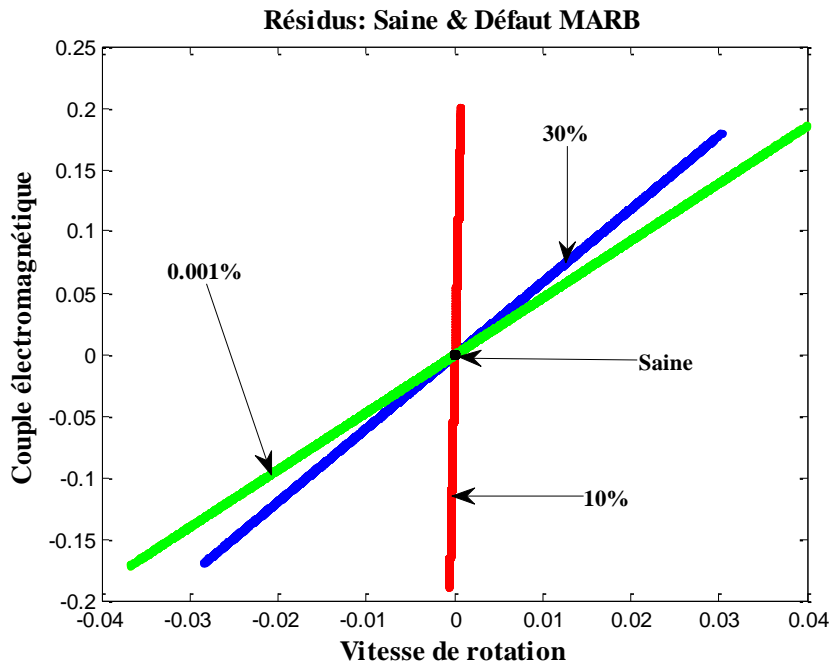


Fig. 4.11: Résidu du couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation

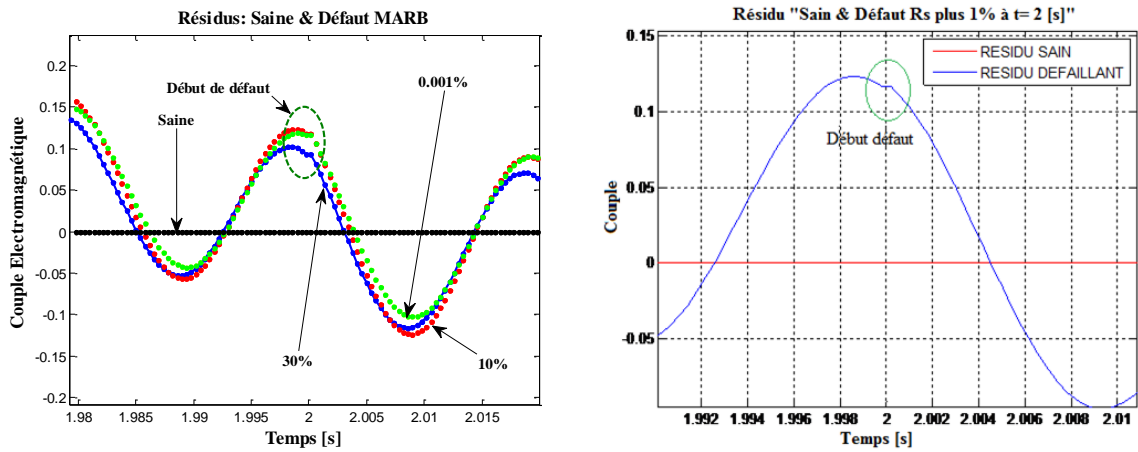


Fig. 4.12: Variation temporelle du résidu du couple électromagnétique

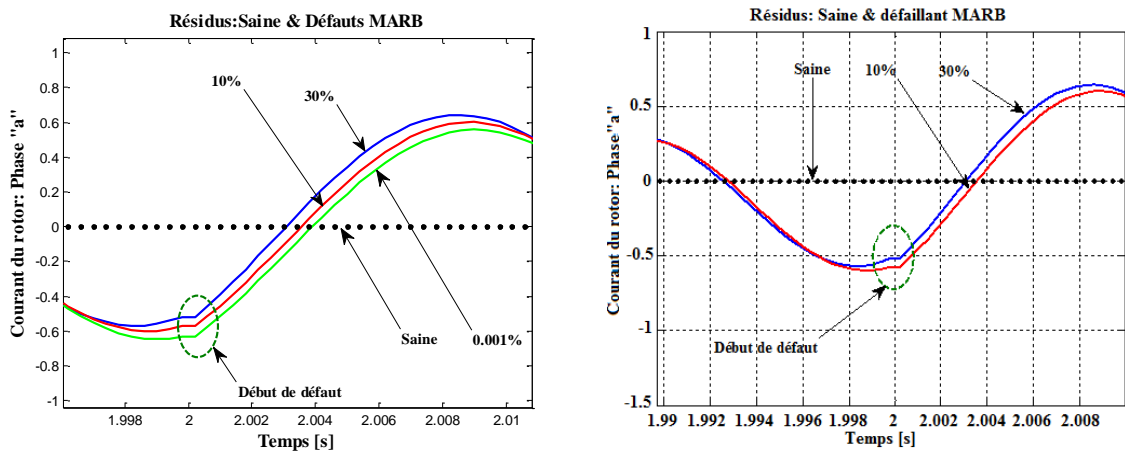


Fig. 4.13: Variation temporelle du résidu du courant rotor en zoom

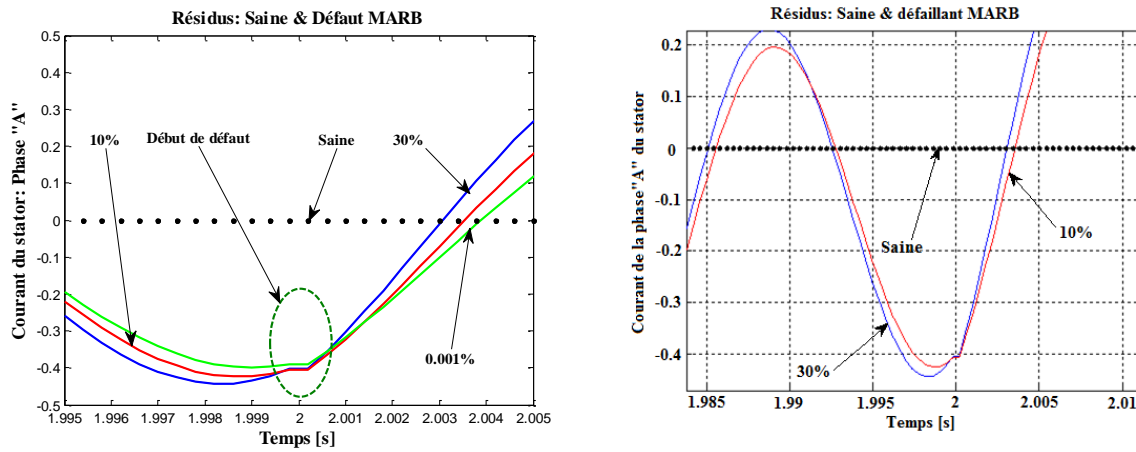


Fig. 4. 14: Variation temporelle de résidu du courant de stator en zoom

#### 4.3.2.3 Calcul de l'indice de détection $D_i$

L'indice de détection des défauts  $D_i$  est basé sur les sommes successives des carrés des dernières composantes principales [HARK02], [HARK05], [LUI06], [BORG09], [BENA10] et [RAMA12b] est définie comme suit :

$$D_i(k) = \sum_{j=m-i+1}^m t_{ej}^2(k) \quad (4-29)$$

avec  $i = 1, 2, \dots, (m-l)$

A un instant  $k$  donné, le système est en fonctionnement anormal si l'indice de détection  $D_i$  est supérieur à un seuil de détection noté  $\tau_{i,\alpha}^2$ . La probabilité de fausse détection  $\alpha$  est conforme à la loi de  $Khi-2$  avec «  $m$  » degré de liberté [BENA10] et [RAMA12b]. On peut remarquer qu'il y a beaucoup de similitude entre l'indice de détection calculé par la méthode statistique  $SPE$  et l'indice de détection  $D_i$ . En effet, l'indice  $D_i$  correspond à l'indice  $SPE$  calculé par le modèle ACP à partir de  $(m-l)$  composantes principales. Ainsi ce seuil de détection peut se calculer avec un raisonnement similaire à celui exposé dans [HARK02], [HARK05] et [BORG09].

Le processus est considéré en défaut à l'instant  $k$  si :

$$D_i(k) > \tau_{i,\alpha}^2 \quad (4-30)$$

On peut calculer le seuil de détection  $\tau_{i,\alpha}^2$  par :

$$\tau_{i,\alpha}^2 = \theta_1 \left[ \frac{C_{i,\alpha}}{\theta_1} \sqrt{2\theta_2 H_0^2 + 1} + \frac{\theta_2 H_0}{\theta_1^2} (H_0 - 1) \right]^{1/H_0} \quad (4-31)$$

avec :

$$\theta_i = \sum_{j=m+1}^i \lambda_j^i \quad (4-32)$$

$$H_0 = \frac{\theta_1^2}{\theta_2} \quad (4-33)$$

où  $i$  varie de 1 à 3 et  $\lambda_j$  est la «  $j^{\text{ème}}$  » valeur propre de la matrice de covariance.

Pour réduire les fausses alarmes et améliorer la qualité de la détection des défauts, le filtre EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*) est appliqué à un instant  $k$ , alors le «  $j$  » nième vecteur filtré des dernières composantes principales s'écrit :

$$t_{ej}(k) = (1-\gamma)t_{ej}(k-1) + \gamma t_{ej}(k) \quad (4-34)$$

où :

$\gamma$  est le facteur d'oubli, ( $0 < \gamma < 1$ ) avec la condition initiale  $t_{ej}(0) = 0$

$$\gamma = 1 - \exp(-1/\Delta_t) \quad (4-35)$$

avec  $\Delta_t$ , le pas de temps d'échantillonnage.

On peut calculer aussi par :

$$\gamma = \beta/I \quad (4-36)$$

où  $\beta$  est une matrice diagonale dont les éléments diagonaux sont les facteurs d'oubli pour les dernières composantes principales,  $I$  est une matrice identité. On peut ajuster  $\beta$  en fonction du type de défaut à détecter.  $\beta$  est proche de la matrice identité si on veut détecter les changements lents de fonctionnement du système tandis que si  $\beta$  est proche de zéro on détectera plus facilement les changements brusques de fonctionnement [HARK05].

Alors l'indice de détection filtré peut s'écrit :

$$D_{if}(k) = \sum_{j=m-i+1}^m t_{ej}^2(k) \quad (4-37)$$

avec  $i = 1, 2, \dots, (m-1)$

Le seuil filtré de détection des défauts est donné par [MINA07], [BORG09] et [RAMA12a] :

$$\tau_{if,\alpha}^2 = \frac{\gamma}{2-\gamma} \tau_{i,\alpha}^2 \quad (4-38)$$

A un instant  $k$  donné, les systèmes sont en fonctionnement anormal si l'indice de détection de défauts filtré est supérieur au seuil de détection filtré c'est-à-dire :

$$D_{if}(k) > \tau_{if,\alpha}^2 \quad (4-39)$$

Il convient de noter que de nombreux travaux de recherche utilisent le seuil de détection de défauts  $D_i$  pour les défauts capteurs mais dans notre cas on l'a utilisé pour les défauts

systèmes. En utilisant la méthode de détection de défaut évoquée ci-dessus, les deux figures 4.15 et figure 4.16 présentent deux allures de la MARB traitées avec l'ACP. Le défaut considéré est l'augmentation de 10% de la valeur de la résistance statorique, on voit sur la figure 4.15 qu'avec la dernière composante principale, le résidu du défaut de 10% est instable, ceci est du aux fausses alarmes et aux bruits de mesure ceci même après l'introduction de défaut à l'instant  $t=2s$ . On améliore la détection en prenant compte les deux dernières composantes principales. En effet, la figure 4.16, en fonctionnement sain, montre que les courbes des résidus sont situées largement au dessous du seuil de détection, ce qui n'est pas le cas avec la figure 4.15. A partir de l'échantillon de mesure 5000 où les défauts sont introduits, les résidus des variables à surveiller dépassent le seuil de détection. Les fausses alarmes et l'erreur de détection sont atténuées. Les deux figures montrent l'efficacité de la détection de défauts par ACP. Mais cela nécessite un bon choix du nombre des composantes principales à retenir afin que l'information contenue dans les résidus soit pertinente.

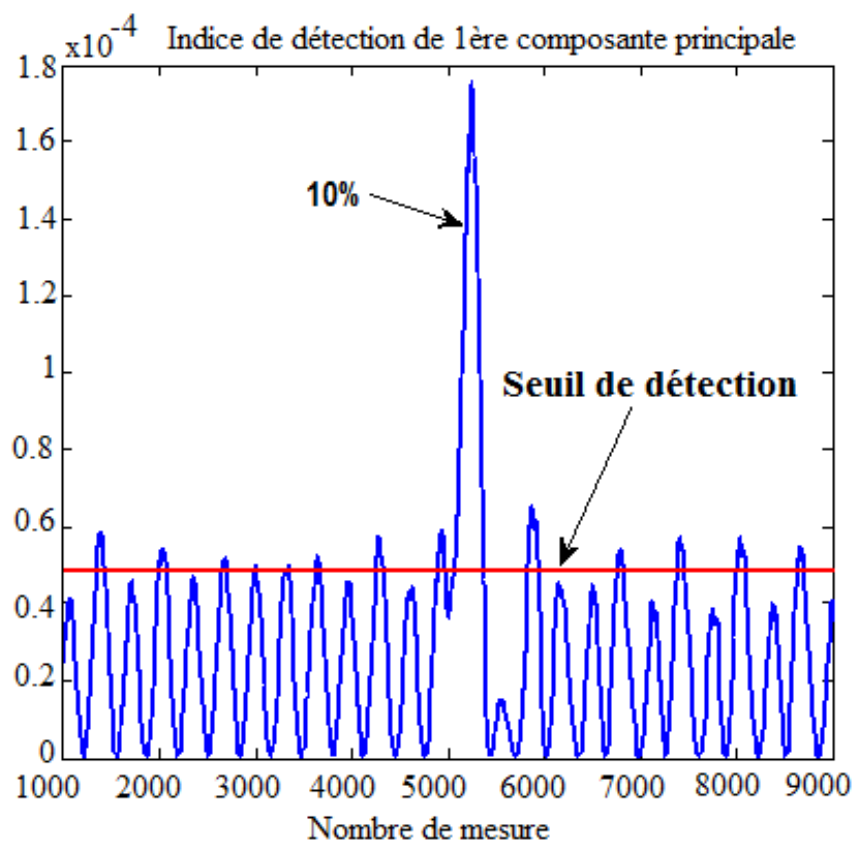


Fig. 4.15: Indice de détection d'une composante principale en fonction du nombre de mesure, défaut de 10%



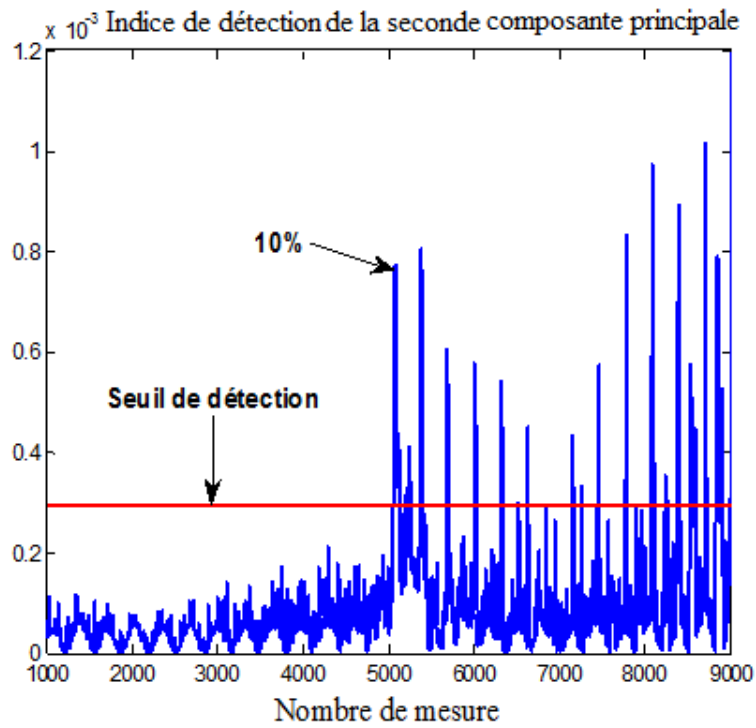


Fig. 4.16: Indice de détection de la seconde composante principale en fonction du nombre de mesures, défaut de 10%

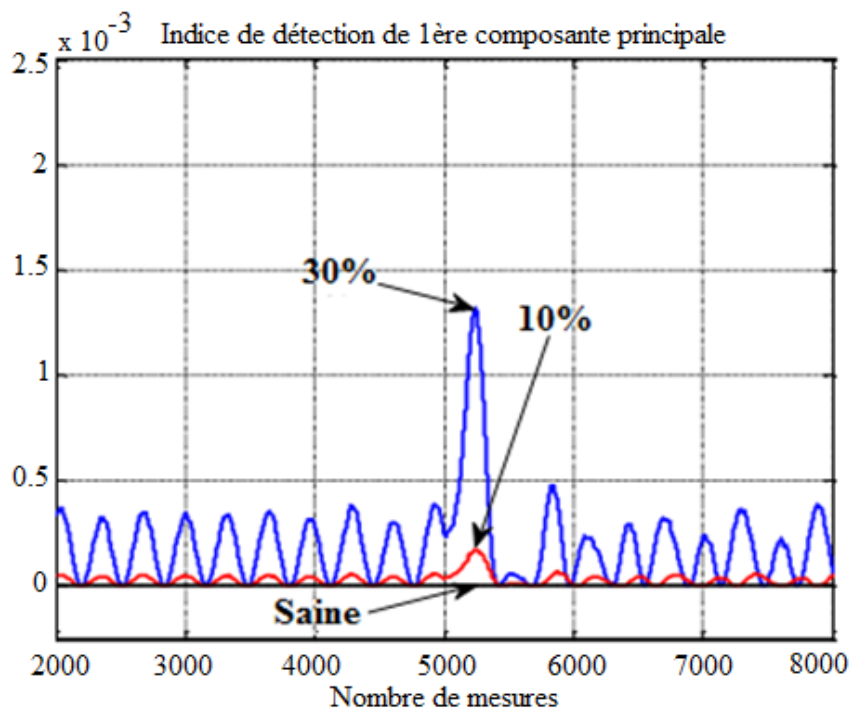


Fig. 4.17: Indice de détection  $D_i$  avec la 1ère composante principale en fonction du nombre de mesures, défaut de 10% et 30%

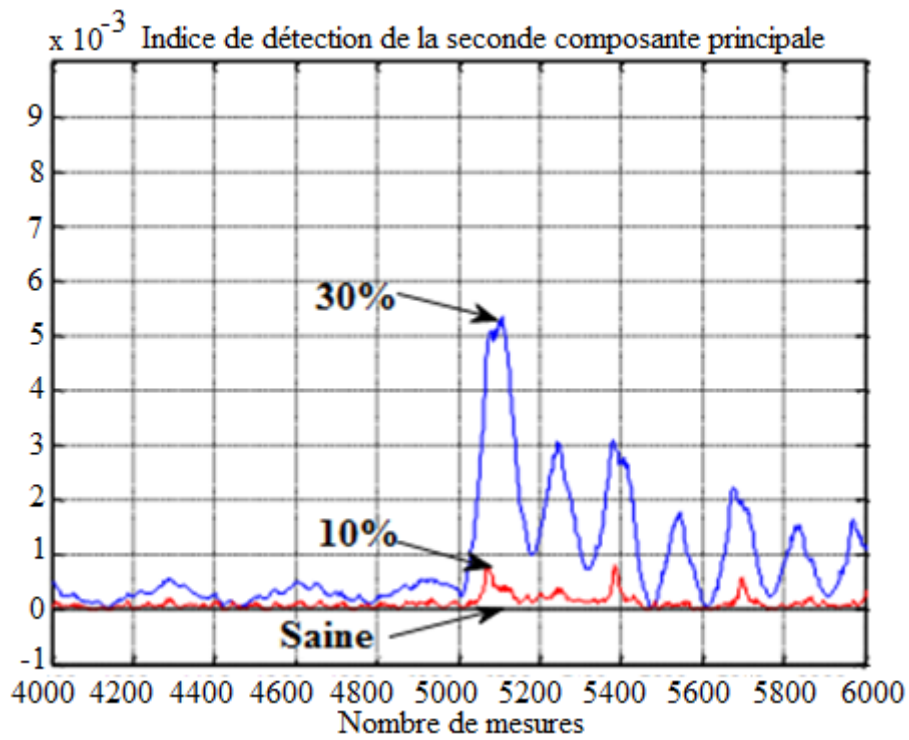


Fig. 4.18: Indice de détection  $D_i$  avec la seconde composante principale en fonction du nombre de mesures de la MARB

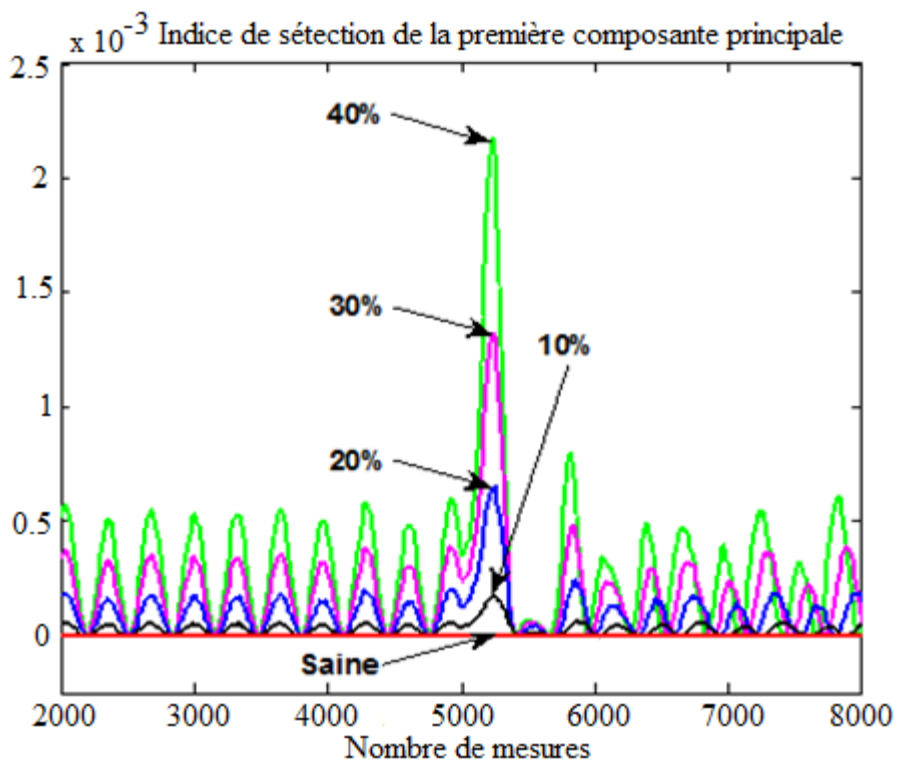


Fig. 4.19: Indice de détection  $D_i$  de la première composante principale en fonction du nombre de mesures de la MARB

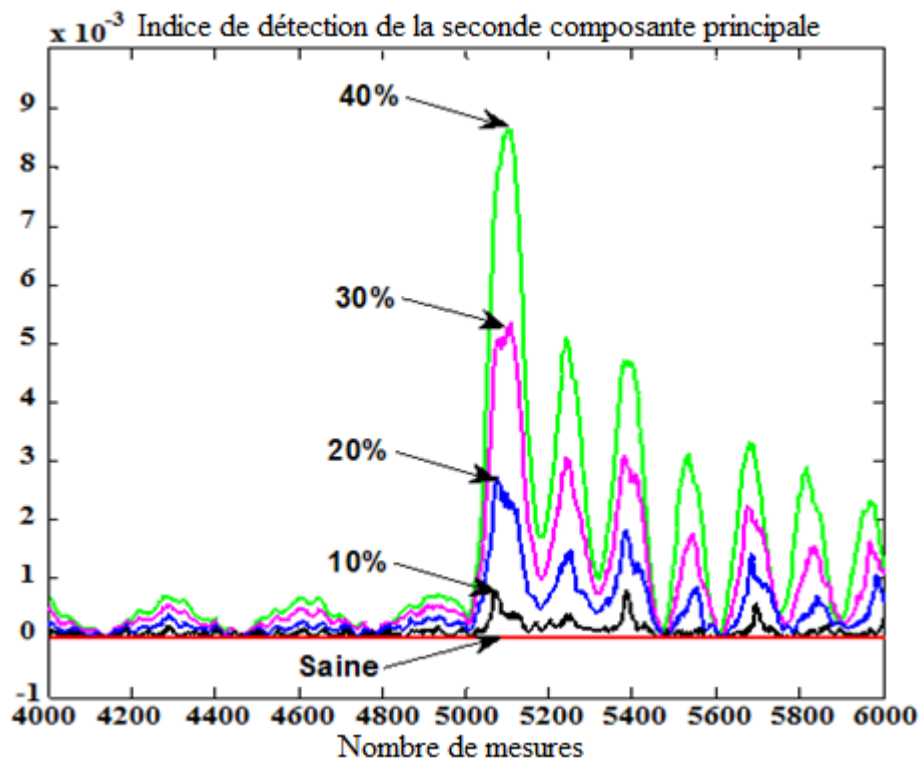


Fig. 4.20: Indice de détection  $D_i$  avec deux composantes principales en fonction du nombre de mesures de la MARB

Les quatre figures (figure 4.17 à la figure 4.20) montrent d'autres simulations avec des amplitudes différentes de défauts. Toutes les représentations montrent clairement les différences entre le fonctionnement sain et le fonctionnement défaillant de la MARB [RAMA12b], [BORG09] et [BENA10].

Dans le cas sain, les résidus sont égaux à zéro, une droite en couleur rouge placée sur l'axe des abscisses (figure 4.19 et figure 4.20). Les faibles amplitudes de la figure 4.17 et de la figure 4.18, de l'instant  $t = 0s$  à l'instant  $t = 2s$  sont dus aux bruits de mesures. Lorsque des défauts apparaissent, les représentations des résidus des variables d'état de la machine ont des amplitudes très largement supérieures à zéro. On voit un pic des résidus au moment de l'apparition des défauts à l'instant  $t = 2s$ .

La figure 4.21 et la figure 4.22 montrent l'utilisation de l'indice de détection  $D_i$  et l'amélioration de la détection de défauts par le filtre EWMA (Exponentially Weighted Moving Average).

La figure 4.21 est obtenue avec la première composante principale et la figure 4.22 avec deux composantes principales. On constate qu'en présence de défaut sur le système, l'utilisation de l'indice de détection non filtré  $D_i$  présente beaucoup plus des fausses alarmes, ce qui induit des erreurs de détection de défauts [RAMA11b].

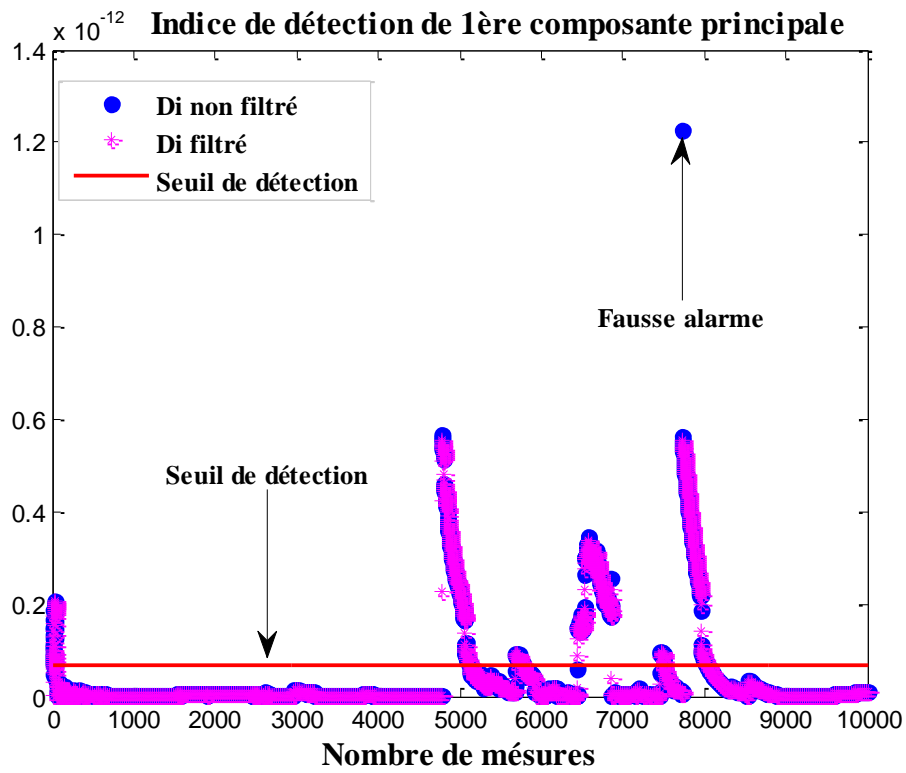


Fig. 4.21: Indice de détection de défaut filtré et non filtré de 1<sup>ère</sup> composante principale de la MARB

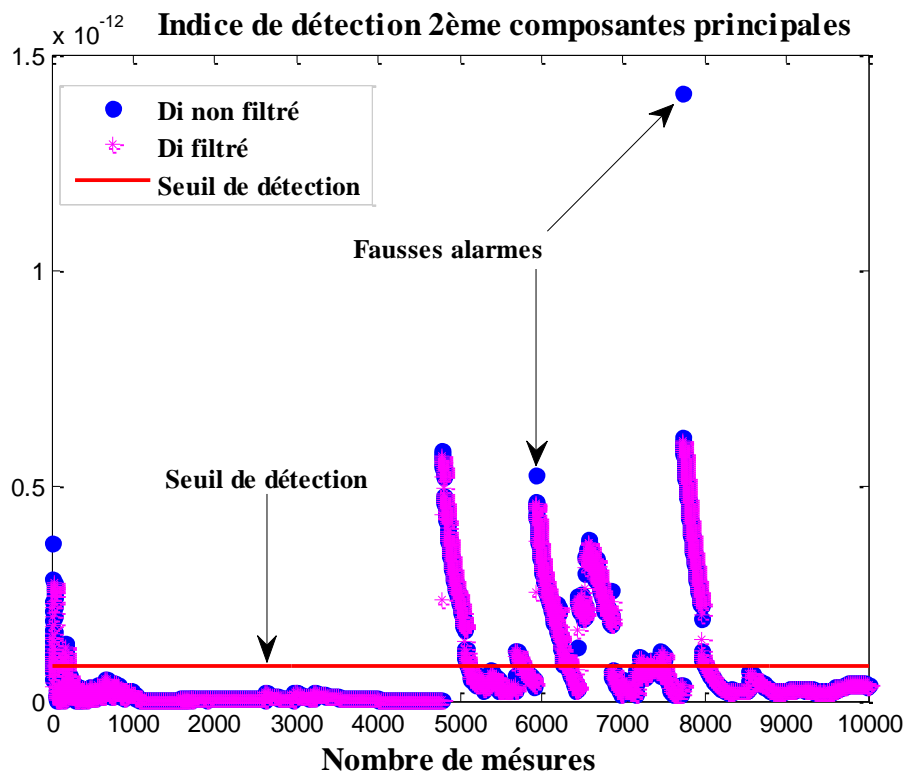


Fig. 4.22: Indice de détection de défaut filtré et non filtré de 1<sup>ère</sup> composante principale de la MARB

Considérons l'exemple de la figure 4.20, calculé à partir d'un modèle ACP, en absence de défaut, les signaux de l'indice de détection non filtré et l'indice de détection filtré sont en deçà du seuil de détection et en présence de défaut avec une composante principale retenue, le système est moins sensible à la fausse alarme [HARK02].

Avec ces deux exemples on constate que l'utilisation de l'indice de détection filtré  $D_{if}$  ou non filtré  $D_i$  permet de détecter la présence de défaut ou non dans le système, et on arrive à améliorer la détection de défaut avec l'utilisation du filtre EWMA [RAGO09].

### 4.3.3 Localisation de défauts

Lorsqu'un défaut est détecté, il est nécessaire de localiser ou identifier la où les variables qui sont en cause. Dans l'ACP, on trouve plusieurs méthodes pour la localisation des défauts :

- *L'approche par structuration des résidus,*
- *L'approche par ACP partielles,*
- *L'approche par calcul des contributions des variables à l'indicateur de détection.*

Mais Harkat et al. ont montré l'inconvénient des méthodes citées ci-dessus. Dans la suite, la localisation des défauts des variables d'états de la MARB est basée sur la reconstruction des variables en les combinant avec l'indice de détection filtré  $D_{if}$ , [HARK05] et [RAMA12b].

#### 4.3.3.1 Principe de la reconstruction des variables

A partir du modèle ACP obtenu, le principe de la reconstruction des variables est basé sur l'estimation du vecteur  $x(k)$  à un instant donné en utilisant toutes les autres variables au même instant, [DUNI96], [HARK05] et [LUI06].

Pour reconstruire la  $j^{\text{ème}}$  variable du vecteur  $x(k)$  à un instant  $k$  donné. Si le vecteur  $x(k)$  :

$$x(k) = [x_1 \quad x_2 \quad x_{j-1} \quad z_j \quad x_{j+1} \quad x_m]^T \quad (4-40)$$

on peut estimer  $x_p^j$  de la  $j^{\text{ème}}$  variable calculée à partir du modèle ACP déjà obtenu avec  $x(k)$ .

On remplace la  $j^{\text{ème}}$  variable  $x_j$  par  $x_p^j$  dans le vecteur des mesures  $x(k)$ , et on ré-estime cette  $j^{\text{ème}}$  variable. Cette opération est répétée jusqu'à la convergence vers la valeur  $z_j$ .

Chaque itération à travers le modèle ACP est une projection orthogonale dans le sous espace des composantes principales.

Après plusieurs itérations, l'expression de  $z_j$  est donnée par :

$$z_j = \frac{[c'_{-j} \ 0 \ c'_{+j}]}{1-c_{jj}} x(k) \quad (4-41)$$

avec

$$c_{jj} < 1, C_{pj} = [c_1 \cdots c_m] \text{ et } c'_j = [c'_{-j} \ c'_{jj} \ c'_{+j}]$$

Le vecteur  $c_j$  est la  $j^{\text{ème}}$  colonne de  $C_{pj}$  et les indices  $+j$  et  $-j$  désignent, respectivement, les vecteurs formés par les  $(j-1)$  premiers et les  $(m-j)$  derniers éléments du vecteur  $c_j$ .

La condition nécessaire de reconstruction d'une variable par le modèle est  $c_{jj} \neq 1$ .

Si  $c_{jj}=1$ , c'est-à-dire  $z_j=x_j$  alors la  $j^{\text{ème}}$  variable n'est pas corrélée avec les autres et elle ne peut donc pas être reconstruite à partir des autres variables.

#### 4.3.3.2 Localisation de défauts par la méthode combinée

La localisation des variables incriminées par la méthode combinée est basée sur la combinaison de deux méthodes :

- la reconstruction des variables par ACP,
- l'indice de détection  $D_i$ .

La méthode consiste à éliminer l'influence du défaut sur  $D_i$ , lorsque la variable en défaut est reconstruite. Pour localiser un défaut sur l'indicateur, les directions des défauts projetées dans l'espace résiduel ne doivent pas être colinéaires [HARK05].

On pose par  $D_i^j$ , l'indicateur de défaut après la reconstruction de la  $j^{\text{ème}}$  variable. L'indice de localisation non filtré est donné par l'équation :

$$L_i^j = \frac{D_i^j}{\tau_{i,\alpha}^2} \quad (4-42)$$

La figure 4.23 suivante présente la localisation des défauts des variables d'état de la machine pour un indice de localisation non filtré.

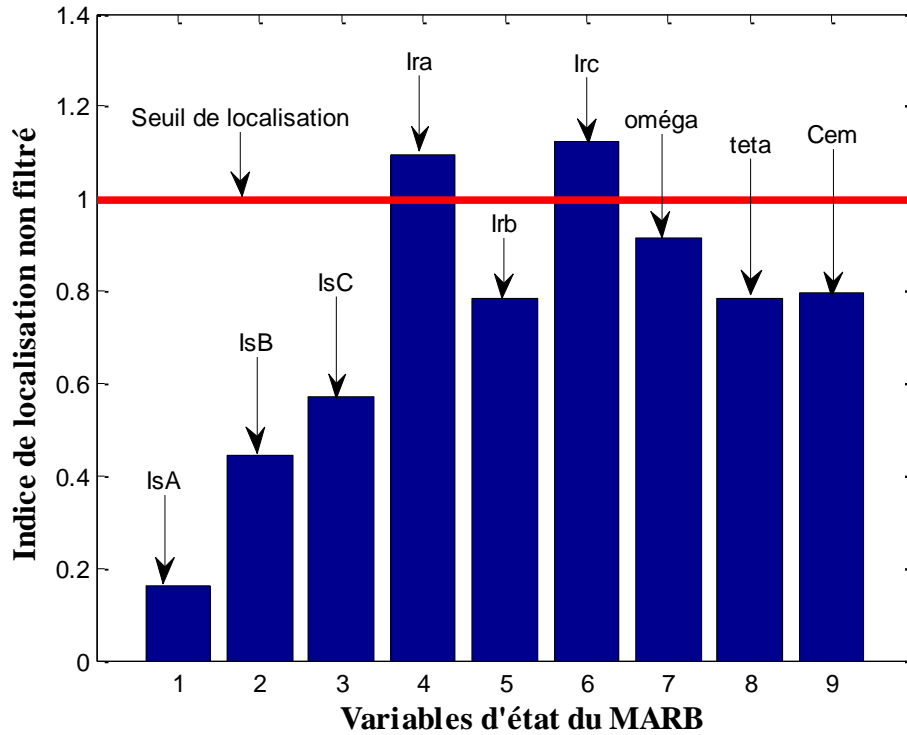


Fig. 4.23: Localisation des défauts des variables d'état de la machine avec un indice de localisation non filtré

On constate que les deux variables du courant rotorique sont considérées en défaut car ceux sont les seuls histogrammes qui dépassent le seuil de localisation. Les sept autres variables sont en dessous du seuil de localisation, par conséquent considérées en bon fonctionnement.

Harkat a utilisé le filtre EWMA pour la détection de défaut des capteurs et Jin Wang a utilisé également ce filtre pour le filtre de Kalman, pour réduire les fausses alarmes de localisation et pour améliorer la qualité de l'indicateur de localisation [HARK05] et [WANG03].

L'indice de détection filtré de la  $j^{\text{ème}}$  variable est noté par  $D_{if}^j$ . On peut exprimer en fonction de l'indice de détection filtré et le seuil de détection filtré la formule de l'indice de localisation de défaut filtré, qui est donné par :

$$L_{if}^j = \frac{D_{if}^j}{\tau_{if,\alpha}^2} \quad (4-43)$$

Pour la localisation de défauts multiples, on peut utiliser aussi cette méthode en reconstruisant simultanément les variables supposées en défaut [RAGO09].

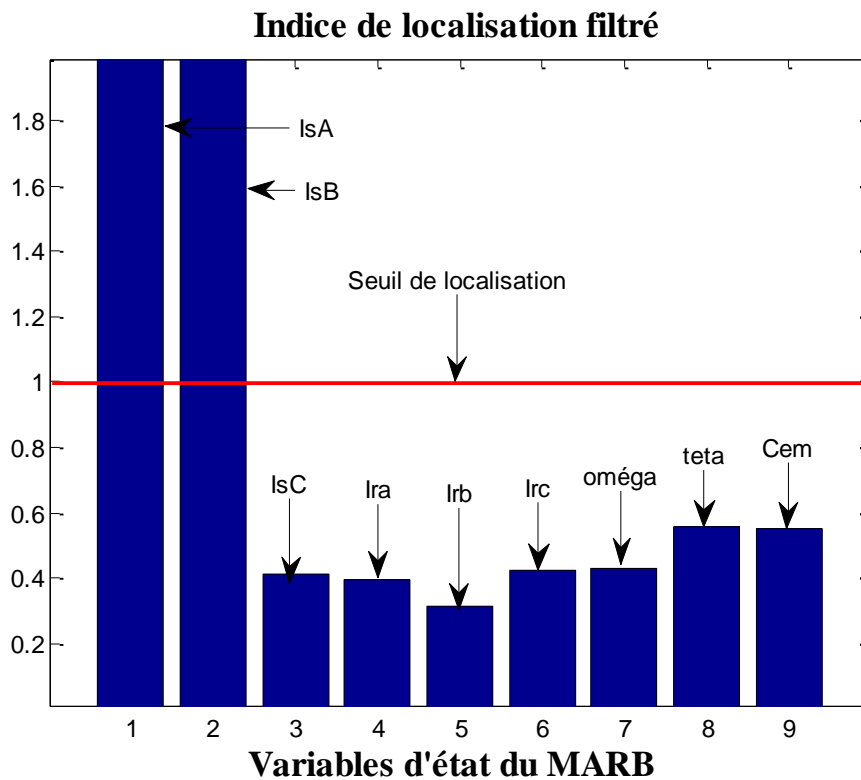


Fig. 4.24: Localisation des défauts des variables d'état de la machine avec un indice de localisation non filtré

La figure 4.24 présente la localisation de défaut avec un indice de localisation filtré. La figure montre l'effet du filtre EWMA pour la localisation de défauts de la MARB. La qualité de localisation permet de constater que les deux variables du courant du stator sont en défaut [RAMA12c].

Pour la suite de la recherche, on peut appliquer la méthode ACP pour la détection de défauts d'un système complexe composé de plusieurs composantes interdépendantes tel que l'éolien utilisant la Génératrice Asynchrone Doublement Alimentée (GADA).

#### 4.3.4 Application de l'ACP sur la GADA

Les processus complexes considérés sont l'ensemble d'une éolienne avec ses composants électroniques de réglage. On peut utiliser aussi la méthode ACP pour générer les résidus indicateurs de défauts pour ces systèmes. L'approche du diagnostic de la GADA utilisée est présentée par la figure 4.25. La procédure de détection de défauts de la GADA est composée de cinq blocs.



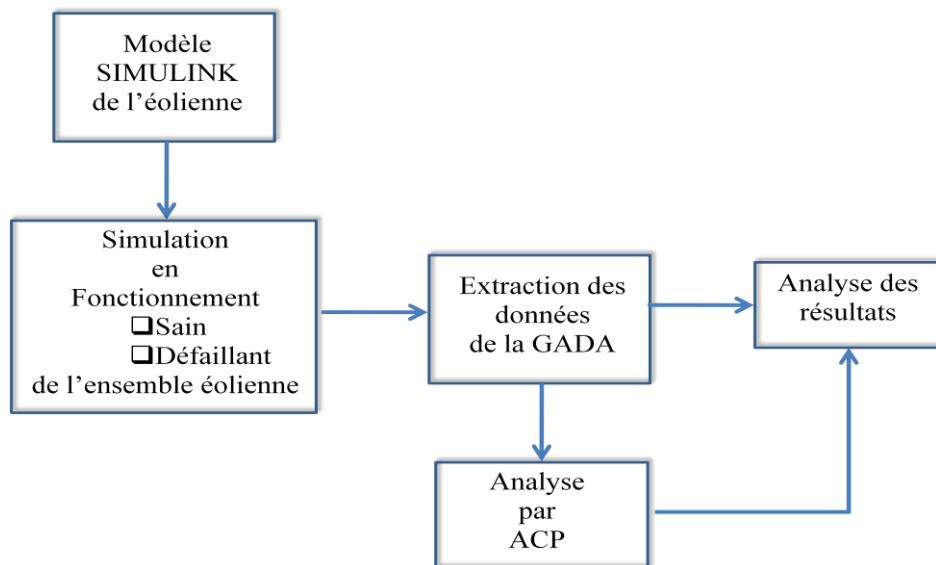


Fig. 4.25: Approche du diagnostic de la GADA par la méthode ACP

### 4.3.5 Résultats de simulation de la GADA

Les figures suivantes représentent les résidus des variables à surveiller de la génératrice asynchrone doublement alimentée. Elles montrent l'efficacité de l'ACP pour la détection de défauts sur la génératrice asynchrone doublement alimentée.

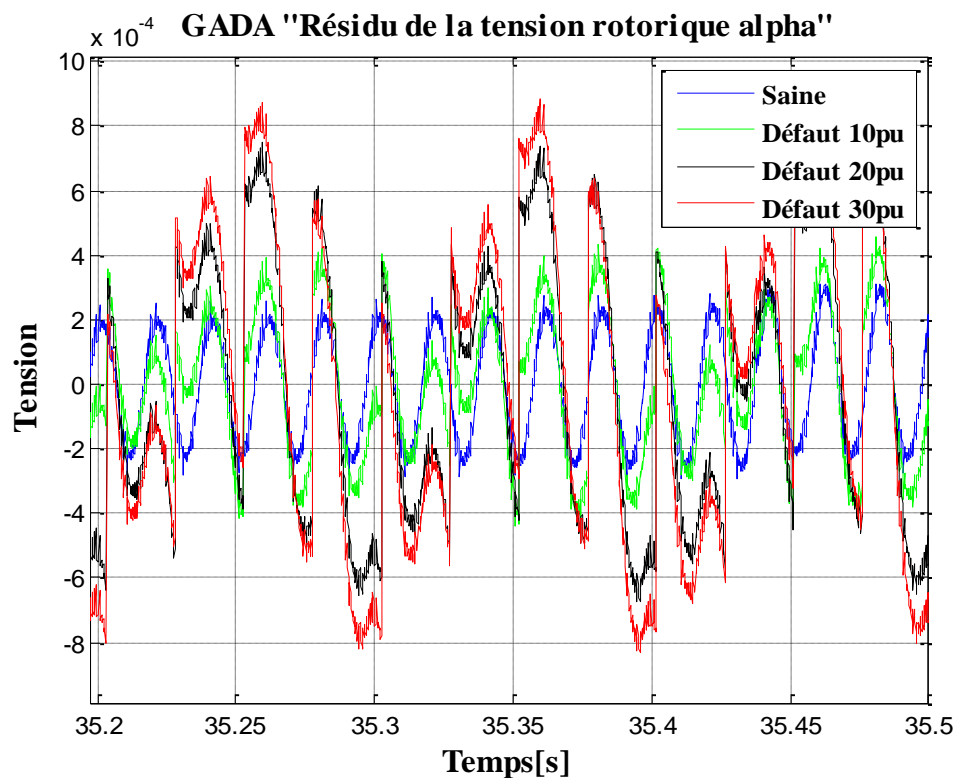


Fig. 4.26: Evolution temporelle des résidus de la tension rotorique alpha

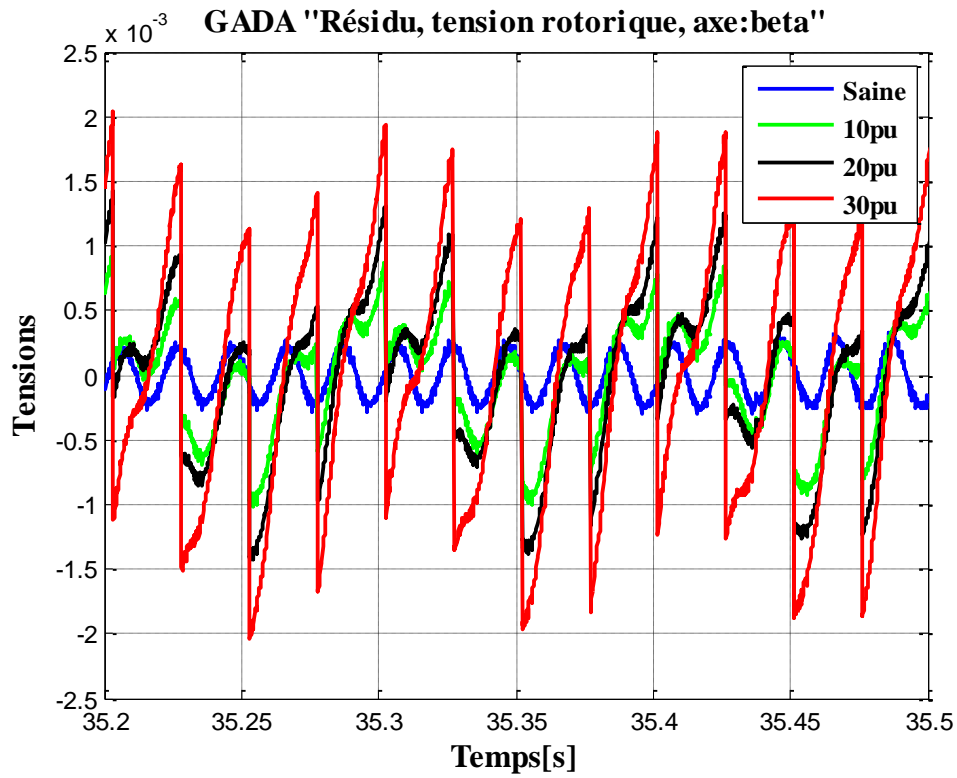
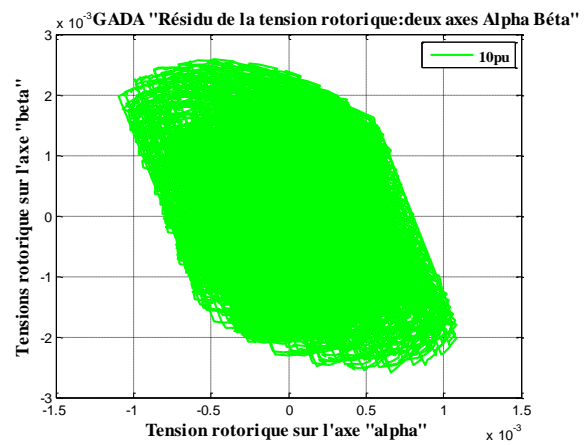
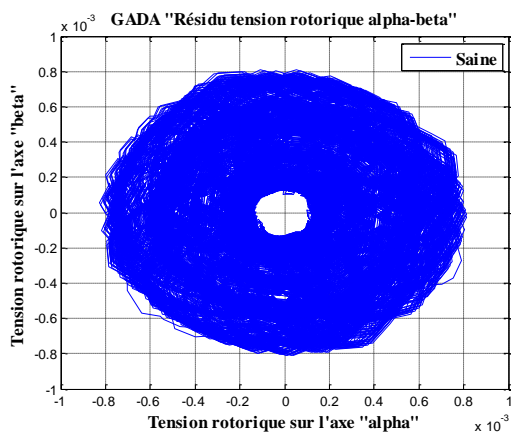
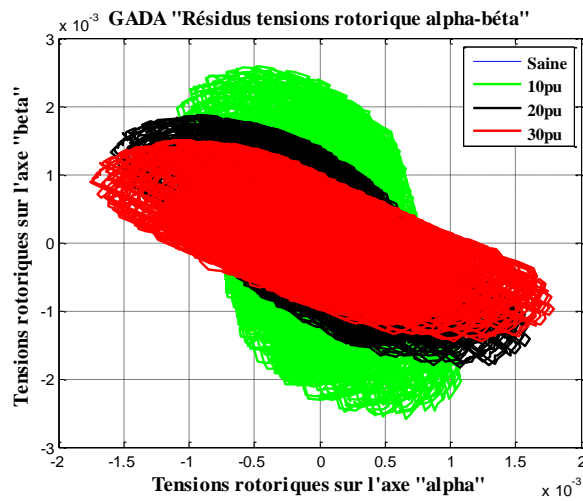


Fig. 4.27: Evolution temporelle de résidu de la tension rotorique sur l'axe « bêta »



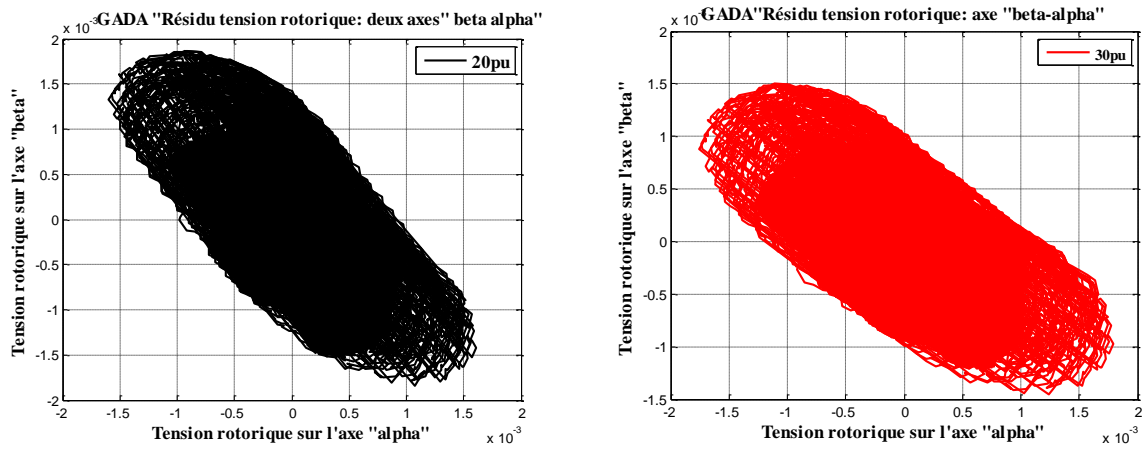


Fig. 4.28: Evolution du résidu de la tension rotorique sur les deux axes « alpha-béta »

Les figures 4.26 à 4.28 présentent les variations des résidus des tensions rotoriques sur l'axe alpha et l'axe bêta. Pour les deux premières figures, qui représentent la variation temporelle des résidus de la tension rotorique, on constate que les amplitudes des résidus des défauts varient proportionnellement avec les valeurs des défauts sur l'enroulement. Pour la figure 4.28, représentant les résidus de défauts sur l'axe alpha bêta, on constate qu'en fonctionnement sain, le résidu est sous forme de couronne. Quand le défaut apparaît, la partie creuse de la couronne est pleine et sa dimension diminue plus les valeurs de la résistance des enroulements augmentent.

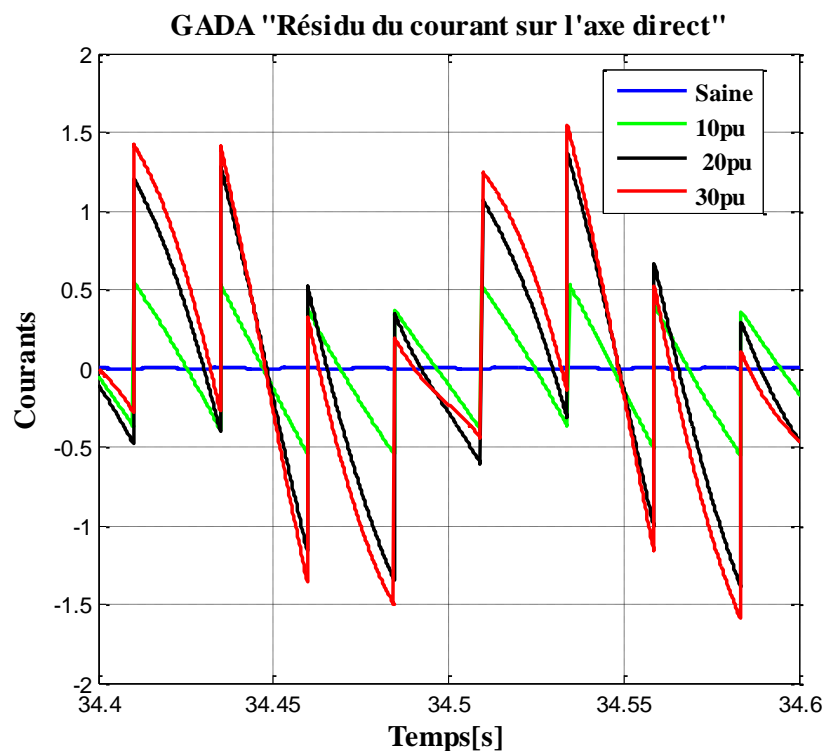


Fig. 4. 29: Variation temporelle du résidu du courant sur l'axe direct D

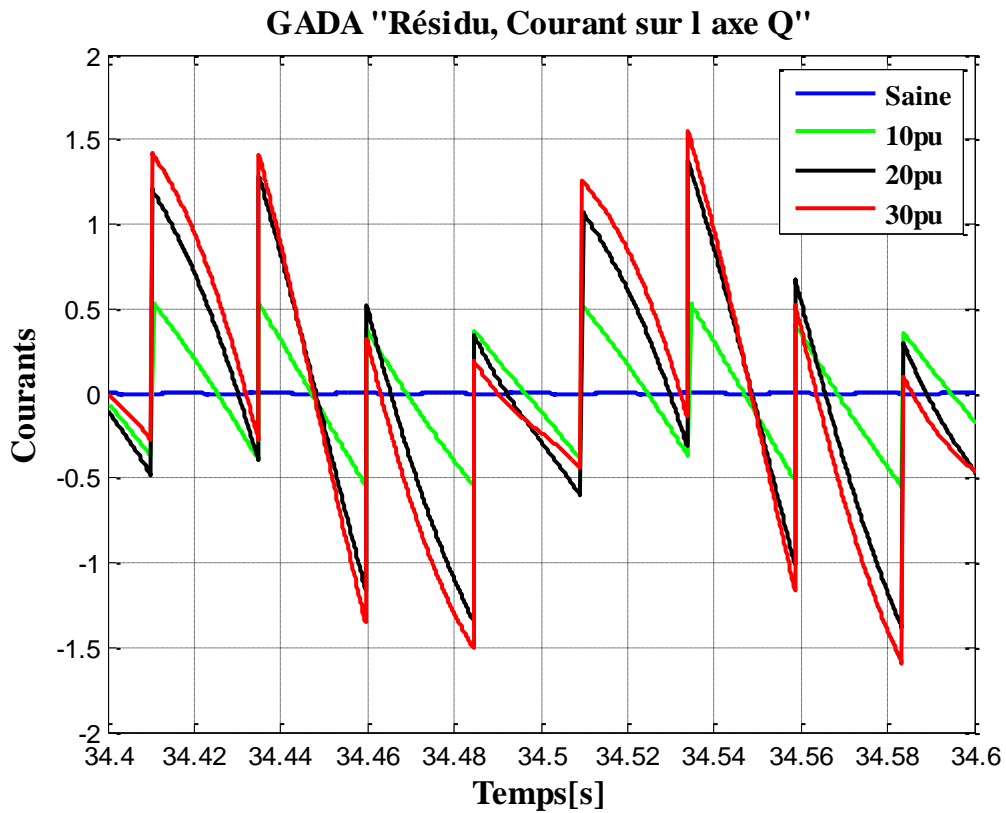


Fig. 4.30: Variation temporelle du résidu du courant sur l'axe en quadrature

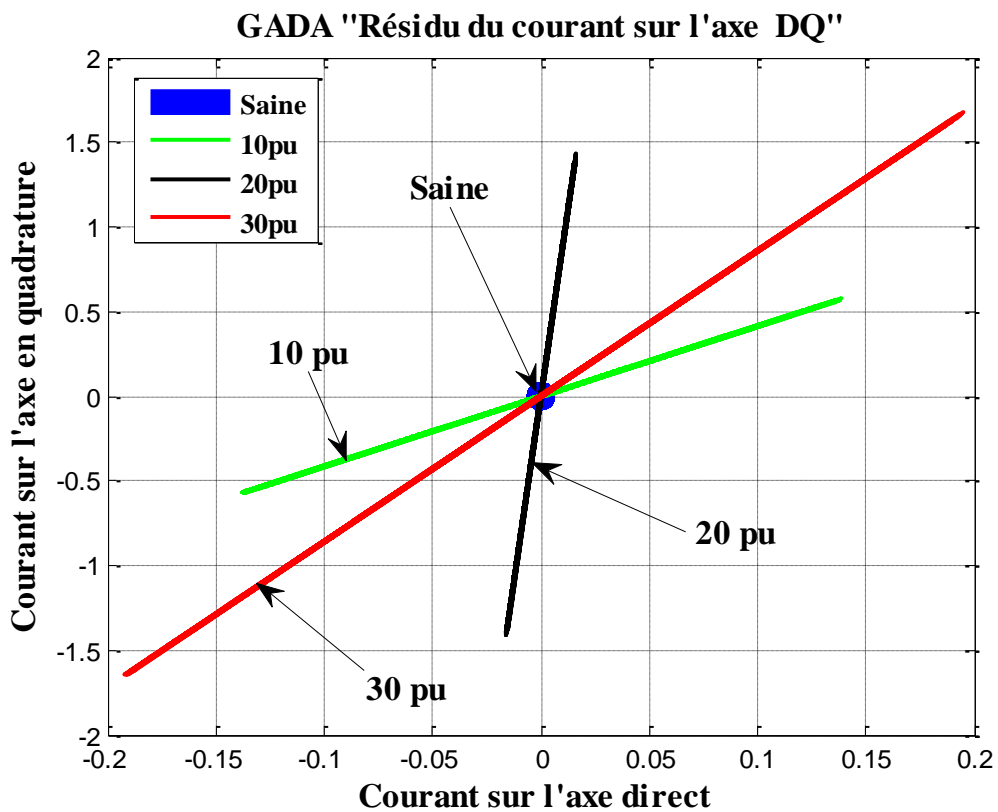


Fig. 4.31: Résidu du courant en quadrature en fonction du résidu du courant direct

Pour les figures représentant les résidus du courant direct et le résidu du courant en quadrature (figure 4.29 à figure 4.31), on constate que la représentation temporelle du résidu du courant (figures 4.29 et 4.31) en fonctionnement sain est réduite au point zéro, et l'amplitude des résidus du courant pour une augmentation de 10% et 30% est très éloignée de la valeur nulle. Dans le cas de la figure du résidu du courant en quadrature en fonction du résidu du courant direct, le résidu du courant en fonctionnement sain est représenté par un point placé à l'origine, tandis que les résidus des courants en défauts sont présentés par des droites passant toujours à l'origine mais avec des dimensions différentes [RAMA12b]. Ce comportement est dû à la caractéristique proportionnelle des défauts considérés.

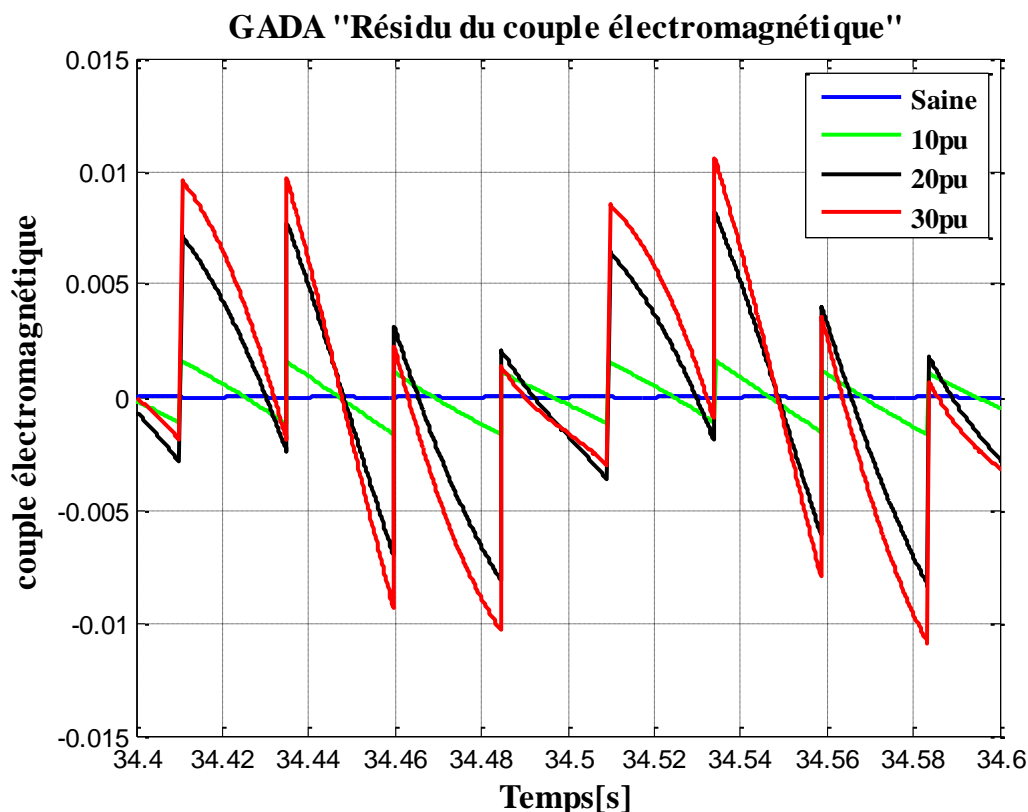


Fig. 4.32: Evolution temporelle des résidus du couple électromagnétique

La figure 4.32 montre l'évolution temporelle des résidus du couple électromagnétique de la GADA, on constate qu'il y a une variation et une augmentation d'amplitude du résidu des défauts lorsqu'il y a augmentation des valeurs des résistances des enroulements. La figure 4.33 représente la variation temporelle du résidu de la vitesse de rotation, comme la vitesse de rotation est inversement proportionnelle par rapport au couple électromagnétique, la figure montre bien cette caractéristique.

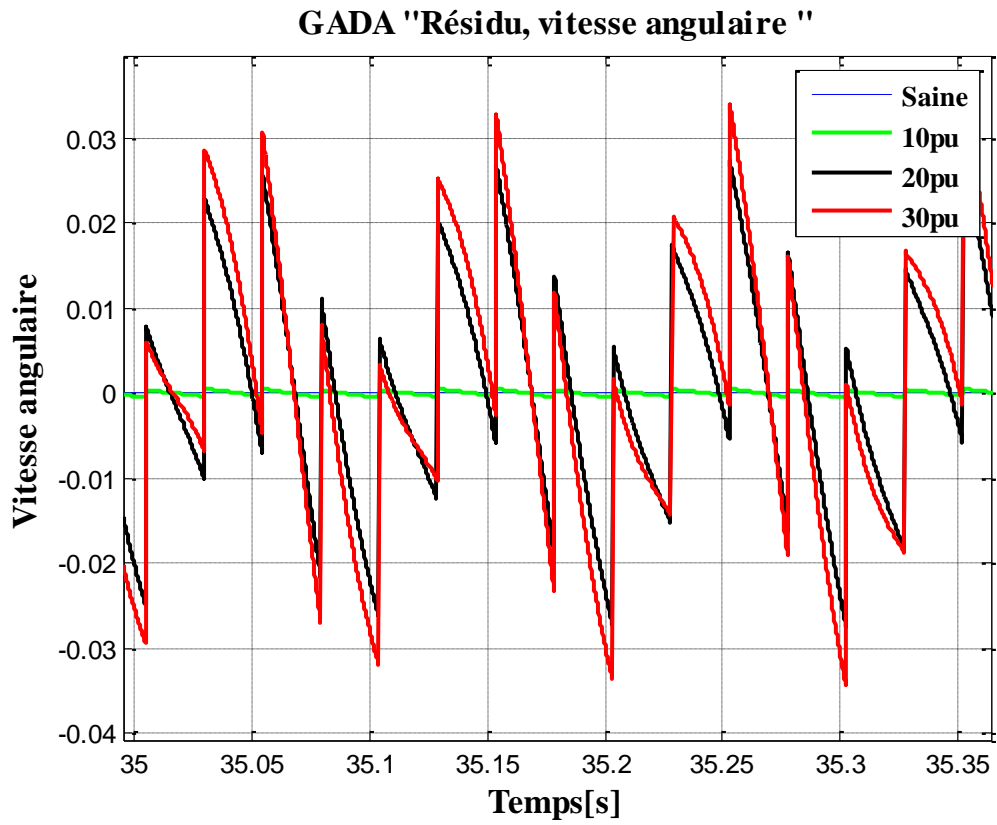


Fig. 4.33: Variation temporelle du résidu de la vitesse angulaire

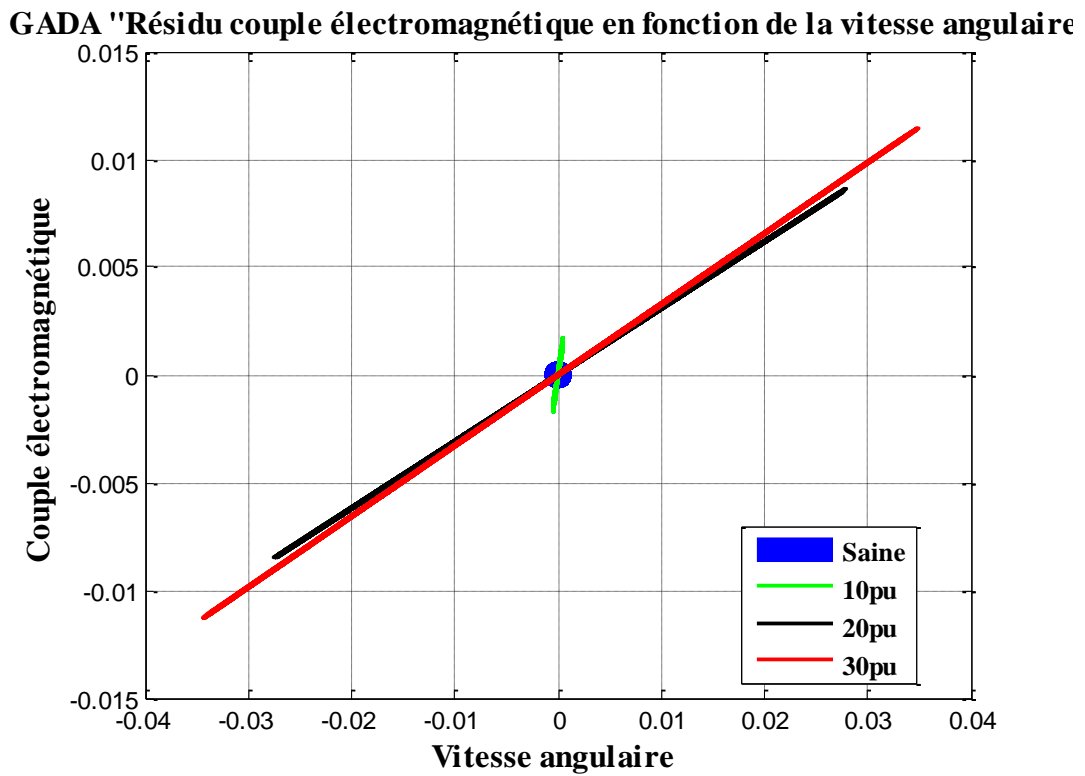


Fig. 4.34: Couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire

La figure 4.34 montre les résidus du couple électromagnétique de la GADA en fonction de la vitesse angulaire, on constate qu'en fonctionnement sain, le résidu est un point placé à l'origine. En fonctionnement défaillant, le résidu devient un segment de droite sécante passant toujours par l'origine, mais avec des dimensions différentes.

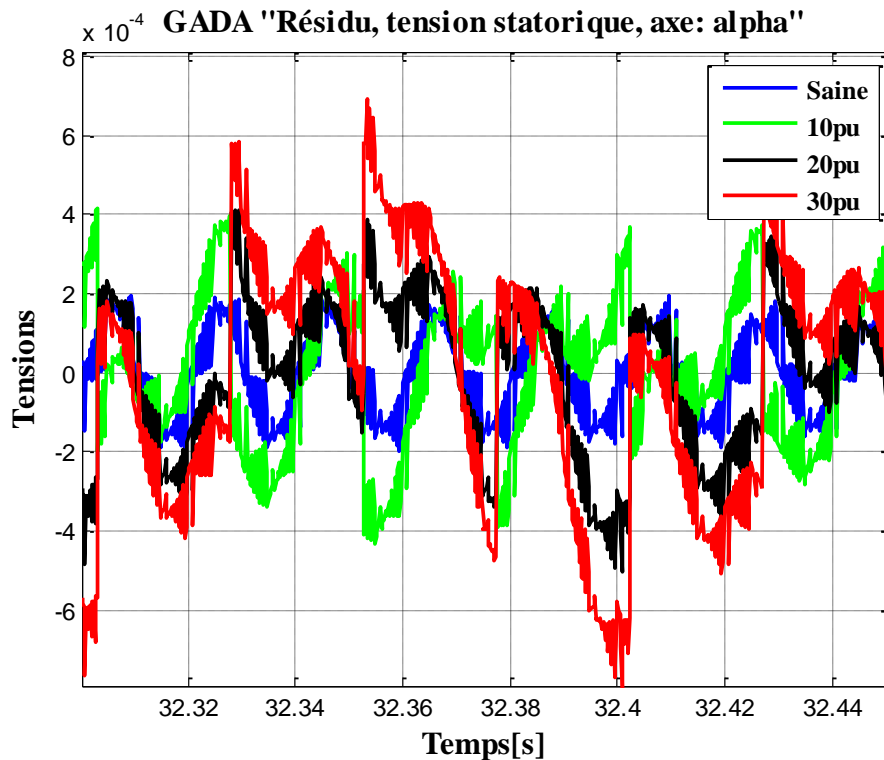


Fig. 4.35: Variation temporelle du résidu de la tension statorique sur l'axe « alpha »

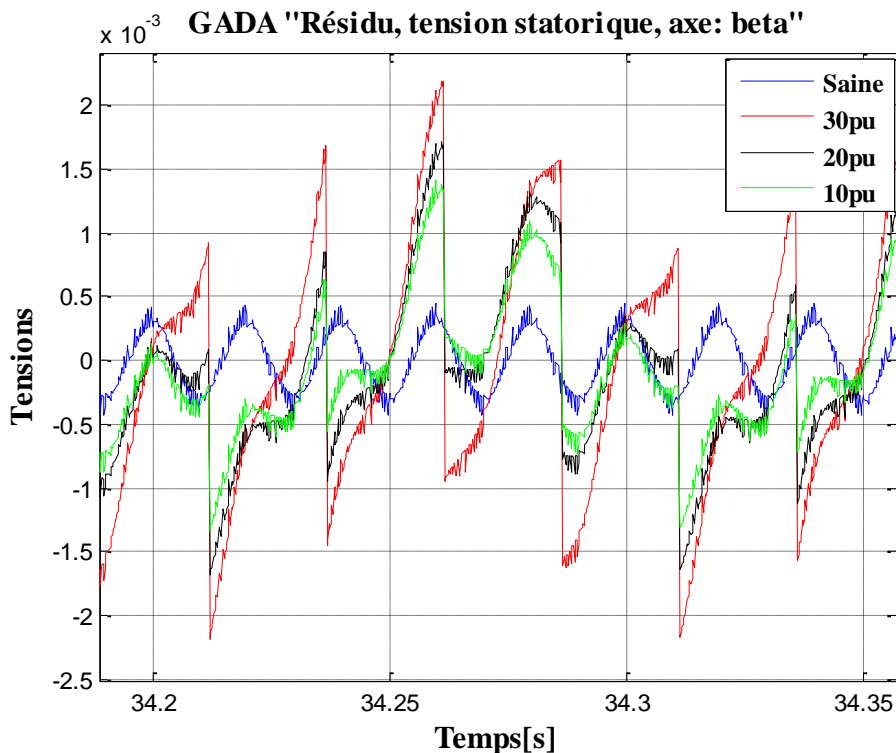


Fig. 4.36: Evolution temporelle des résidus de la tension statorique sur l'axe beta

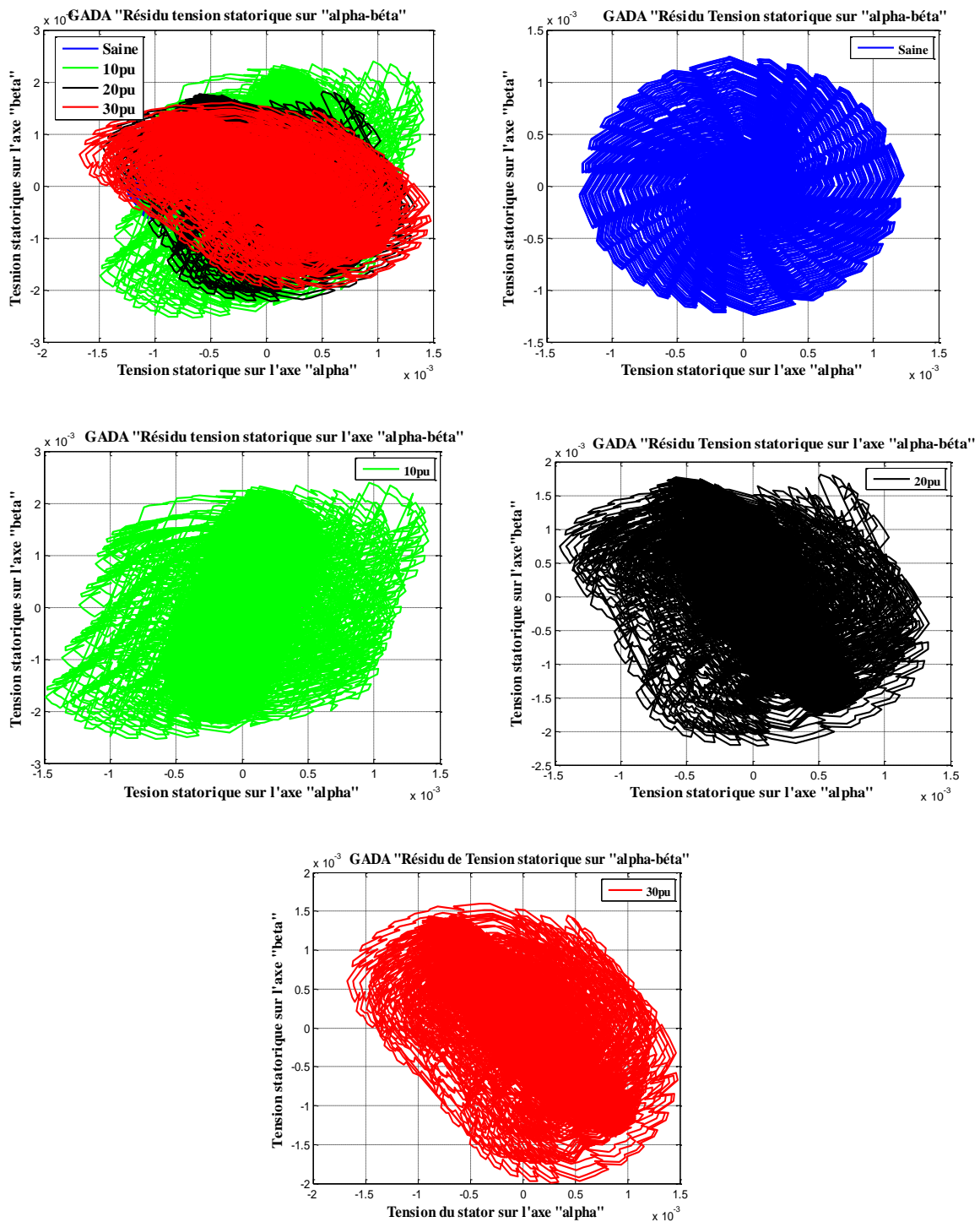


Fig. 4.37: Evolution des résidus de la tension statorique sur les deux axes «alpha- beta»

Les figures 4.35 à 4.37 et les figures 4.38 à 4.39 représentent la variation temporelle des résidus de la tension statorique et des résidus du courant statorique sur les deux axes alpha et beta. Les deux figures 4.37 et 4.40 montrent l'évolution des résidus de la tension statorique et du courant statorique sur l'axe bêta en fonction de l'axe alpha. On constate sur les figures, qu'il est possible de détecter les défauts sur la tension et le courant du stator de la GADA. En fonctionnement sain, le résidu n'est pas nul mais sinusoïdale, ce comportement est dû au bruit



ou aux perturbations subies par la tension du stator car l'ensemble du système étudié est connecté au réseau infini [MART11].

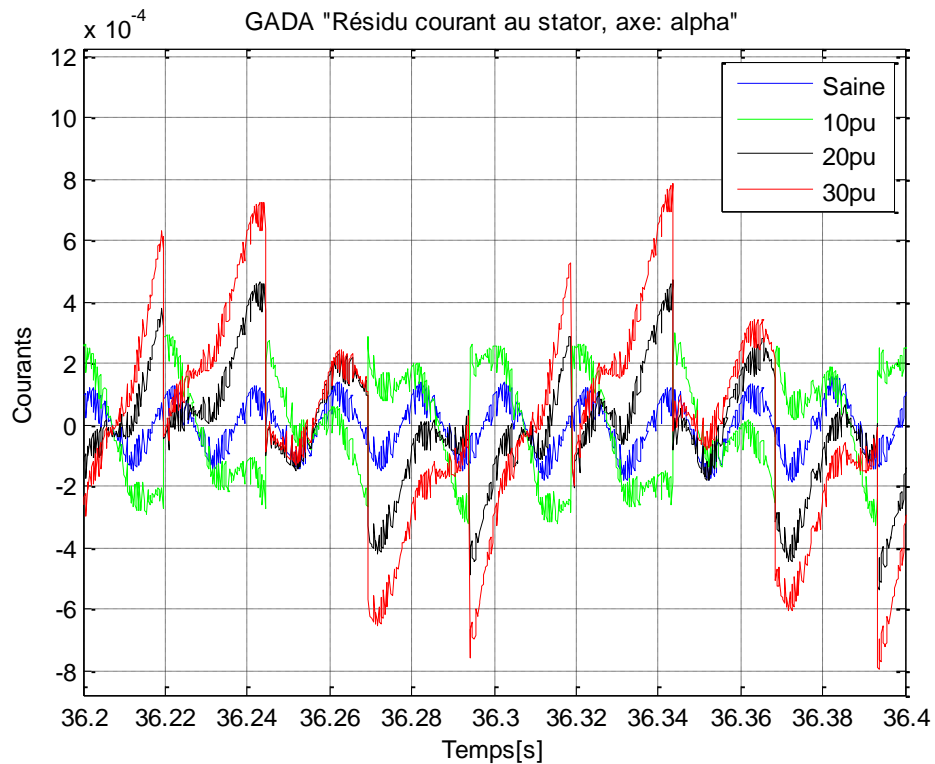


Fig. 4.38: Variation temporelle du résidu du courant statorique sur l'axe « alpha »

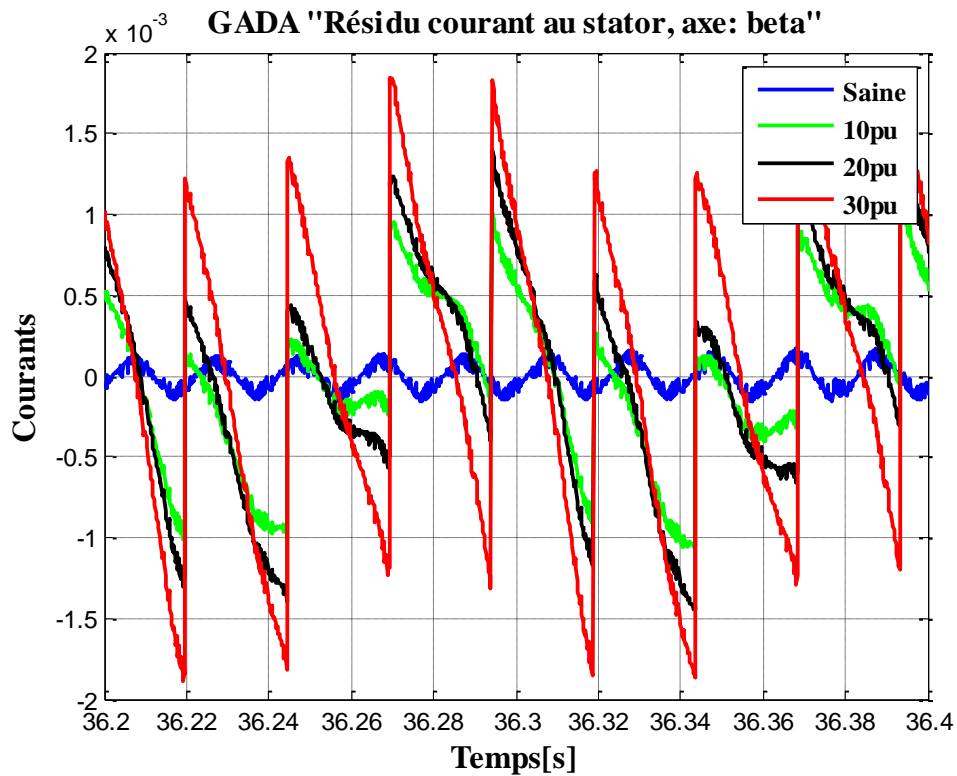


Fig. 4.39: Evolution temporelle du résidu du courant statorique sur l'axe « beta »

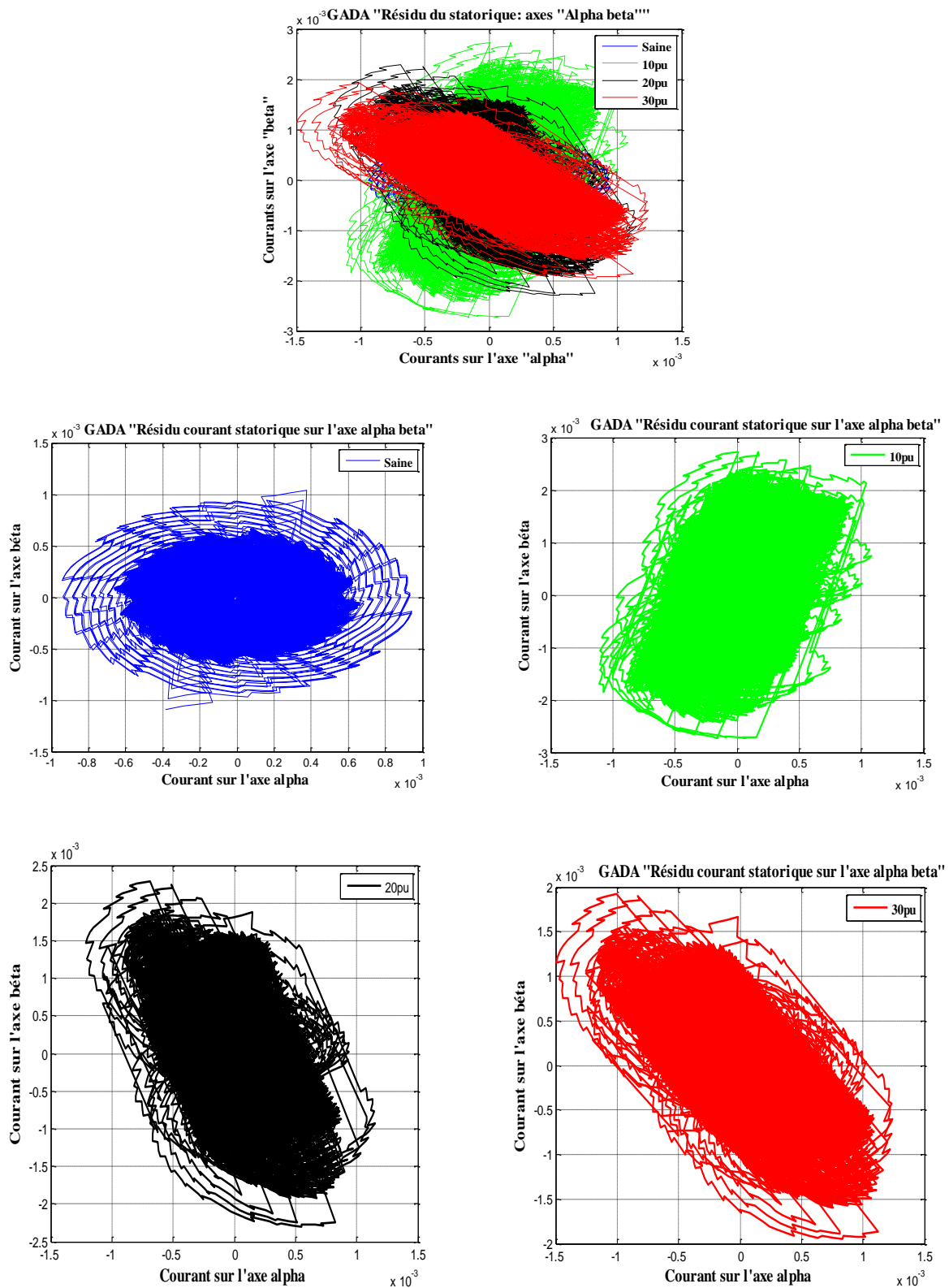


Fig. 4.40: Evolution des résidus du courant statorique sur les deux axes «alpha- beta»  
 Pour le fonctionnement défaillant du système, les résidus ont une amplitude plus importante qu'en fonctionnement sain. Les figures du fonctionnement sain pour la représentation alpha-béta de la tension et du courant statorique affichent un nuage des points sous forme de disque à dent de scie. Dès que de défaut apparaît, les nuages de points changent de dimension et

commence à s'incliner. L'inclinaison dépend de la valeur des défauts sur la résistance des enroulements considérés.

Les figures présentées sur cette partie montrent bien l'efficacité de la génération du résidu par la méthode d'analyse en composantes principales pour la détection de défaut du système complexe comme l'ensemble éolien. Les défauts sur les variables d'état de la GADA sont détectés même pour une petite amplitude du défaut, 0,001% par rapport à la valeur normale.

#### 4.4 CONCLUSION

En vue de la détection de défaut d'un système, ce chapitre propose une méthode de génération de résidu pour étudier le comportement en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant de la machine asynchrone à rotor bobiné et l'ensemble d'éolienne notamment de sa génératrice asynchrone doublement alimentée. La méthode proposée est l'analyse en composantes principales. L'ACP est une méthode statistique basée sur des relations de redondance. Le principe de la méthode a été traité suivi par la construction du modèle. Le modèle de l'ACP est obtenu en décomposant en valeurs et vecteurs propres la matrice de variance/covariance des données obtenues par la simulation des deux actionneurs à surveiller. Les données centrés et réduites, de dimension «  $m$  » sont projetées dans deux espaces : l'espace principal et l'espace résiduel. Nous avons montré que l'espace principal est lié au  $\ell$  vecteurs propres correspondant aux valeurs propres les plus élevées tandis que l'espace résiduel est associé aux «  $m-\ell$  » vecteurs propres qui correspondent aux valeurs propres restantes. On peut remarquer qu'il est important de bien choisir le nombre de composantes principales à retenir car il entraîne des effets néfastes sur le diagnostic de défauts sur des systèmes dynamiques, plusieurs méthodes sont proposées dans ce chapitre. Pour valider le programme de traitement de données par ACP, nous avons pris les données météorologiques de la CSM. On peut constater que la vitesse du vent dans la région nord de Madagascar a une vitesse maximale entre le 175 et le 200<sup>ème</sup> jour.

Ensuite nous avons proposé une méthode de détection et de localisation de défauts par l'analyse des résidus des variables d'état des deux actionneurs. Le principe de cette méthode est traité. La génération des indicateurs de défaut par ACP a été faite. Et nous avons appliqué cette méthode pour la détection et localisation de défauts du système étudié.

La première application concerne pour la machine asynchrone à rotor bobiné, deux processus de simulation sont proposés : les défauts sont introduits initialement puis les défauts se produisent en cours de fonctionnement. Les défauts considérés sont la variation des résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine. Avec la méthode

proposée, on remarque qu'il est possible de détecter la présence de défauts sur la MARB même avec de faible variation (exemple 0.001%). En comparant les résidus en fonctionnement défaillant et le résidu en fonctionnement sain de la machine, on voit que les résidus en fonctionnement sain du courant, de la tension, du couple électromagnétique et de la vitesse angulaire ont une amplitude très faible (presque nulle). Par contre les résidus des variables d'état de la machine en fonctionnement défaillant ont des amplitudes largement supérieures à la valeur nulle. Nous avons montré que les résidus du couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire sont des droites passant par le point zéro pour le fonctionnement défaillant et réduite à un point à l'origine pour le fonctionnement sain. Si le défaut apparaît en cours de fonctionnement, la méthode proposée détecte facilement le début de défaillance. Aussi, nous avons utilisé la méthode combinée : la reconstruction des variables et l'indice de détection  $D_i$  pour la détection et localisation des défauts. Pour améliorer la qualité de la détection de défauts et de diminuer les fausses alarmes, le filtre EWMA a été utilisé. Des résultats de simulation sont présentés, on voit qu'en présence de défauts les signaux représentant les variables à surveiller dépassent le seuil de détection. Pour la localisation de défaut, l'indice de localisation filtré permet de bien localiser les variables incriminées.

La deuxième application de la méthode ACP est axée sur le système complexe éolien notamment sa génératrice asynchrone. Comme la MARB, plusieurs résultats de simulation sont présentés. On voit que l'évolution temporelle des résidus de la tension et du courant dans les deux axes *alpha- béta* et *d-q* ont des amplitudes très grandes par rapport au résidu en fonctionnement sain de la GADA. Nous avons montré que le résidu de la tension statorique, tension rotorique et le résidu courant statorique sur l'axe béta en fonction de résidu sur l'axe alpha sont des nuages de point sous forme d'anneau. En fonctionnement sain, le résidu de la tension est un anneau avec plus d'épaisseur. En fonctionnement défaillant, le nuage de point diminue et commence à tourner autour de l'origine. L'angle de décalage et l'épaisseur du nuage dépend de la valeur de défaut introduit sur le système, plus le défaut augmente plus l'épaisseur diminue et l'angle de rotation augmente par rapport à l'axe des abscisses. Sur ce chapitre, nous avons montré qu'en fonctionnement défaillant le résidu du courant en quadrature en fonction du résidu du courant direct et le résidu du couple électromagnétique en fonction du résidu de la vitesse angulaire sont des droites qui passent par l'origine, tandis que le résidu en fonctionnement sain est un point situé à l'origine. Pour terminer on peut conclure qu'il est possible de détecter la présence de défauts sur des systèmes dynamiques tels que les

actionneurs électriques en utilisant les résidus de ses variables d'états générés par l'analyse en composantes principales.

#### 4.5 REFERENCES DU CHAPITRE 4

- [AKAI74] AKAIKE H., «Information Theory and an extension of the maximum likelihood principle», In Proceedings 2nd International Symposium on Information theory, Petrov and Caski Eds., pp. 267-281, 1974.
- [BENA10] BENAICHA A., GUERFEL M., BOUGUILA N. and K. BENOTHMAN, «New PCA-based methodology for sensor fault detection and localization», International Conference of Modeling Simulation, MOSIM'10, Hammamet, Tunisia, 2010.
- [BESS93] BESSE P., FERRE L., «Sur l'usage de la validation croisée en analyse en composantes principales», Revue de Statistique Appliquée, XLI (1), pp. 71-76, 1993.
- [BORG09] BORGUET S., LÉONARD O., «Coupling principal component analysis and Kalman filtering algorithms for on-line aircraft engine diagnostics», Control Engineering Practice, vol.17, pp. 494-502, 2009.
- [CSMA05] Compagnie Salinière de Madagascar, «Données météorologiques des vasières», CSM Antsampano, Madagascar, 2005.
- [DUNI 98] DUNIA R., QIN S., «A subspace approach to multidimensional fault identification and reconstruction», American Institute Of Chemical Engineers Journal, 44 (8): 1813-1831, 1998.
- [DUNI96] DUNIA R., QIN S. J. and EDGAR T. F., «Identification of faulty sensors using principal component analysis», AIChE Journal, vol. 42, N°10, pp. 2797-2812, 1996.
- [GERT98] GERTLER J., WEIHUA L., YUNBING H. and MCAVOY T., «Isolation enhanced principal component analysis», 3<sup>rd</sup> IFAC Workshop on On-line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, Lyon, France, 1998.
- [GRAT05] GRATON G., KRATZ F., FANTINI J. and DUPRAZ P., «Diagnosis using finite memory observers on an unknown-input system», IFAC World Congress, Prague, 2005.

- [HALL09] HALLIGAN R.G., JAGANNATHAN S., «PCA Based Fault isolation and prognosis with application to Water Pump, paper1, thesis, Fault detection and prediction with application to rotating machinery», Missouri University of Science and Technology, 2009.
- [HARK01] HARKAT F., MOUROT G. and RAGOT J., «Sensor failure detection and Isolation of air quality monitoring network», 4th International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Compiègne, France, 2001.
- [HARK02] HARKAT F., MOUROT G. and RAGOT J., «Différentes méthodes de localisation de défauts basées sur les dernières composantes principales», Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'02, Nantes, France, 2002.
- [HARK03] HARKAT M. F., «Détection et Localisation de Défaut par Analyse en Composantes Principales», Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2003
- [HARK05] HARKAT F., MOUROT G. and RAGOT J., «Diagnostic de fonctionnement de capteurs d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air par analyse en composantes principales», RS-JESA, Information et pollution atmosphérique, vol. 39, pp. 417-436, 2005.
- [HARK06] HARKAT M.F., MOUROT G., RAGOT J., «An improved PCA scheme for sensor FDI: Application to an air quality monitoring network», *Journal of Process Control*, 16(6): 625–634, 2006.
- [HUAN01] HUANG B., «Process identification based on last principal component analysis ». *Journal of Process Control*, vol. 11:19-33, 2001.
- [LUI06] LUI L., «Robust fault detection and diagnosis for permanent magnet synchronous motors», PhD dissertation, College of Engineering, The Florida State University, USA, 2006.
- [MACG96] MACGREGOR J. F., KOURTI T. and NOMIKOS P., «Analysis, monitoring and fault diagnosis of industrial processes using multivariate statistical projection

methods», IFAC, 13th Triennial Word Congress, pp. 145-150, San Francisco, USA, 1996.

[MART11] MARTINEZ M.I., SUSPERREGUI A., TAPIA G., CAMBLONG H., «Sliding-Mode Control for a DFIG-based Wind Turbine under Unbalanced Voltage», Preprints of the 18<sup>th</sup> IFAC World Congress Milano, Italy, 2011.

[MART97] MARTIN E.B., MORRIS A. J., «Monitoring performance in flexible process manufacturing», Centre for Process Analytics and Control technology, University of Newcastle, 1997.

[MINA07] MINA J., VERDE C., «Fault detection for large scale systems using dynamic principal components analysis with adaptation», International Journal of Computers, Communication & Control, vol. II, N°2, pp. 185-194, 2007.

[RAGO09] RAGOT J., «Détection et isolation de défaut par analyse en composantes principales», CRAN-INPL JD- JN MACS, 2009.

[RAMA11a] RAMAHALEOMIARANTSOA J.F., HÉRAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Principal components analysis method, application in electrical machines diagnosis», The proceedings of the 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), SciTePress-Science and Technology Publications, ISBN: 978-989-8425-74-4, Vol 1, pp.167-175, 2011.

[RAMA11b] RAMAHALEOMIARANTSOA J.F., HÉRAUD N., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «faults detection of wound rotor induction motor with principal components analysis method», 21<sup>th</sup> International Conference on Production Research (ICPR'21), Stuttgart Germany, 2011.

[RAMA12a] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HÉRAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Performances of the PCA method in electrical machines diagnosis using Matlab», INTECH, MATLAB / Book 1, ISBN 979-953-307-774-0, 2012.

[RAMA12b] RAMAHALEOMIARANTSOA F.J., HERAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J. M., «On the Sensitivity of Principal Components



Analysis Applied in Wound Rotor Induction Machines Faults Detection and Localization», International Journal of Energy Science (IJES), accepted, 2012.

[RAMA12c] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., BENNOUNA O., SAMBATRA E.J.R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Modeling & Fault Diagnosis System for Electric Vehicles», The 38<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, ETS Montréal, Canada, October 2012

[THAR08] THARRAUL Y., «Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales Application à une station de traitement des eaux usées», Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2008.

[VALL99] VALLE S., WEIHUA L. and QIN S.J., «Selection of the number of principal components: The variance of the reconstruction error criterion with a comparison to other methods», Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 38, pp. 4389-4401, 1999.

[LI W01] LI W., QIN S.J., «Consistent dynamic pca based on errors-in-variables Subspace identification», Journal of Process Control, 11(6): 661-678, 2001.

[WANG02] WANG, Qin S.J., «A new subspace identification approach based on principal component analysis», Journal of Process Control, 12(8): 841-855, 2002.

[WANG03] WANG J., Qin S.J., «EWMA, Kalman Filter and Recursive Least Squares-relationships and modifications», TWMCC 2003 Sprong Meetind, Austin, TX, The University of Texas, 2003.

[WAX 85] WAX M., KAILATH T., «Detection of signals by information criteria», IEEE Trans. A coust. Speech Signal Process. ASSP 33, pp. 387- 392, 1985.

# **Chapitre 5 : Etude comparative de deux méthodes de détection de défauts : Estimateurs d'état et Analyse en Composantes Principales**

## **5.1 INTRODUCTION**

Dans la littérature, plusieurs stratégies de diagnostic sont proposées. Mais le choix et l'application de la méthode dépend essentiellement du cahier des charges du système à étudier. Certains utilisent la méthode analytique si le modèle mathématique est connu et d'autres appliquent la méthode d'apprentissage si les données des entrées/ sorties sont disponibles.

Même si certains auteurs mentionnent [BENN06a] que la comparaison entre les différentes méthodes de détection de défauts ne peut pas s'effectuer de manière évidente, ce chapitre est axé sur l'étude comparative de deux méthodes de diagnostic des défauts d'une éolienne à axe horizontale. Les deux méthodes de diagnostic étudiées ont été traitées au laboratoire de recherche UMR CNRS SPE 6134 de l'Université de Corse, avec le thème « *diagnostic et surveillance* ». La première méthode est basée sur l'Analyse en composantes principales, méthode traitée dans cette thèse, et la seconde méthode est l'estimation d'état en utilisant la méthode de réconciliation des données des systèmes par l'approche polynomiale, un thème traité par Ouadie Bennouna [BENN06b] pour détecter les défauts de la génératrice asynchrone d'une éolienne. La méthode de détection des défauts par ACP a été développée et validée dans le chapitre 3, par contre le principe de la méthode d'estimation d'état pour la détection des défauts sera traité et développé dans les paragraphes suivants. Les deux méthodes sont ensuite appliquées sur la génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA) pour étudier les performances et les désavantages de chaque méthode.

## **5.2 METHODE DE LA REPRESENTATION POLYNOMIALE**

La cohérence des données est l'un des éléments essentiels du diagnostic. Par conséquent les différentes variables doivent vérifier les équations de fonctionnement du système étudié. Mais suite aux problèmes technologiques et/ou économiques l'instrumentation à installer est le plus souvent incomplète et entraîne des erreurs sur les mesures. Actuellement pour diminuer ces erreurs, on exploite les relations qui existent entre les différentes variables du système, c'est ce qu'on appelle les techniques de validation de données, encore appelées abusivement la méthode de la réconciliation des données [RAGO06]. Cette méthode utilise les équations du

modèle du système qui permettent ensuite d'avoir une estimation des variables vérifiant les équations de contrainte. Certains auteurs utilisent la méthode de la réconciliation des données dans le cas où les erreurs systématiques ne sont pas présentes dans le modèle du système et la méthode de détection des erreurs pour les identifier et les éliminer si ces erreurs systématiques affectent le système ; Ces deux techniques sont basées sur les propriétés de redondance des mesures [BENN06d].

### **5.2.1 Principe de la réconciliation des données**

Historiquement les problèmes de réconciliation des données (RD) ont été considérés la première fois par Kuehn et Davidson en 1961. Ils ont utilisé la méthode dans le cas où toutes les variables d'état sont mesurées en utilisant les multiplicateurs de Lagrange pour prendre en compte les contraintes [KUEH61].

La réconciliation des données permet de valider et, en général, de corriger les informations délivrées par les capteurs. Son intérêt se situe à plusieurs niveaux [VRIE02] :

- Réaliser des optimisations très fines du process,
- Réaliser un suivi très précis des performances,
- Repérer les capteurs et instruments « à problèmes » et en conséquence, économiser sur la maintenance,
- Faire la distinction entre les variations de performances d'un instrument et un défaut de celui-ci, et limiter ainsi le nombre de fausses alarmes.

De nombreux travaux ont ensuite été effectués. En effet, plusieurs idées sont introduites, en particulier, pour les systèmes linéaires comme l'algorithme basé sur l'analyse simultanée des systèmes linéaires et bilinéaires [RAGOT90]. Cette technique a été ensuite étendue aux cas multilinéaires [HERA91] avec les notions d'observabilité, de précision [BAGA08], de fiabilité de l'estimation des variables [MOHA12], de la prise en compte du bruit et des erreurs de détectabilité [BHUS00].

Le cas des systèmes non linéaires, a été pris en compte la première fois par une approche itérative [KNEP80]. Ponzoni a utilisé la méthode structurelle qui réorganise les matrices triangulaires inférieures, requises pour la classification des variables non mesurées dans les problèmes d'instrumentation des processus [PONZ98].

Francken et al. ont validé la technique de réconciliation de données et d'estimation des paramètres, par une approche de type maximum de vraisemblance, appliqué sur une fenêtre d'observation glissante pour un convertisseur à oxygène [FRAN09]. Korbel a utilisé la

méthode en ligne basée sur la transformation d'ondelettes et de leur filtrage qui permet de fournir une représentation précise en régime permanent de petits sous systèmes. L'approche combine la technique de prétraitement par ondelettes et de la réconciliation de données basée sur la simulation en un seul système capable de fournir des ensembles de données réconciliées pour des systèmes à faible redondance [KORB11].

En général pour résoudre un problème non linéaire de réconciliation des données, une méthode d'optimisation non linéaire en présence des contraintes, doit être utilisée [BENN06b].

Pour la réconciliation de données de système dynamique, cette méthode n'a reçu de l'attention que récemment même si Stanley et Mah l'ont utilisée avec l'extension du filtre de Kalman [STAN77].

Dans l'article de Darouach et al. les auteurs utilisent la technique récursive pour résoudre le problème d'optimisation en se basant sur la méthode de moindres carrés [DARO91].

Plus tard, Bennouna et al. ont utilisé la méthode de réconciliation de données pour diagnostiquer la présence de défaillance sur la GADA [BENN06c]. Ullrich a utilisé la technique de validation des données d'un système non stationnaire pour le suivi des performances d'un procédé permettant l'estimation des variables d'état [ULLR10]. Il développe un algorithme de validation utilisé pour le placement de capteurs en dynamique, une extension de la méthode développée et présentée par Gerken [GERK09]. Ensuite Bennouna a étendu l'approche initiée par Bagajewicz et Jiang pour les systèmes dynamiques, cette méthode dynamique est basée sur la représentation polynomiale des systèmes [BENN06a, d].

La méthode de réconciliation de données consiste à ajuster les variables mesurées pour qu'elles vérifient les équations de contrainte. En général, elle peut être formulée par le problème d'optimisation et s'écrit :

$$\text{Min}_{x_i, u_j} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - y_{ei})^2 \quad (5-1)$$

$$g_k(y_{ei}, u_j) = 0 \quad k=1, \dots, m \quad (5-2)$$

où  $y_i$  sont les mesures et  $y_{ei}$  les estimations de la variable  $i$ ,  $u_j$  représente les estimations des variables non mesurées et  $w_i$  sont des facteurs de pondération qui sont choisis selon l'importance de chaque variable. La deuxième équation présente l'équation du modèle.

### 5.2.1.1 Réconciliation des données des systèmes linéaires

Deux cas se présentent :

- Toutes les variables sont mesurées, c'est le cas le plus simple et elles vérifient l'équation suivante :

$$y = x + \xi \quad (5-3)$$

où

$y$  : le vecteur de mesures,

$x$  : le vecteur des valeurs vraies,

$\xi$  : le vecteur des erreurs.

Les contraintes qui représentent les équations du système peuvent être écrites sous la forme :

$$Ax = 0 \quad (5-4)$$

où  $A$  est une matrice de dimension  $m*n$ , avec  $m$  le nombre d'équations de contrainte et  $n$  est le nombre de mesures. L'objectif de la réconciliation des données est de résoudre le problème de minimisation suivant [DIBO05] :

$$\underset{x}{\text{Min}}(y - x)^T W (y - x) \quad (5-5)$$

où  $W$  est une matrice de pondération de dimension  $n*n$ .

On peut obtenir la solution du problème en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange :

$$x_e = y - W^{-1} A^T (AW^{-1} A^T)^{-1} Ay \quad (5-6)$$

avec  $x_e$  est le vecteur des valeurs estimées.

- Certaines variables ne sont pas mesurées

Dans ce cas on résout le problème de la réconciliation de données en le décomposant en deux sous problèmes dont le premier consiste à réconcilier les variables mesurées redondantes et le deuxième, à estimer les variables non mesurées mais observables. Alors, on peut classer les variables en deux groupes, le vecteur  $y$  des variables mesurées et le vecteur  $u$  des  $p$  variables non mesurées, l'équation de contrainte peut être écrite sous la forme suivante :

$$A_y y + A_u u = 0 \quad (5-7)$$

On peut éliminer dans cette équation les variables non mesurées en multipliant les contraintes par une matrice de projection  $P$  (le nombre de colonne de  $P$  est égal au nombre des contraintes  $m$ ) qui vérifie la propriété suivante :

$$PA_u = 0 \quad (5-8)$$

Alors l'équation de contrainte est simplifiée comme suit :

$$PA_y y = 0 \quad (5-9)$$

Soit  $t$  le rang de la matrice  $P$ , alors  $t$  est lié au nombre de variables observables non mesurées. Si toutes les variables non mesurées sont observables, le rang de la matrice  $P$  est égal à  $(m-p)$ . Dans le cas contraire, le rang de la matrice de projection  $P$  est égal à  $(m-s)$ , avec  $s$  le nombre de colonnes indépendantes de  $A_u$ . La solution du premier problème est donnée par :

$$x_e = y - \sum (PA_y)^T [(PA_y) \sum (PA_y)^T]^{-1} (PA_y) y \quad (5-10)$$

où :

$$\sum = W^{-1}$$

Si toutes les variables sont observables, les estimations sont données par la formule suivante :

$$u_e = -(A_u^T A_u)^{-1} (A_u x_e) \quad (5-11)$$

### 5.2.1.2 Réconciliation des données des systèmes non linéaires

Les contraintes utilisées pour décrire la plupart des procédés industriels sont non linéaires par nature. Pour la réconciliation de données des systèmes non linéaires, on suppose que les erreurs de mesure suivent une loi normale centrée de matrice de variance  $\Sigma$ . Le problème peut être formulé comme étant un problème de minimisation et peut être mis sous la forme suivante :

$$\underset{x,u}{\text{Min}} (y - x)^T \Sigma^{-1} (y - x) \quad (5-12)$$

sous les contraintes :

$$f(x, u) = 0 \quad (5-13)$$

et

$$g(x, u) \leq 0 \quad (5-14)$$

avec

$f$  : le vecteur des contraintes d'égalité de dimension  $m \times 1$ ,

$g$  : le vecteur des contraintes d'inégalité de dimension  $q \times 1$ ,

$\Sigma$  : la matrice de variance des erreurs de mesure de dimension  $n \times n$ ,

$u$  : le vecteur des variables non mesurées de dimension  $p \times 1$ ,

$x$  : le vecteur des variables mesurées de dimension  $n \times 1$ ,

$y$  : le vecteur des mesures de dimension  $n \times 1$ .

### 5.2.2 Résolution du problème non linéaire avec des contraintes d'égalité

Plusieurs techniques ont été développées dans la littérature pour résoudre ce genre de problème. Nous allons décrire les principales utilisées :

- L'utilisation des multiplicateurs de Lagrange. Le lagrangien de ce problème est donné par :

$$L(x, u, y) = (y - x)^T \Sigma^{-1} (y - x) + 2\lambda^T f(x, u) \quad (5-15)$$

En dérivant le Lagrangien par rapport aux variables  $x$ ,  $u$  et  $\lambda$ , on a les équations suivantes :

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -\Sigma^{-1}(y - x) + J_x^T \lambda = 0 \quad (5-16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = J_u^T \lambda = 0 \quad (5-17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = f(x, u) = 0 \quad (5-18)$$

où :

$$J_x = \frac{\partial L}{\partial x} \quad (5-19)$$

$$J_u = \frac{\partial L}{\partial u} \quad (5-20)$$

On peut résoudre les équations (5-16), (5-17) et (5-18) en utilisant une procédure itérative numérique comme celle de Newton-Raphson qui est basée sur une linéarisation de Newton du

modèle linéaire ou l'approche itérative basée sur une linéarisation successive de l'ordre «  $l$  » de l'équation (5-13) proposée par Madron et donnée par [MADR92] :

$$f(x, u) = f(x_{ek}, u_{ek}) + J_x^k(x - x_{ek}) + J_u^k(u - u_{ek}) = 0 \quad (5-21)$$

avec  $x_{ek}$  et  $u_{ek}$  les estimations obtenues au début de l'itération  $k$ ,  $J_x^k$  et  $J_u^k$  les matrices définies par les équations (5-19) et (5-20), qui sont calculées à l'estimation  $x_{ek}$  et  $u_{ek}$ .

- On peut aussi résoudre le problème non linéaire par une série de problèmes linéaires en utilisant la linéarisation des contraintes non linéaires. Un exemple de linéarisation d'une contrainte non linéaire est donné par l'équation (5-21). On obtient un problème linéaire de réconciliation de données en minimisant l'équation (5-12) sous les contraintes linéaires données par formule (5-21) [BENN06a]. Ainsi les estimations à l'itération suivante sont données par :

$$u_{e,k+1} = u_{e,k} - [(J_u^k)^T R^{-1} J_u^k]^{-1} (J_u^k)^T R^{-1} \{f(x_{e,k}, u_{e,k}) + J_x^k(y - x_{e,k})\} \quad (5-22)$$

$$x_{e,k+1} = y - \sum (J_x^k)^T R^{-1} \{f(x_{e,k}, u_{e,k}) + J_x^k(y - x_{e,k}) + J_u^k(u_{e,k+1} - u_{e,k})\} \quad (5-23)$$

où :

$$R = J_x^k \sum (J_x^k)^T$$

Ces solutions ont été adaptées pour la réconciliation non linéaire des données par Knepper et Gorman [KNEP80] et plus tard par MacDonald et Howat [MACD80].

### 5.2.3 Résolution du problème non linéaire avec des contraintes d'inégalité

Dans plusieurs cas, et particulièrement en présence d'erreurs grossières, la réconciliation des données invalide les estimations. En effet, en l'absence d'une redondance suffisante, les erreurs sont réparties sur les estimations en particulier sur les variables à petites valeurs et dans certains cas, les estimations auront des valeurs aberrantes. On peut imposer des limites pour certaines variables, les contraintes d'inégalité auront donc la forme suivante :

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (5-24)$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (5-25)$$

D'autres méthodes ont été proposées dans la littérature pour résoudre les problèmes sous contraintes d'inégalité comme la programmation séquentielle quadratique proposée par Chen et al., où les auteurs utilisent la technique du gradient réduit généralisé qui résout les



problèmes d'optimisation non linéaire en résolvant une série de problèmes de programmation linéaire [CHEN84].

#### 5.2.4 Réconciliation des données des systèmes dynamiques

La réconciliation de données précédentes a été appliquée à un vecteur de mesures d'une manière statique. On peut préciser qu'un système dynamique est caractérisé par le changement de la valeur vraie et par la suite de la mesure de chaque variable en fonction du temps.

On considère le cas des systèmes linéaires discrets dynamiques, représentés par les équations suivantes :

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_{k-1} \quad (5-26)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (5-27)$$

où

$x_k$  : le vecteur des variables d'état, de dimension  $n \times 1$ ,

$u_k$  : le vecteur des entrées de dimension  $p \times 1$ ,

$w_k$  : le vecteur bruit de dimension  $s \times 1$ ,

$y_k$  : le vecteur des mesures de dimension  $m \times 1$ ,

$v_k$  : le vecteur des erreurs aléatoires de mesures de dimension  $m \times 1$ .

Les matrices  $A_k$ ,  $B_k$  et  $H_k$  sont des matrices de dimensions appropriées et dont les coefficients sont connus à n'importe quel instant du temps considéré. La première équation représente l'évolution dynamique des variables d'état, tandis que la deuxième est le modèle des mesures. On suppose que les vecteurs  $w_k$  et  $v_k$  suivent une loi normale avec les propriétés statistiques suivantes :

$$E[w_k] = E[v_k] = 0 \quad (5-28)$$

$$Cov[w_k] = R_k \quad (5-29)$$

$$Cov[v_k] = Q_k \quad (5-30)$$

$$Cov[w_k, w_j] = Cov[v_k, v_j] = 0 \quad j \neq k \quad (5-31)$$

$$Cov[w_k, v_j] = 0 \quad (5-32)$$

Une fois le modèle du système connu, on peut présenter deux méthodes d'estimation d'état. Pour les systèmes discrets, le filtre de Kalman sera utilisé et pour les systèmes continus on fait appel à la représentation polynomiale. Bennouna a utilisé la représentation polynomiale pour les systèmes discrets, et il a appliqué cette méthode pour le générateur de l'éolien objet de ce chapitre [BENN06a].

### 5.2.5 Principe de la représentation polynomiale

En partant de l'équation du modèle d'état représentant le système linéaire dynamique, donnée par les formules suivantes :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5-33)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5-34)$$

Bagajewicz et Bennouna ont utilisé ces formules pour étudier la réconciliation des données pour des systèmes ayant un modèle particulier [BAGA97] et [BENN06a, b, c, d].

En considérant la représentation polynomiale à l'ordre  $s$  des vecteurs  $x$  et  $u$ , on a :

$$x = \sum_{k=0}^s \alpha_k t^k \quad (5-35)$$

$$u = \sum_{k=0}^s \beta_k t^k \quad (5-36)$$

donc,

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{k=0}^{s-1} (k+1)\alpha_{k+1} t^k \quad (5-37)$$

Alors l'équation (5-33) devient :

$$\sum_{k=0}^{s-1} (k+1)\alpha_{k+1} t^k = A \left( \sum_{k=0}^s \alpha_k t^k \right) + B \left( \sum_{k=0}^s \beta_k t^k \right) \quad (5-38)$$

Quelque soit  $t$ , cette équation est toujours valable,

donc :

$$k\alpha_k = A\alpha_{k-1} + B\beta_{k-1} \quad (5-39)$$

$$A\alpha + B\beta = 0 \quad (5-40)$$

où  $k= 1, \dots, s$ .

On considère le cas de  $n+l$  mesures, et on suppose que les erreurs sont distribuées selon une loi normale. La solution au sens du maximum de vraisemblance revient à résoudre le problème suivant :

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \left\{ (u_i - u_i^+)^T S_U^{-1} (u_i - u_i^+) + (x_i - x_i^+)^T S_x^{-1} (x_i - x_i^+) \right\} \quad (5-41)$$

où,

$S_x$  : la matrice de variance du vecteur  $x$ ,

$S_u$  : la matrice de variance du vecteur  $u$ .

En termes de coefficients polynomiaux, nous avons :

$$\text{Min} \left\{ (T_\beta \beta - u^+)^T R_U^{-1} (T_\beta \beta - u^+) + (T_\alpha \alpha - x^+)^T R_x^{-1} (T_\alpha \alpha - x^+) \right\} \quad (5-42)$$

sous la contrainte :

$$R_m \alpha = D_m \beta \quad (5-43)$$

où,

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_s \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_s \end{bmatrix} \quad (5-44a, b)$$

Les vecteurs de mesures sont donnés par :

$$u^+ = \begin{bmatrix} u_0^+ \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n^+ \end{bmatrix} \quad x^+ = \begin{bmatrix} x_0^+ \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n^+ \end{bmatrix} \quad (5-45a, b)$$

Les autres matrices sont définies par :

$$D_m = \begin{bmatrix} B & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & B & 0 & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & 0 & B \end{bmatrix} \quad R_m = \begin{bmatrix} -A & I & 0 & . & . & 0 \\ 0 & -A & 2I & 0 & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & -A & sI \\ 0 & 0 & . & . & . & -A \end{bmatrix} \quad (5-46a, b)$$

$$R_U^{-1} = \begin{bmatrix} S_U^{-1} & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & S_U^{-1} & 0 & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & 0 & S_U^{-1} \end{bmatrix} \quad R_x^{-1} = \begin{bmatrix} S_x^{-1} & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & S_x^{-1} & 0 & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & 0 & S_x^{-1} \end{bmatrix} \quad (5-46c, d)$$

$$T_\alpha = \begin{bmatrix} I & 0 & . & . & . & 0 \\ I & t_1 I & . & . & . & t_1^s I \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ I & t_n I & . & . & . & t_n^s I \end{bmatrix} = T_\beta \quad (5-46e)$$

On suppose que l'intervalle des mesures est constant et égal à  $h$ , alors la matrice (5-46e) devient :

$$T_\alpha = \begin{bmatrix} I & 0 & . & . & . & 0 \\ I & hI & . & . & . & h^s I \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ I & nhI & . & . & . & n^s h^s I \end{bmatrix} = T_\beta \quad (5-46f)$$

On peut réécrire le problème comme suit :

$$\text{Min}(z^T Q^{-1} z + w^T z) \quad (5-47a)$$

sous la contrainte :

$$Mz = 0 \quad (5-47b)$$

où

$$z = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}, \quad w = -2 \begin{pmatrix} (R_U^{-1} T_\beta)^T u^+ \\ (R_x^{-1} T_\alpha)^T x^+ \end{pmatrix} \quad (5-48a, b)$$

$$Q^{-1} = \begin{pmatrix} (T_\beta^T R_U^{-1} T_\beta) & 0 \\ 0 & (T_\alpha^T R_x^{-1} T_\alpha) \end{pmatrix}, \quad M = (-D_m \quad R_m) \quad (5-48c, d)$$

La solution est donnée par :

$$z = \left[ I - QM^T (MQM^T)^{-1} M \right] \left( -\frac{1}{2} Qw \right) \quad (5-49)$$

Ainsi, une fois le vecteur  $z$  connu, on peut déterminer l'estimation des deux variables  $x$  et  $u$ . La matrice  $MQM^T$  ne dépend pas des mesures et peut être inversée a priori.

## 5.2.6 Techniques utilisée pour la détection d'erreurs

La méthode la plus simple et la plus utilisée pour détecter des défauts est celle du contrôle de la limite (*limit checking*) des variables directement mesurées [ISER06]. Le principe est basé sur la comparaison des variables en fonctionnement normal avec celles mesurées. Ainsi, on prend une variable  $Y(t)$  dans son état normal :

$$Y_{\min} < Y(t) < Y_{\max} \quad (5-50)$$

En dépassant l'une de ces deux limites, cela traduit la présence d'un défaut sur le système, ces valeurs limites sont le plus souvent déterminées en se basant sur l'expérience. On peut aussi vérifier les valeurs limites de la dérivée de la variable concernée. Les deux techniques peuvent être combinées.

Mais les méthodes de détection des défauts utilisées par Bennouna pour la représentation polynomiale sont les deux tests statistiques suivant :

- Le Test de Student,
- Le Test de Page-Hinkley.

### 5.2.7 Tests statistiques

Confronté à des phénomènes complexes et aléatoires, la prise de décision est parfois difficile et les outils adaptés à la théorie des tests ont pour objet de guider les choix entre différentes alternatives. Réaliser un test statistique consiste à mettre en œuvre une procédure permettant :

- De confronter des hypothèses avec la réalité, ou avec ce que l'on perçoit de la réalité à travers l'observation à disposition,
- De prendre une décision à la suite de cette confrontation.

Les hypothèses de tests statistiques pour la détection de défauts dans le système étudié sont les suivantes [ISER06] :

- Hypothèse  $H_0$ , hypothèse aucun défaut  
 $Y \in Y_0$ ,
- Hypothèse  $H_1$ , hypothèse avec défaut  
 $Y \in Y_1$ .

$Y_0$  est la valeur nominale sans défaut de la variable concernée, et considérée comme une variable aléatoire. Cela veut dire que l'hypothèse  $H_0$  est vraie si la variable aléatoire  $Y$  se trouve dans l'intervalle de variation permis, par conséquent, l'hypothèse  $H_1$  est rejetée.

Plusieurs méthodes ont été développées dans le domaine de l'étude des variables aléatoires. Quand on considère que la variable suit une loi normale, on les appelle « *tests paramétriques* ». Quand on ne fait aucune hypothèse sur la densité de probabilité, ces tests sont appelés « *tests non paramétriques* ».

#### ***Test de Student***

Le principe de test de Student est comme suit, considérons l'erreur de mesure de la variable  $k$  à l'instant  $t$  :

$$e_{jk} = Y_{jk} - Y_{ejk} \quad (5-51)$$

avec

$$Y = \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} : \text{les variables mesurées de l'équation (5-33)}$$

$Y_e$  : l'estimation correspondante des variables mesurées  $Y$ .

L'écart type est donné par :

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n (e_{jk} - \bar{e}_k)^2} \quad (5-52)$$

où

$\bar{e}_k$  : la valeur moyenne des erreurs.

Si on suppose que les erreurs grossières sont absentes, la variable :

$$y_k = \frac{\bar{e}_k}{S_k / \sqrt{n+1}} \quad (5-53)$$

suit une loi de Student  $y_k \approx t(n)$ . La variable  $k$  sera suspectée de contenir des erreurs si :

$$\frac{|\bar{e}_k|}{S_k / \sqrt{n+1}} > t_{1-(\alpha/2)} \quad (5-54)$$

Souvent la constante  $\alpha$  est égale à 0,05 qui représente 95 % d'indice de confiance ; la valeur critique est  $t_{1-(\alpha/2)}=2.01$  pour 50 mesures, et  $t_{1-(\alpha/2)}=1.96$  pour  $n$  très grand.

### ***Test de Page Hinkley***

Cette méthode a été utilisée par Basseville et reprise par Bennouna [BASS87]. Le principe de la méthode est le suivant : on prend le cas de  $n$  séries de mesures, on note par  $y_n$  la variable aléatoire étudiée et le test est appliqué aux résidus des variables du système. La variable aléatoire peut s'écrire sous la forme :

$$y_n = \mu_n + \xi_n \quad (5-55)$$

où :

$$\mu_n = \begin{cases} \mu_0; n \leq r-1 \\ \mu_1; n \geq r \end{cases} \quad (5-56)$$

C'est-à-dire on détecte le changement de la moyenne  $\mu_n$  et on estime le temps  $r$ , où le changement a eu lieu. On peut traiter le cas où  $\mu_0$  et  $\mu_1$  sont connues, puis le cas souvent rencontré dans la pratique, le cas où  $\mu_0$  est la seule connue.

- ***Pour le saut connues  $\mu_0$  et  $\mu_1$***

Le problème de détection teste les deux hypothèses suivantes :

$$H_0 : r > n \text{ (pas de changement),}$$

$H_1: r \leq n$  avec changement.

La formule de rapport de vraisemblance est donnée par :

$$\prod_{k=r}^n \frac{p_i(y_k)}{p_o(y_k)} \quad (5-57)$$

où  $p_i$  est la densité de probabilité avec la moyenne  $\mu_i$  ( $i=0,1$ ). On peut écrire ce rapport sous la forme :

$$\Lambda_n(r) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{k=r}^n (y_k - \frac{\mu_0 + \mu_1}{2}) = \frac{1}{\sigma^2} S_r^n(\mu_0, \nu) \quad (5-58)$$

où

$$S_i^j(\mu, \nu) = \nu \sum_{k=i}^j (y_k - \mu - \frac{\nu}{2}) \quad (5-59)$$

avec

$\nu = \mu_1 + \mu_0$  : L'amplitude du saut.

En remplaçant le temps inconnu du saut  $r$  par son estimation au sens du maximum de vraisemblance MLE (*Maximum Likelihood Estimate*), nous avons :

$$\hat{r} = \arg \max_{1 \leq r \leq n} \left[ \prod_{k=0}^{r-1} p_0(y_k) \prod_{k=r}^n p_1(y_k) \right] = \arg \max_{1 \leq r \leq n} S_r^n(\mu_0, \mu) \quad (5-60)$$

On obtient le détecteur suivant :

$$g_n = \Delta \hat{\Lambda}_n(\hat{r}_n) = \max_r S_r^n(\mu_0, \mu) \quad (5-61)$$

Dans ce cas, les deux hypothèses sont équivalentes à :

$$H_0: g_n < \lambda,$$

$$H_1: g_n > \lambda.$$

On peut décrire cet indice de détection comme suit : détecter un saut de moyenne pour le premier instant  $n$  où :

$$g_n = S_1^n(\mu_0, \mu) - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^k(\mu_0, \mu) > \lambda \quad (5-62)$$



○ **Pour le saut inconnu**

On considère le cas le plus réaliste où l'amplitude du saut est inconnue. On suppose que  $\mu_1$  est inconnue et que  $\mu_0$  connue. Dans ce cas, il suffit d'utiliser deux tests en parallèle correspondants à un saut minimum  $\nu_m$  et aux deux directions, baisse ou augmentation de la moyenne.

Pour un saut négatif de moyenne, le test s'écrit :

$$\left[ \begin{array}{l} T_0 = 0 \\ T_n = \sum_{k=1}^n (y_k - \mu_0 + \frac{\nu_m}{2}) \\ M_n = \max_{0 \leq k \leq n} T_k \\ \text{alarme : } M_n - T_n > \lambda \end{array} \right. \quad (5-63)$$

Pour un saut positif de moyenne, le test s'écrit :

$$\left[ \begin{array}{l} U_0 = 0 \\ U_n = \sum_{k=1}^n (y_k - \mu_0 - \frac{\nu_m}{2}) \\ m_n = \max_{0 \leq k \leq n} U_k \\ \text{alarme : } U_n - m_n > \lambda \end{array} \right. \quad (5-64)$$

Il suffit qu'une des deux alarmes se déclenche pour arrêter le test de détection. Ainsi l'estimation de l'instant du saut  $r$  est le dernier instant avant la détection.

### 5.3 RESULTATS DE SIMULATION

Pour comparer les deux méthodes de détection et localisation de biais dans ce chapitre, deux types de biais sont considérés dont le biais constant et le biais évolutif. Les résultats des essais avec ces deux biais sont traités et présentés dans les paragraphes suivants.

#### 5.3.1 Essais avec biais constant

On peut signaler qu'un biais constant de l'ordre de 15% (représente un biais d'une valeur de 100) a été ajouté sur la tension au stator  $u_{os}$  à partir de la centième mesure. Pendant tout l'essai, la vitesse de rotation de la GADA est de 1250 *tr/mn*. L'ordre du polynôme  $s=5$  pour estimer les courants et les tensions, avec une série de mesures de 500 et une période d'échantillonnage  $h=0.2$  *ms* [BENN06b]. Pour la méthode ACP, on garde le même nombre de mesures utilisées par l'approche polynomiale, et toutes les données de la machine sont

identiques. Le tableau 5.1 et le tableau 5.2 (cf. annexe II) montre respectivement les données des vecteurs propres et valeurs propres de la matrice de covariance obtenue par la méthode ACP.

Le tableau 5.2 (cf. annexe II) montre que seule la diagonale du tableau des valeurs propres est différente de zéro, pour la méthode ACP.

Pour le choix du nombre de composantes principales à retenir, avec la méthode ACP, on ne prend que les valeurs propres supérieures à l'unité [RAMA11]. En utilisant la formule (5-65) permettant de calculer la contribution des composantes retenues, on voit que les deux valeurs retenues présentent plus de 94% de contribution totale.

$$Contr = \frac{\left( \sum_{i=1}^l \lambda_i \right)}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (5-65)$$

avec

*Contr* : la contribution des valeurs propres,

$\lambda_i$  : la valeur propre de rang *i*.

Les contributions des valeurs sont des indicateurs qui rendent compte de la part de variabilité des vecteurs à surveiller expliquée par ces sous espaces. Alors on peut réduire l'analyse à un sous espace de dimension  $l < m$  car les dernières valeurs propres (de rang  $m-l$  à  $m$ ) sont très faible [HALL09], [RAMA12a].

Les figures suivantes présentent les allures des variables estimées et les allures de variables mesurées d'une génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA). Les courbes sont obtenues par les deux méthodes de détection de défauts.

Successivement les courbes placées à droite sont des courbes acquises par la méthode de détection des défauts par l'analyse en composantes principales (ACP) et à la partie gauche celle obtenues par la technique de réconciliation de données par approche polynomiale (RDAP).

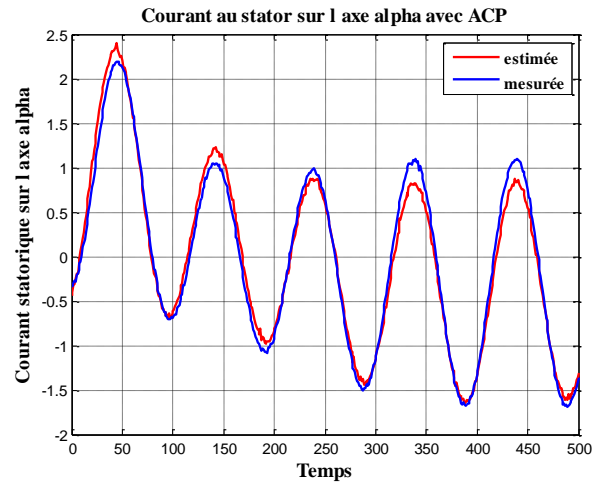
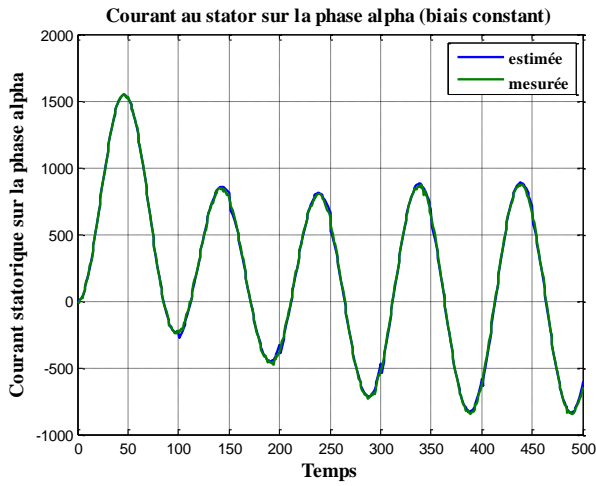


Fig.5.1 : Courant au stator sur l'axe alpha

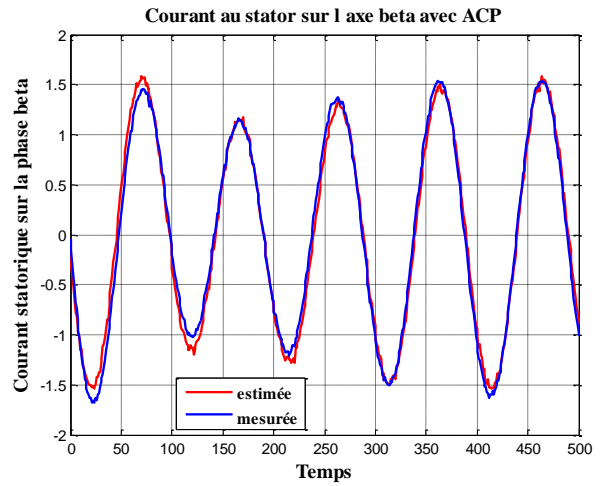
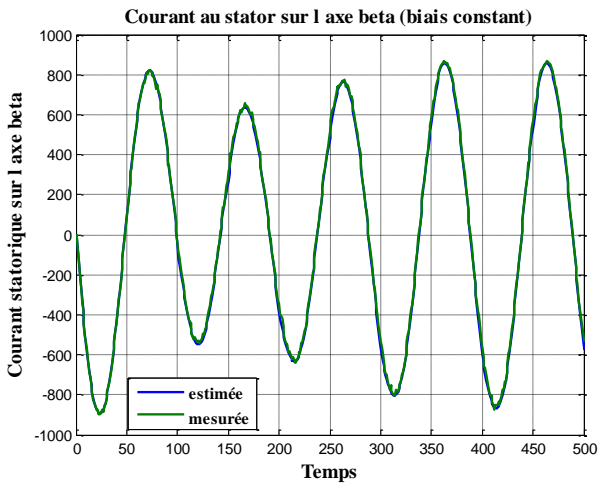


Fig.5.2 : Courant au stator sur l'axe beta

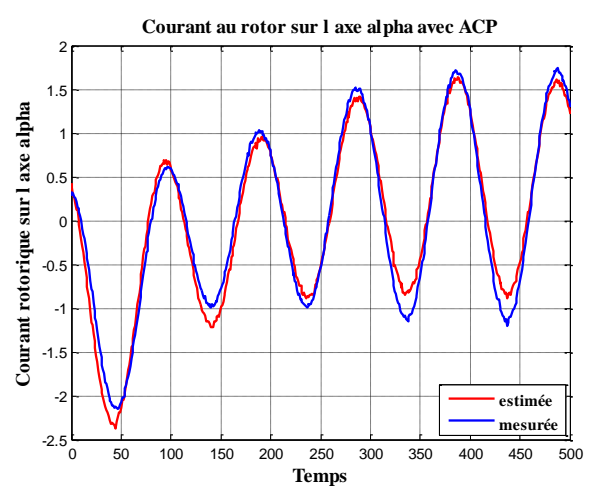
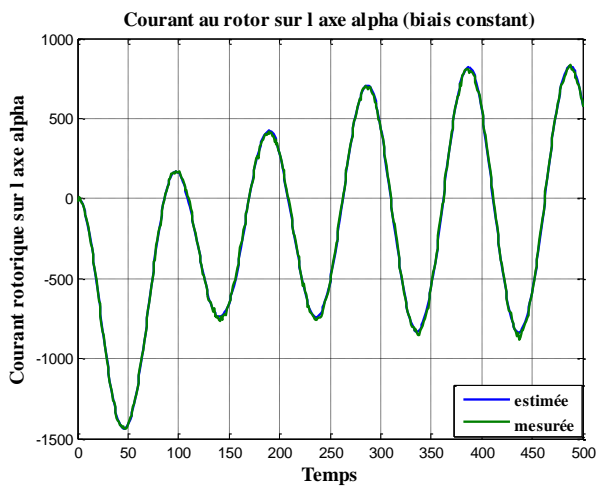


Fig.5.3 : Courant au rotor sur l'axe alpha

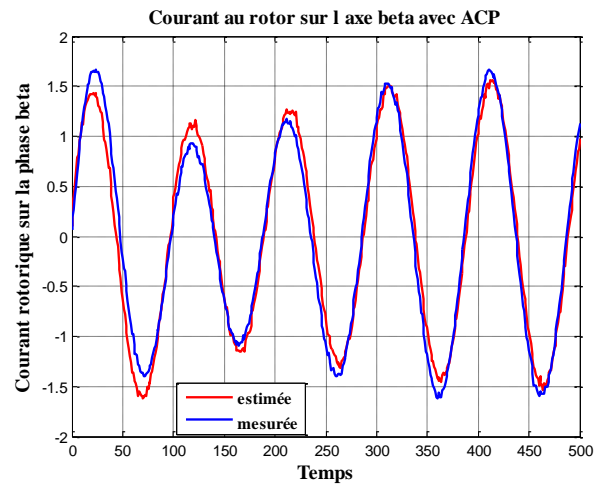
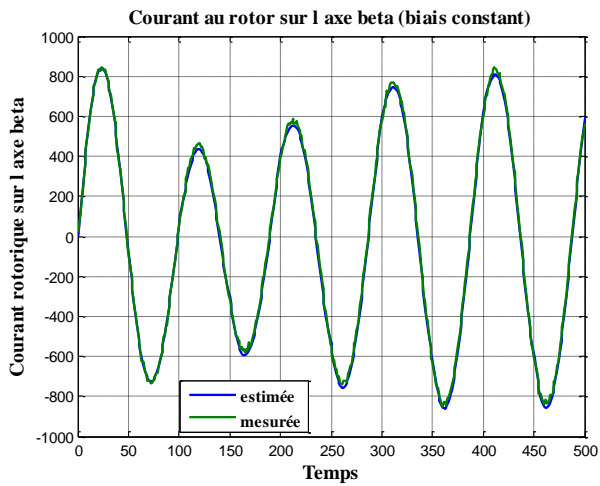


Fig.5.4 : Courant au rotor sur l'axe beta

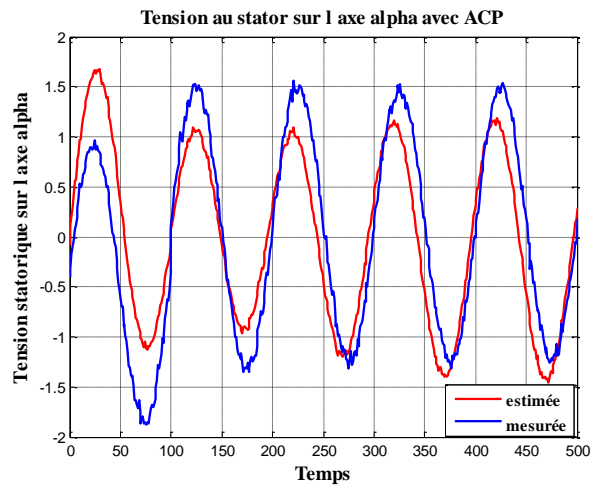
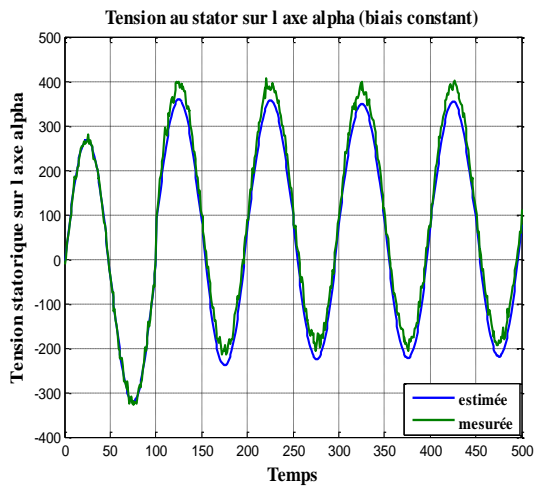


Fig.5.5 : Tension au stator sur l'axe alpha

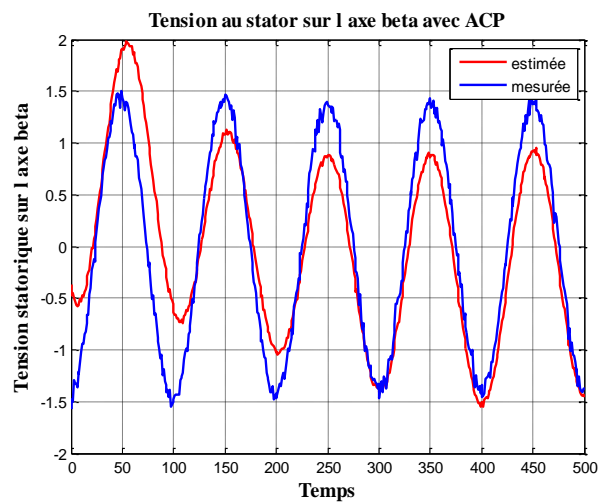
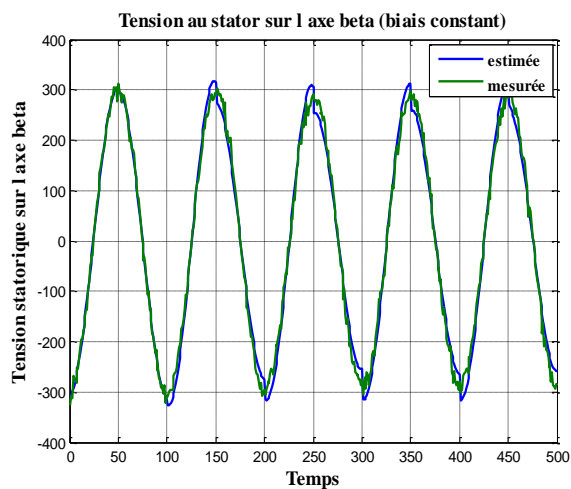


Fig.5.6 : Tension au stator sur l'axe beta

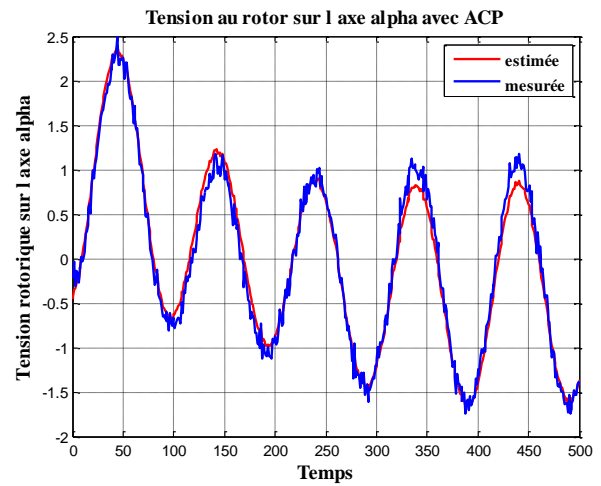
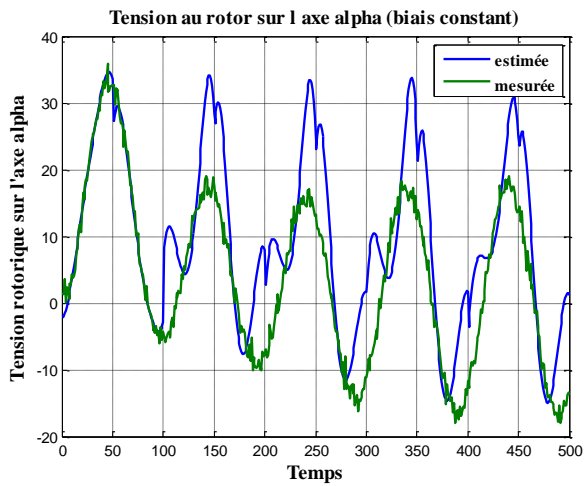


Fig.5.7 : Tension au rotor sur l'axe alpha

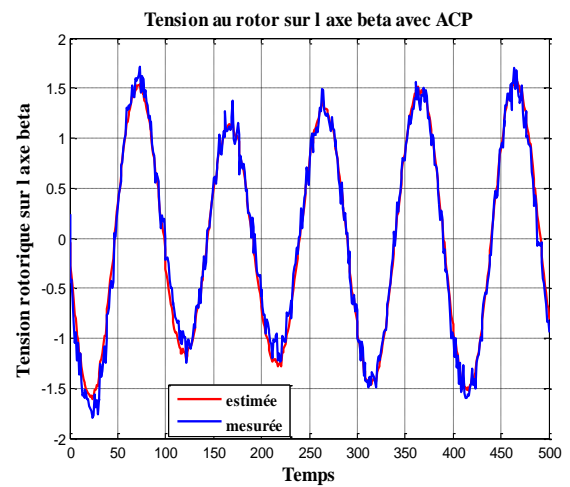
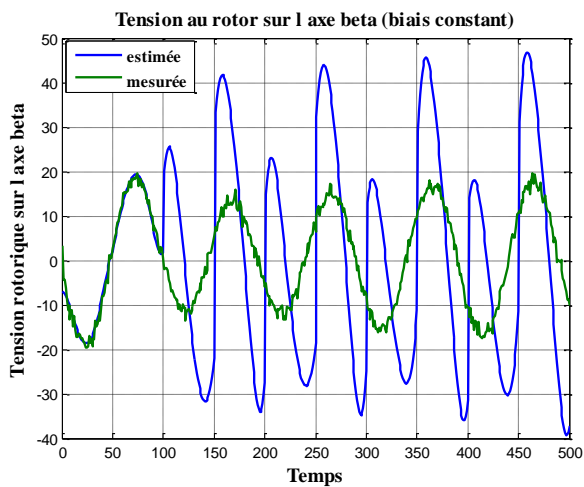


Fig.5.8 : Tension au rotor sur l'axe beta

Les figures 5.1 à 5.4 présentent les allures du courant sur les deux axes alpha et beta, tandis que les figures 5.5 à 5.8 montrent celles des tensions sur les deux axes où le biais considéré est un bien constant. On peut remarquer qu'avec la méthode polynomiale, à partir de la mesure 100 la tension au rotor ne suit pas le profil de la tension mesurée (figure 5.7 et figure 5.8), on peut dire qu'un biais peut être présent sur un ou plusieurs variables du système [BENN06b]. Avec la méthode ACP, on peut constater que les allures des variables estimées et les allures des variables mesurées calculées par cette méthode présentent des amplitudes différentes, proche de zéro pour les allures du courant (figures 5.1 à 5.4), et beaucoup plus grandes pour allures des tensions au stator sur l'axe alpha et beta (figure 5.5 et figure 5.6). Les différences des amplitudes des variables sont dues peut être au biais sur les variables. Pour confirmer ou infirmer cette suspicion, on peut utiliser les deux tests statistiques, le test de Student et le test de Page-Hinkley, pour la méthode polynomiale, et l'indice de détection  $D_i$  (cf. 4.3.2.3) pour la méthode ACP. L'objectif du test est de localiser la présence ou

non de biais sur les variables incriminées. Les figures suivantes donnent un aperçu des résidus des différentes variables par les deux méthodes.

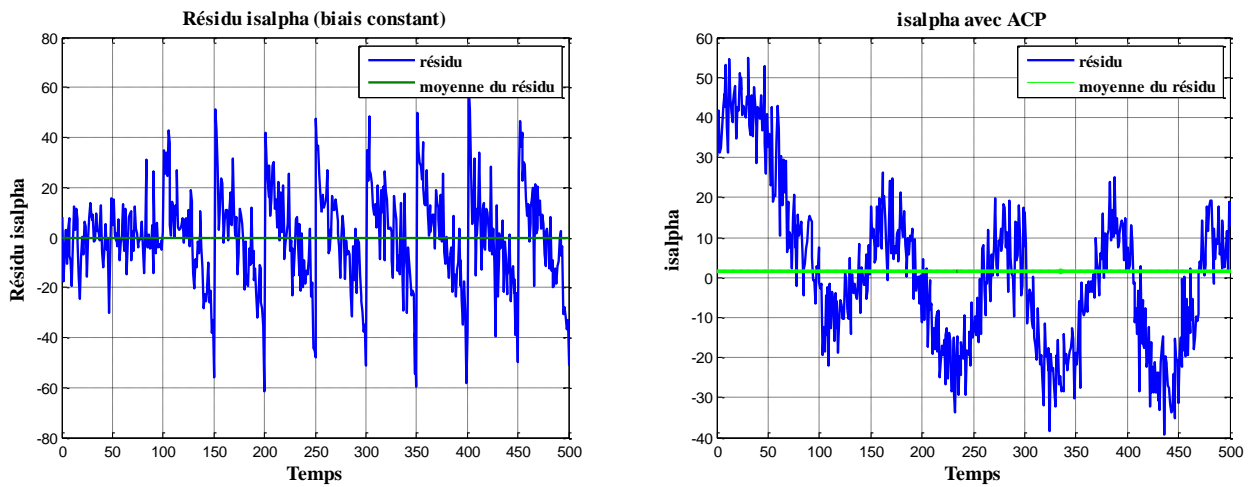


Fig.5.9 : Résidu du courant au stator sur l'axe alpha

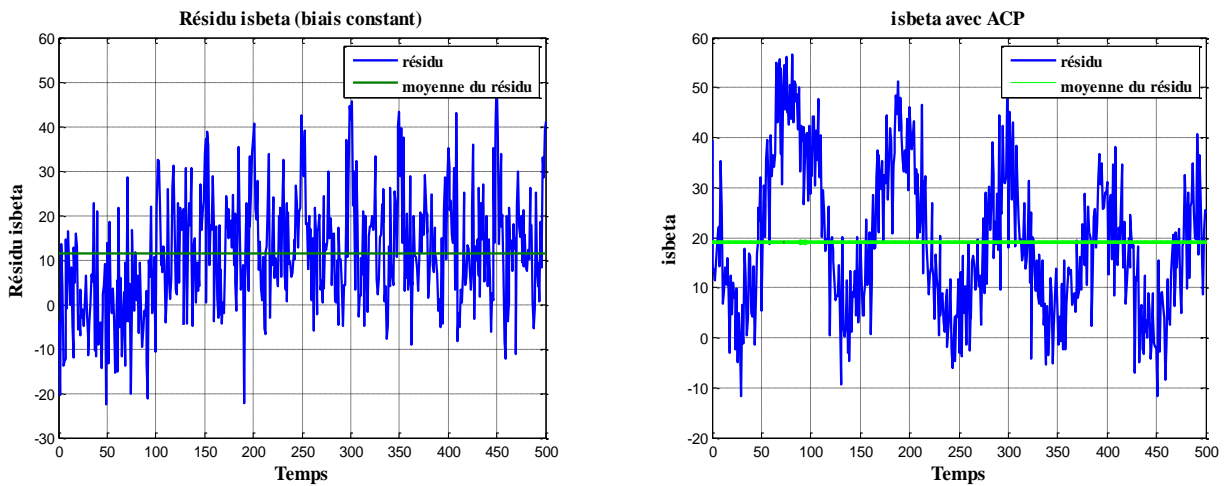


Fig.5.10 : Résidu du courant au stator sur l'axe beta

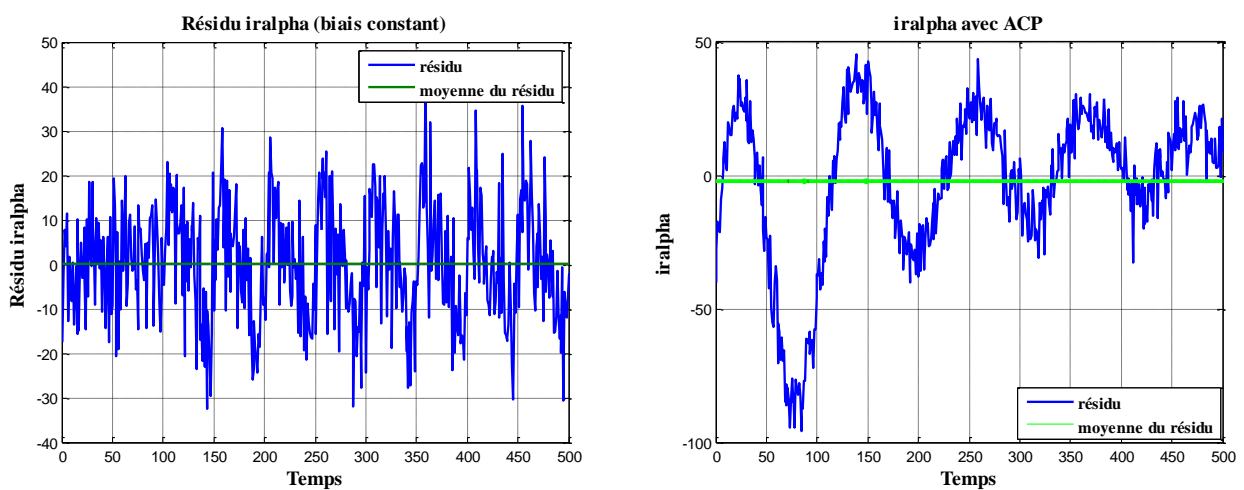


Fig.5.11 : Résidu du courant au rotor sur l'axe alpha

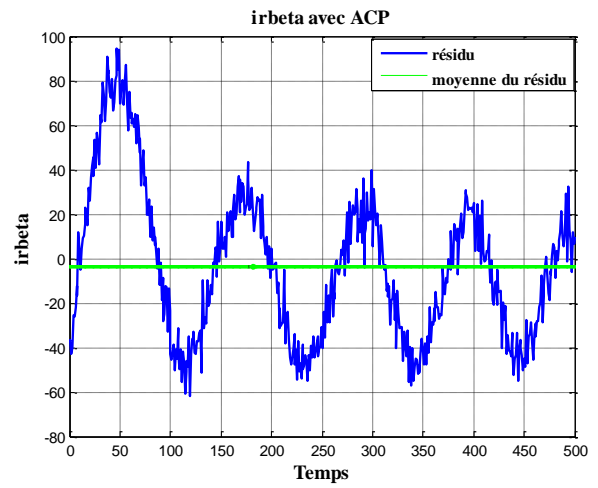
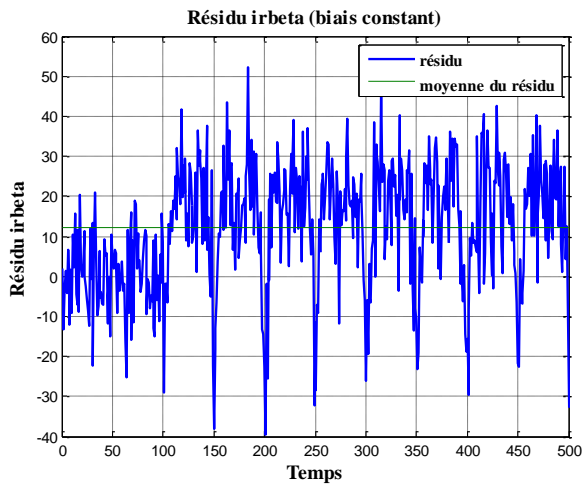


Fig.5.12 : Résidu du courant au rotor sur l'axe beta

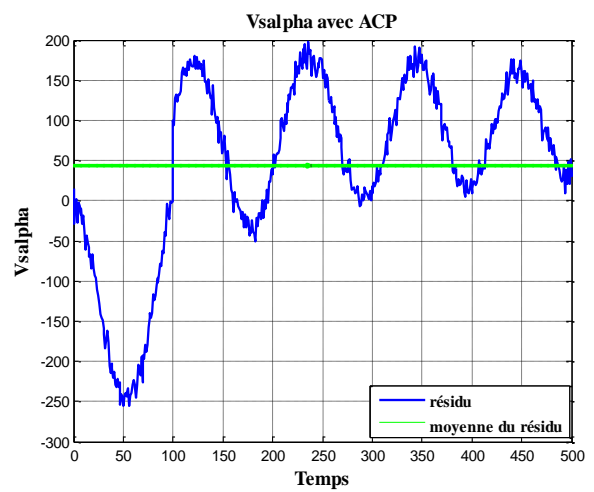
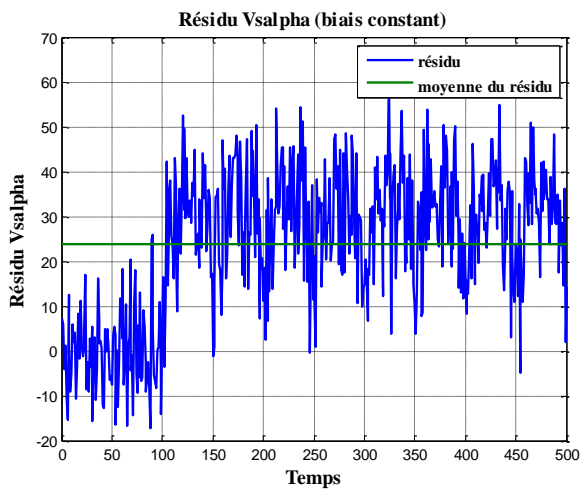


Fig.5.13 : Résidu de tension au stator sur l'axe alpha

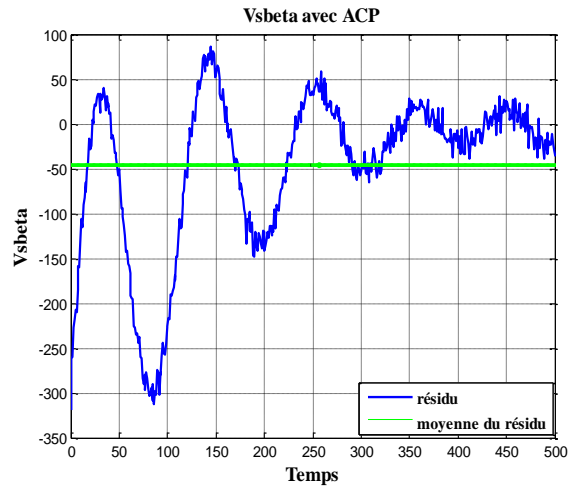
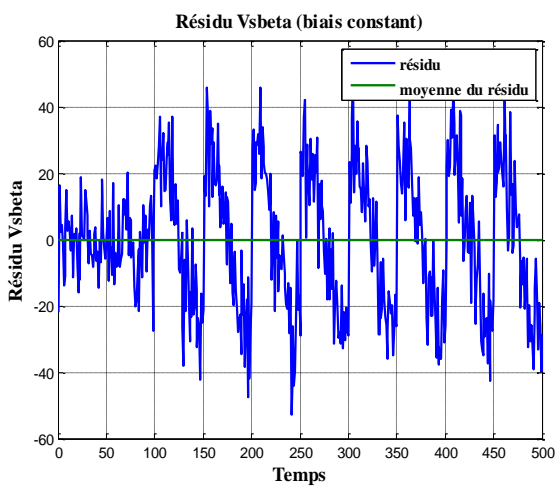


Fig.5.14 : Résidu de tension au stator sur l'axe beta

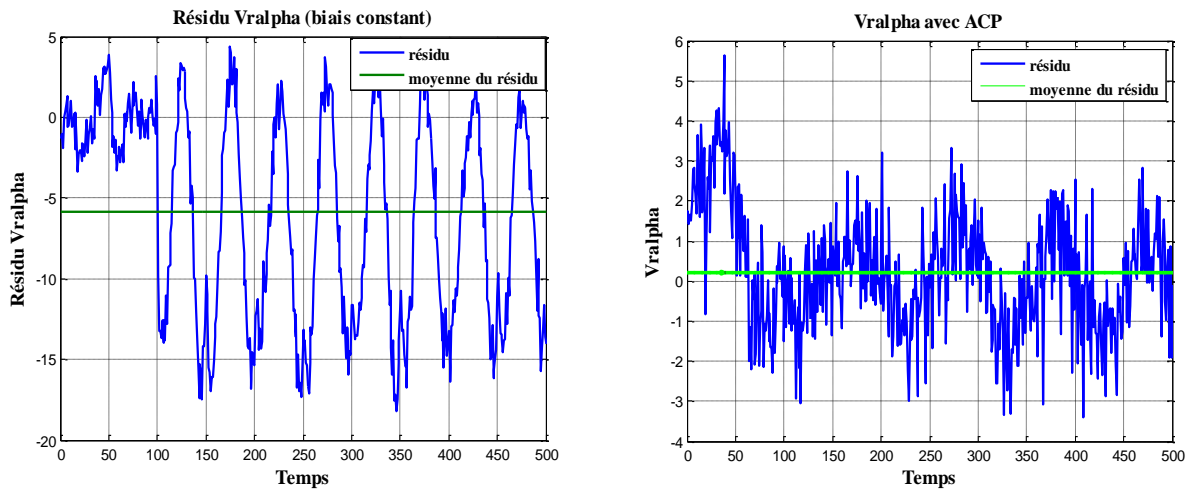


Fig.5.15 : Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha

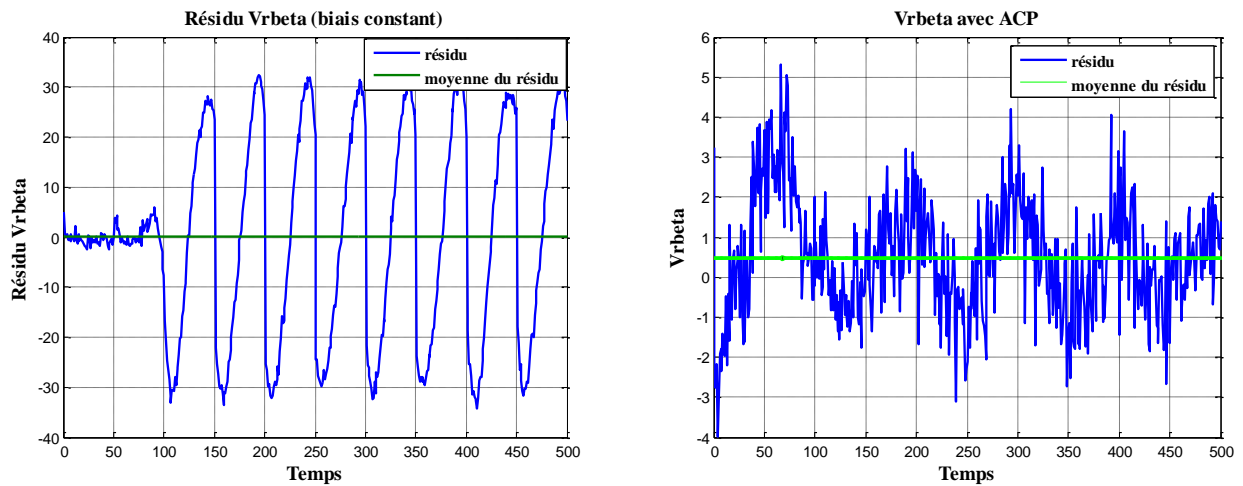


Fig.5.16 : Résidu de tension au rotor sur l'axe beta

On peut remarquer qu'à partir de l'instant 100 la valeur des résidus des variables à surveiller a changé d'amplitude, et devient plus importante pour la méthode polynomiale et commence à décroître pour la méthode ACP.

Avec la méthode polynomiale, les quatre variables,  $i_{s\beta}$ ,  $i_{r\beta}$ ,  $V_{sa}$  et  $V_{ra}$  sont suspectées de présence de biais, en effet la moyenne des résidus de ces variables est différente du zéro. Pour l'ACP, les variables  $i_{s\beta}$ ,  $V_{sa}$  et  $V_{s\beta}$  ont des moyennes de résidu différent de zéro, ceci signifie que les trois variables sont suspectées.

On constate que la méthode ACP présente beaucoup plus d'avantage que la méthode polynomiale, quatre variables suspectées pour la deuxième méthode et trois seulement pour l'ACP, il est plus facile de localiser les variables contenant de biais avec la méthode ACP.

Par conséquent, on peut utiliser les trois tests susmentionnés pour localiser les variables incriminées.



- **Test de Student**

Pour l'essai, on prend 500 mesures, les variables seront suspectes en présence de biais si chacune d'elles dépasse la valeur limite de 1,96 [BENNO6a]. Le tableau 5.1 suivant montre les résultats de ce test.

Tab.5.1 : Tableau des résultats du test de Student

Variabiles	$iS_{alpha}$	$iS_{beta}$	$iR_{alpha}$	$iR_{beta}$	$V_{S_{alpha}}$	$V_{S_{beta}}$	$V_{R_{alpha}}$	$V_{R_{beta}}$
<b>Limite (<math>&lt; 1,96</math>)</b>	0,2325	7,0628	0,3695	6,2021	25,5475	0,8283	17,0762	0,8435
<b>Variabiles suspectes</b>		X		X	X		X	

Le tableau 5.1 affiche les listes des variables suspectes de contenir un biais, on constate que les deux variables  $V_{S_{\alpha}}$  et  $V_{R_{\alpha}}$  ont plus les valeurs les plus grandes, cela veut dire que la probabilité que ces variables contiennent un biais est la plus grande [BENNO6c]. On peut utiliser le deuxième test sur les quatre variables suspectées pour s'assurer de bien localiser le(s) variable(s) contenant un biais.

- **Test de Page-Hinkley**

Ce test détecte la présence de biais sur l'une des quatre variables et localise les variables incriminées. Les figures 5.17 et 5.18 suivantes illustrent les résultats de la localisation avec le test de Page-Hinkley [BENNO6a]. En combinant les deux tests (Test du Student et Test de Page-Hinkley), on peut en déduire que la variable  $V_{S_{\alpha}}$  présente la probabilité le plus importante de contenir un biais.

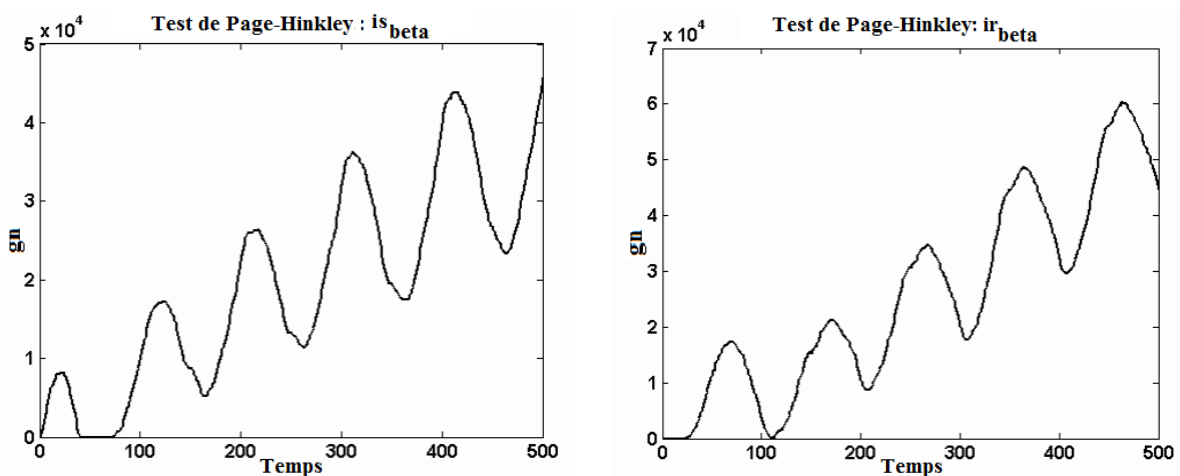


Fig. 5.17: Test de Page-Hinkley des variables courants ( $iS_{beta}$  et  $iR_{beta}$ )

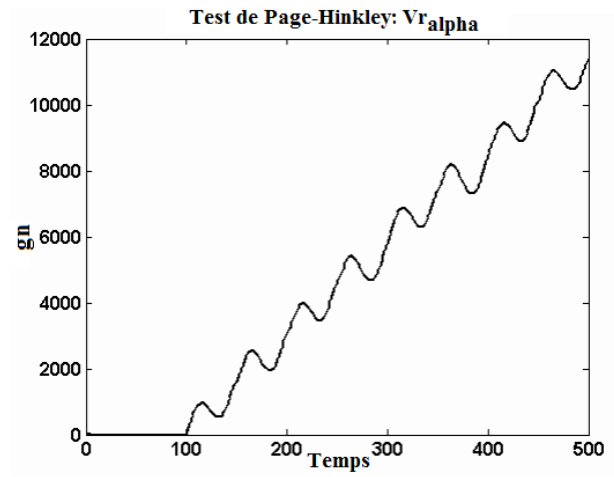
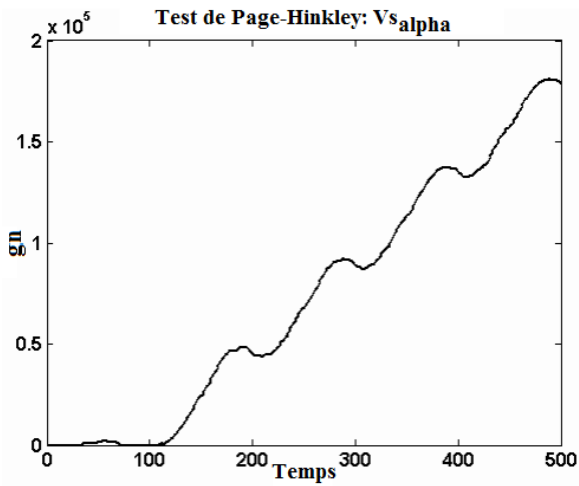


Fig. 5.18: Test de Page-Hinkley des variables tensions ( $V_{s\alpha}$  et  $V_{r\alpha}$ )

Sur les figures 5.18, on constate la présence d'un biais constant qui commence à partir de l'instant 100. On voit que la tension  $V_{r\alpha}$  peut contenir également un biais, car toutes les variables de la GADA sont fortement corrélées, en effet un défaut sur une variable peut engendrer un défaut sur une autre variable.

- Test avec l'indice de localisation  $L_i$

Avec l'analyse en composantes principales, la localisation de défauts par l'indice de localisation  $L_i$  permet de trouver les variables en défauts (figure 5.19). La figure présente deux simulations, la première figure présente les variables à surveiller de la GADA avec un indice de localisation non filtré tandis que la deuxième est obtenue avec l'indice de localisation filtré.

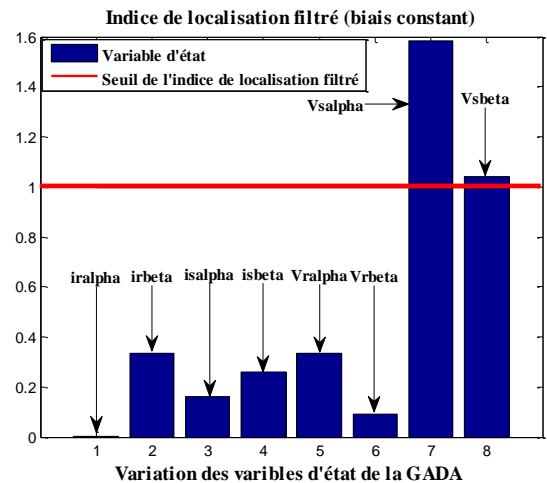
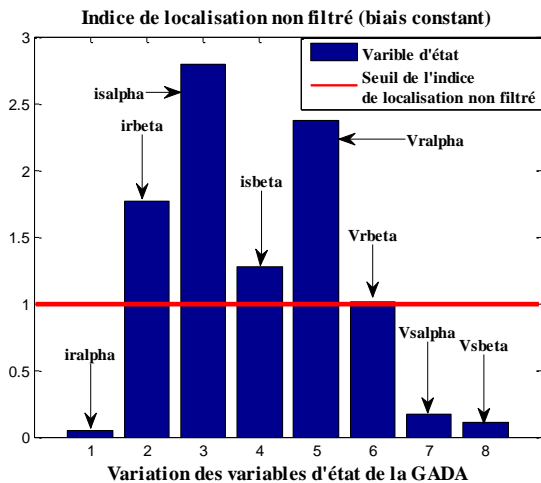


Fig. 5.19: Localisation des variables d'état contenant de biais

Les variables sont considérées en défaut si elles dépassent le seuil de l'indice de localisation, on constate que pour la localisation non filtrée, quatre variables sont susceptibles de contenir un biais constant dont  $ir_{beta}$ ,  $is_{alpha}$ ,  $is_{beta}$  et  $Vr_{alpha}$ , pour améliorer la qualité de simulation et de localisation de défauts, on utilise le filtre EWMA pour éliminer les fausses alarmes [RAMA12b] et [RAMA13].

Ainsi, on voit sur la deuxième figure que la tension au stator sur la phase alpha présente un risque important de contenir un biais. En comparant les deux méthodes de localisation on constate et on peut conclure qu'avec la méthode ACP, la localisation de variable en défaut est beaucoup plus évidente que la méthode polynomiale.

### 5.3.2 Essais avec biais évolutif

La comparaison des deux méthodes avec le biais constant est faite. Pour confirmer ou infirmer la conclusion avec le biais constant, on considère maintenant un biais évolutif d'ordre 1 ( $\delta(t)=t$ ). Ce biais est ajouté sur la tension au stator sur la phase alpha à partir de la 100<sup>ème</sup> mesure. Les conditions de simulations sont celles utilisées par Bennouna et al [BENN06c] :

- Les courants et les tensions sont estimés avec un ordre polynomiale  $s=5$ ,
- La vitesse de rotation de la GADA est de  $1350 \text{ tr/mn}$ ,
- Le nombre de mesure considéré est égal à  $500$ ,
- La période d'échantillonnage  $h=0.2\text{ms}$ .

Les figures 5.20 à 5.27 suivantes illustrent les résultats de simulation de la GADA avec la méthode polynomiale à gauche et la méthode ACP à droite.

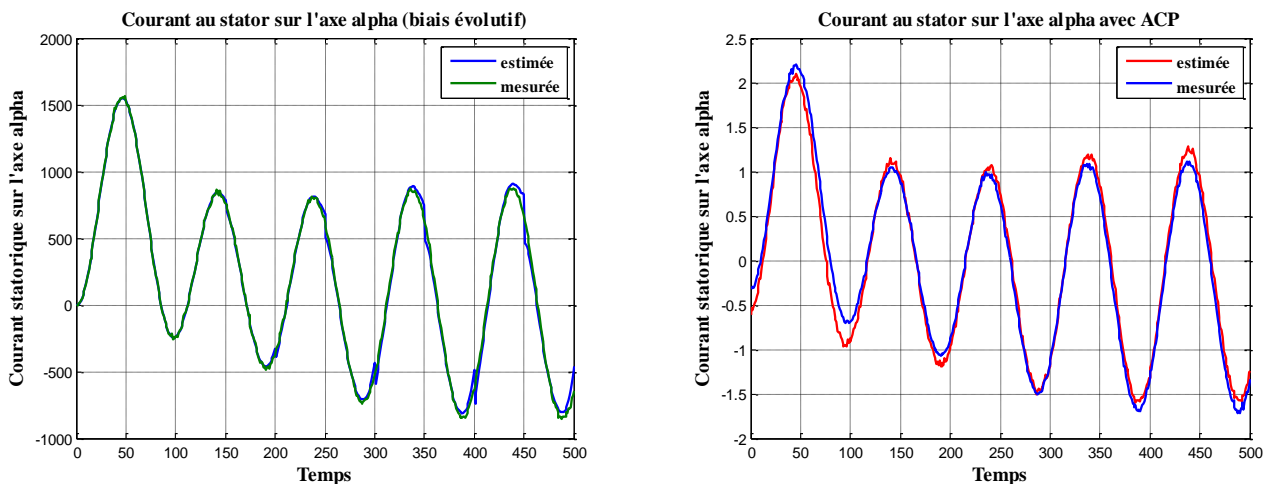


Fig.5. 20 : Courant au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif

On constate que les variables estimées ne suivent plus le profil des variables mesurées à partir de la mesure 100. On remarque aussi que les deux méthodes présentent les mêmes allures du courant (figure 5.20 à figure 5.23).

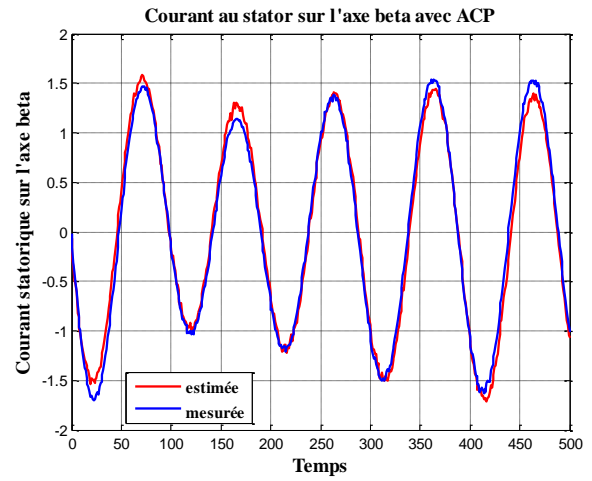
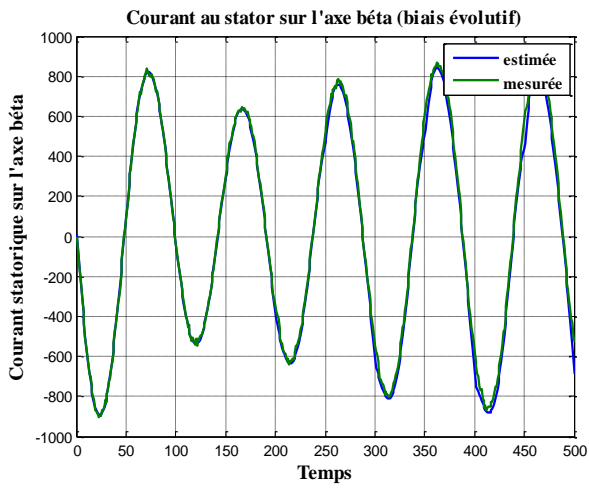


Fig.5. 21 : Courant au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif

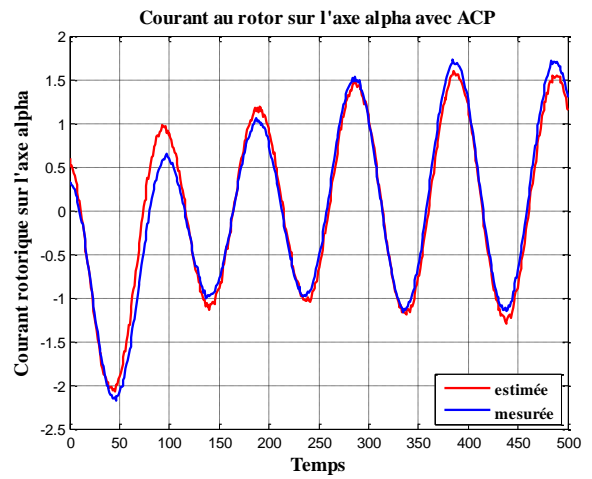
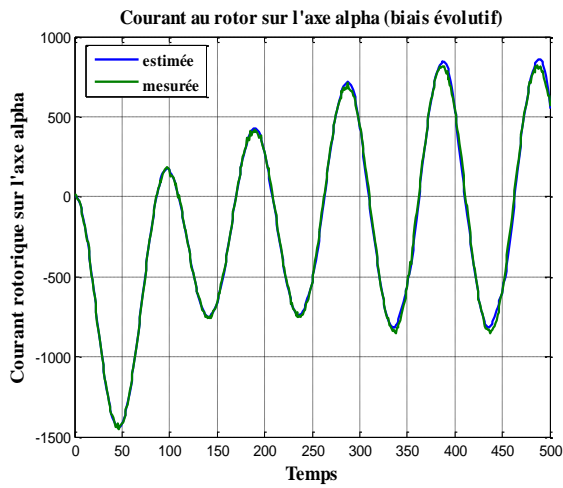


Fig.5. 22: Courant au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif

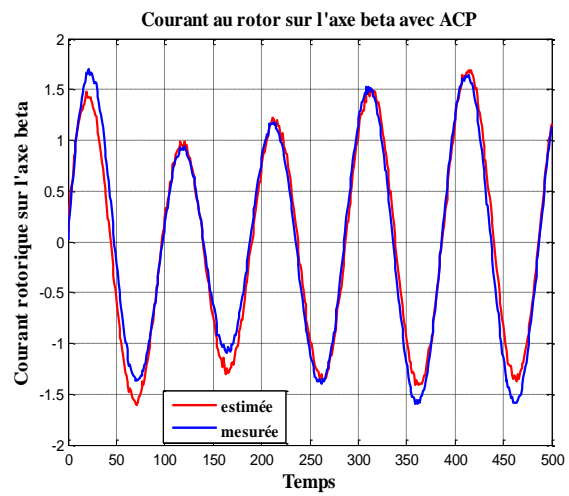
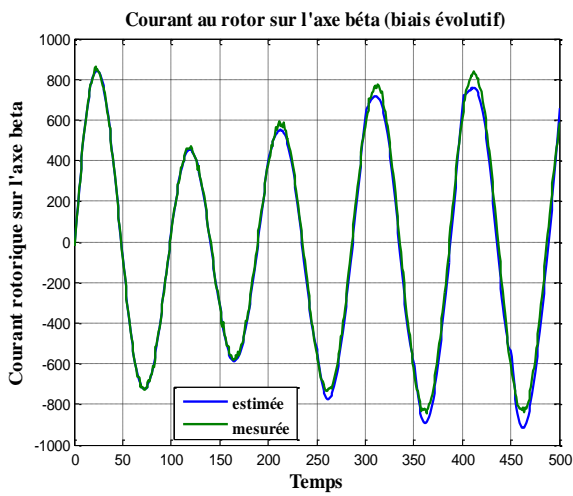


Fig.5.23: Courant au rotor sur l'axe beta avec un biais évolutif

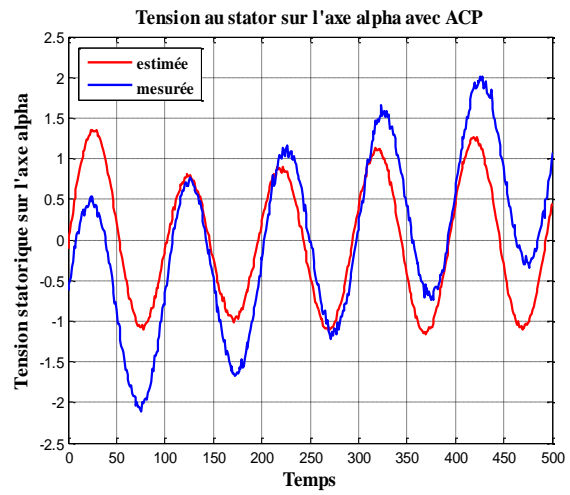
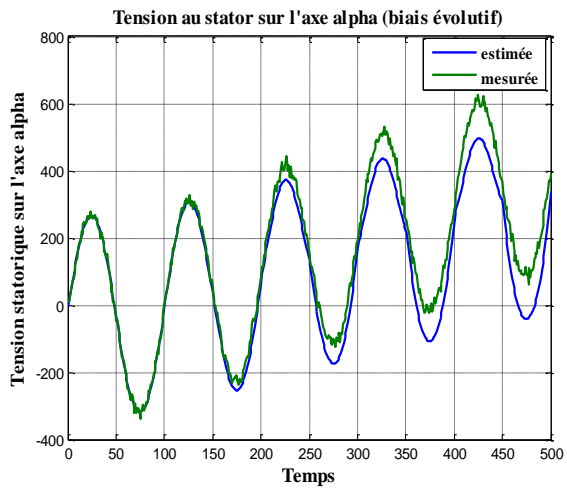


Fig.5.24: Tension au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif

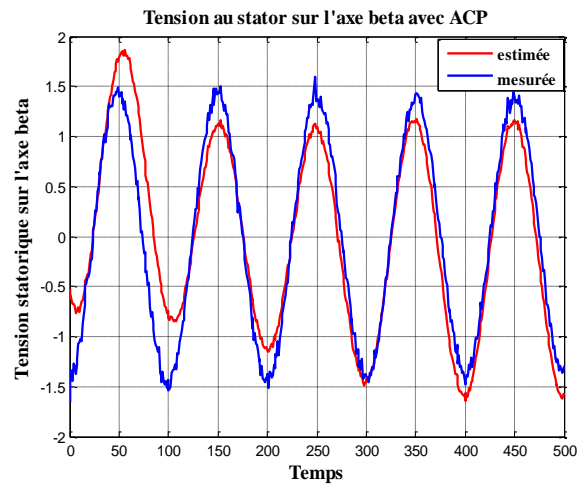
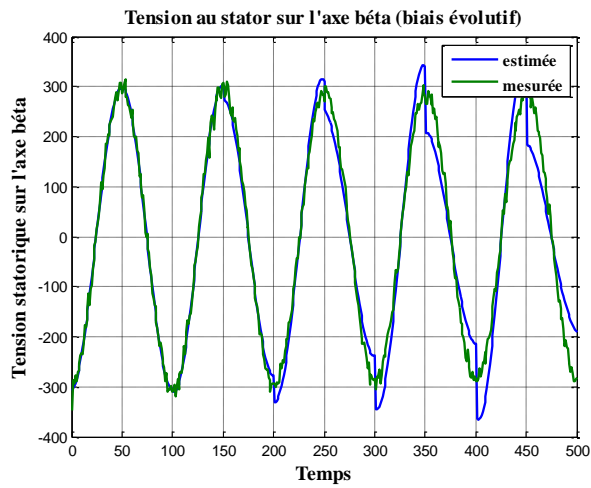


Fig.5.25: Tension au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif

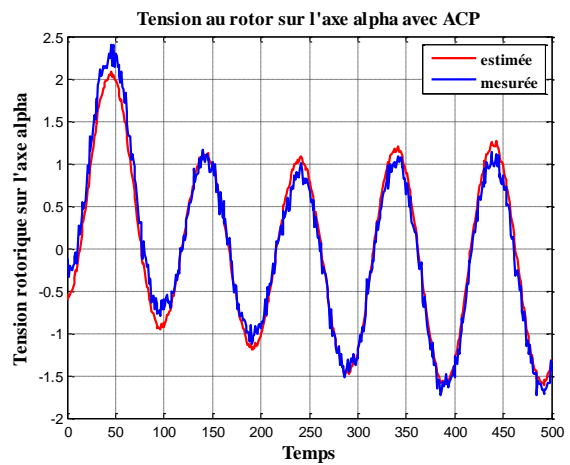
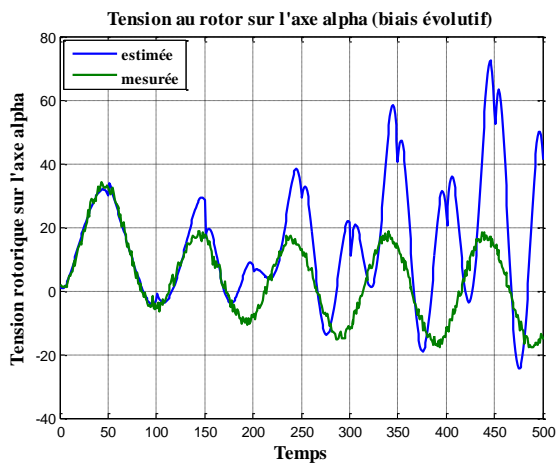


Fig.5.26: Tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif

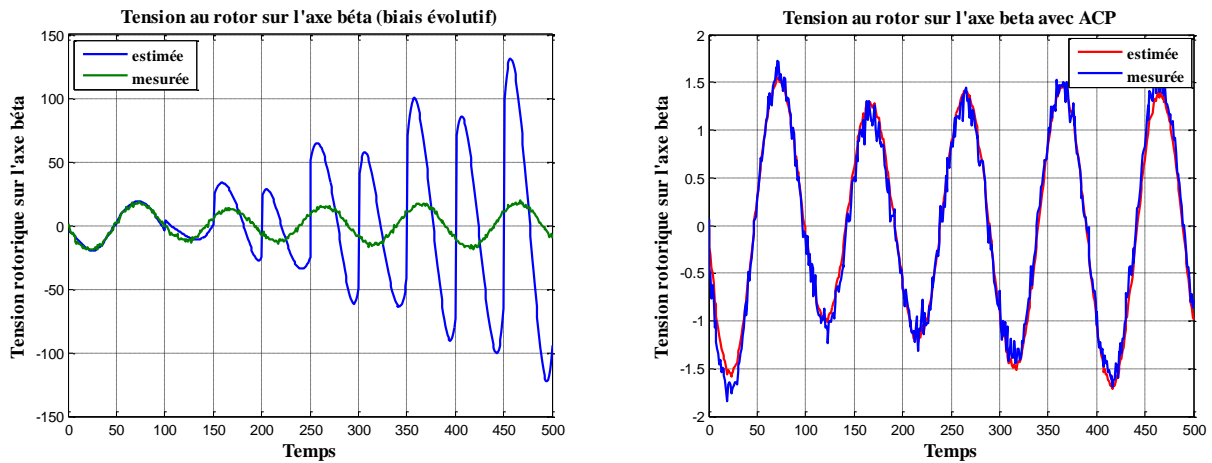


Fig.5.27: Tension au rotor sur l'axe beta avec un biais évolutif

Par contre les allures des tensions sont différentes, la méthode polynomiale affiche de façon claire la présence d'un biais à partir la mesure 100 (figure 5. 24 à figure 5.26), tandis que la méthode ACP montre la présence d'un biais pour les tensions  $V_{s_{alpha}}$  et  $V_{s_{beta}}$  (figure 5. 24 et figure 5.25).

Les allures de la tension au rotor sur l'axe alpha et sur l'axe beta montrent deux allures différentes, on voit sur les courbes de tension estimée la présence de bruits de faible amplitude (figure 5.26 et figure 5.27).

Pour continuer la comparaison et pour détecter la présence de biais évolutif sur les variables d'état, on peut tracer les résidus et la moyenne du résidu de chaque variable. Les figures (figure 5.28 à figure 5.35) suivantes donnent un aperçu des résidus des différentes variables avec le biais évolutif :

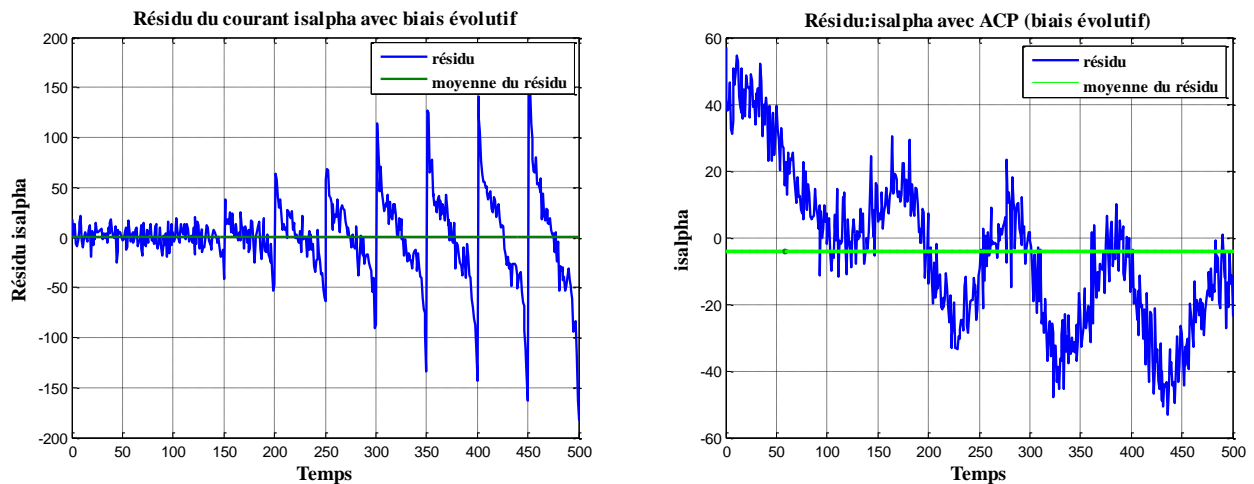


Fig. 5.28: Résidu du courant au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif

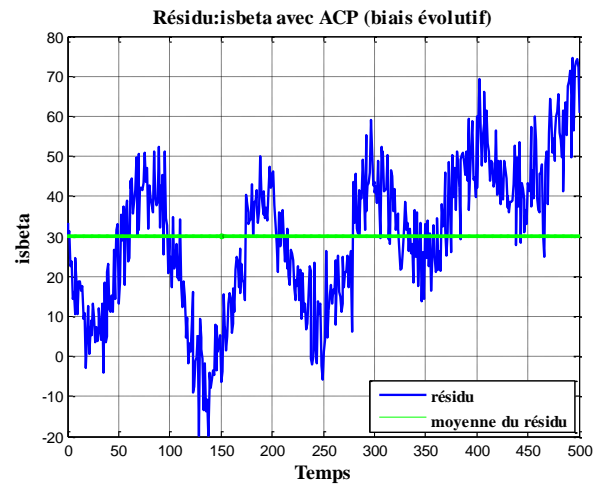
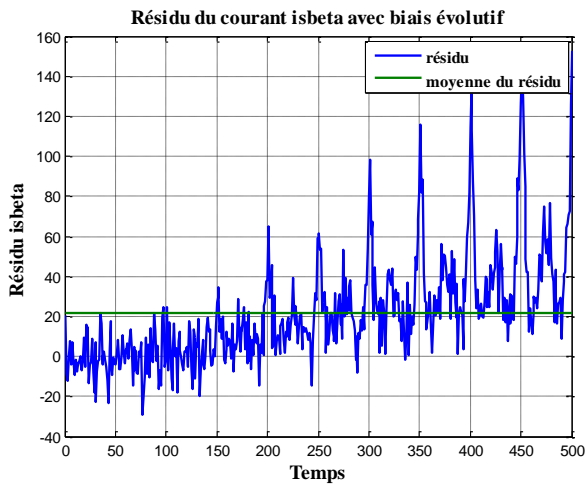


Fig. 5.29: Résidu du courant au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif

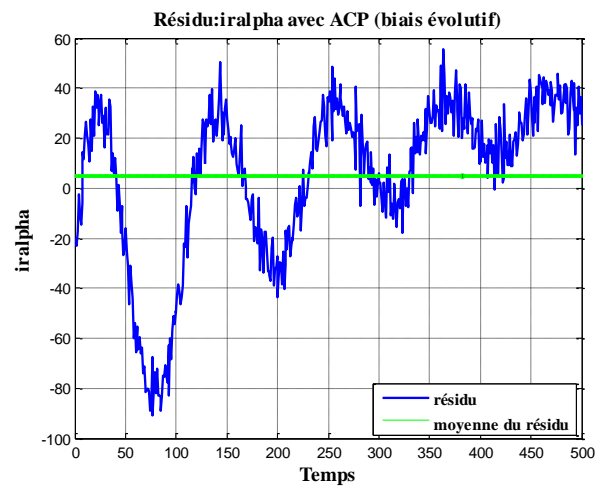
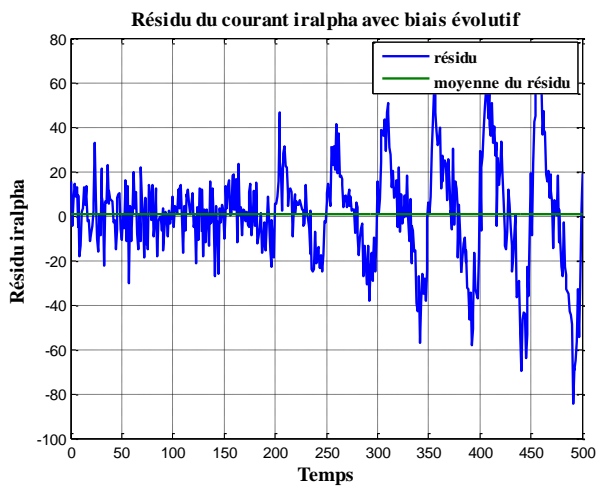


Fig. 5.30: Résidu du courant au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif

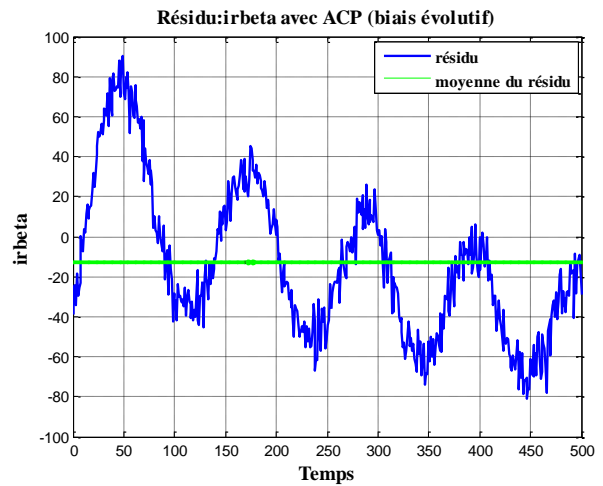
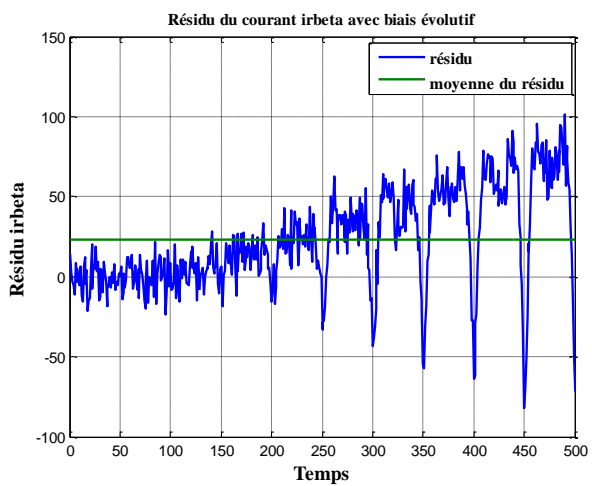


Fig. 5.31: Résidu du courant au rotor sur l'axe beta avec un biais évolutif

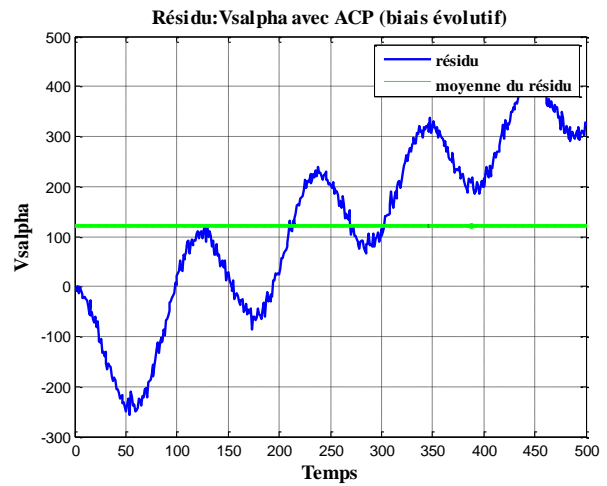
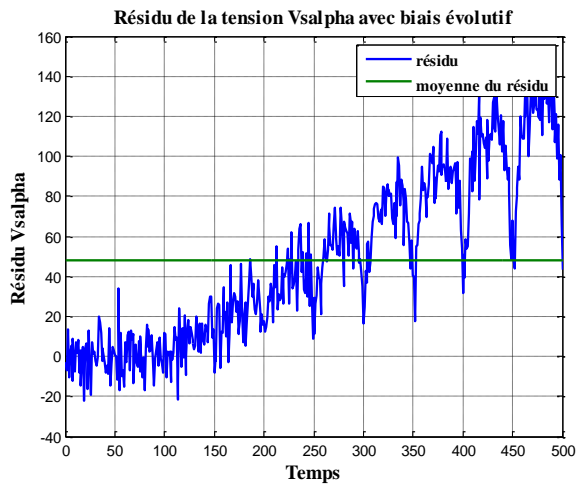


Fig. 5.32: Résidu de tension au stator sur l'axe alpha avec un biais évolutif

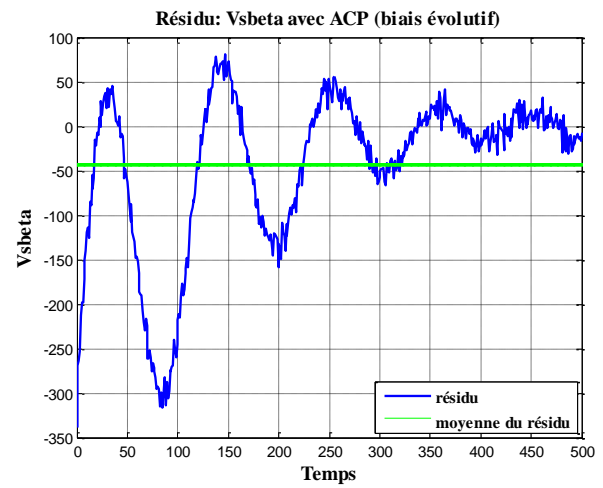
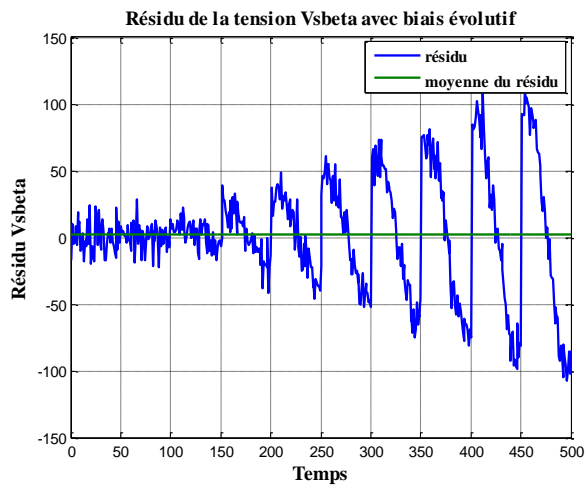


Fig. 5.33: Résidu de tension au stator sur l'axe beta avec un biais évolutif

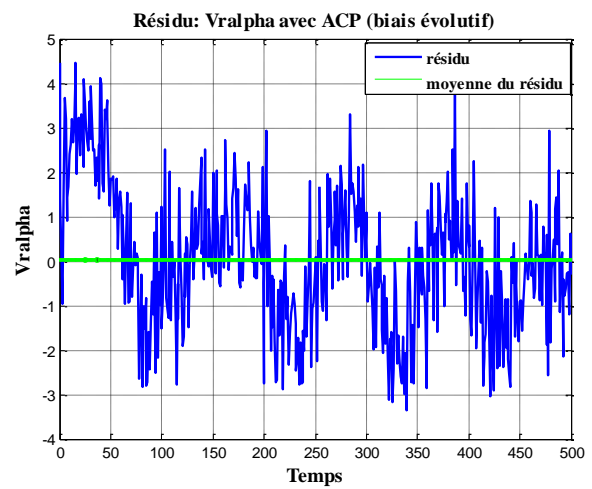
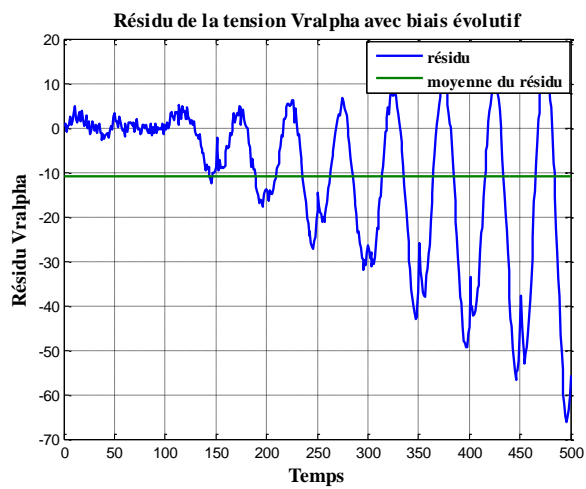


Fig. 5.34: Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif



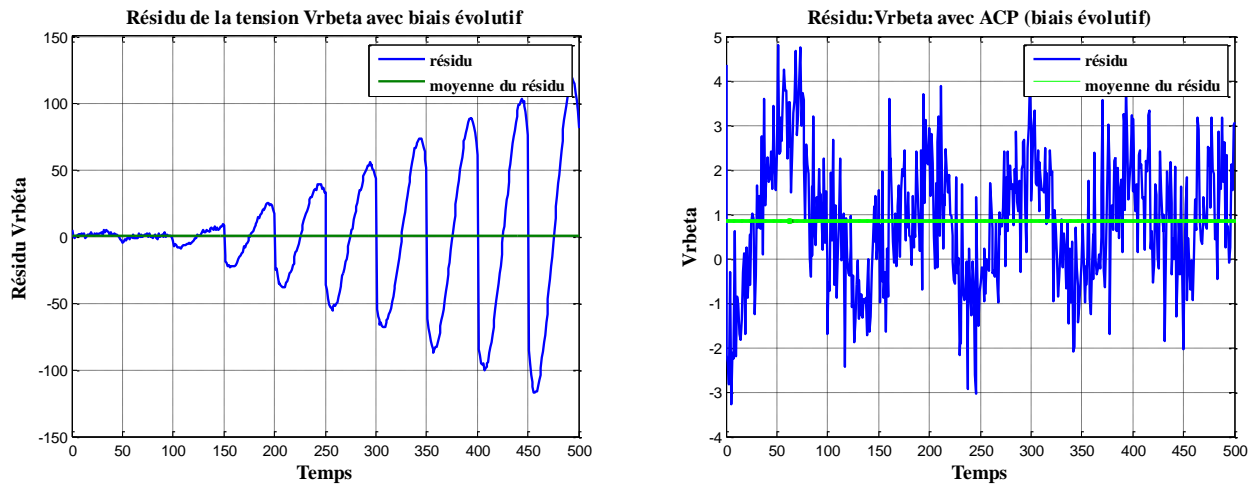


Fig. 5.35: Résidu de tension au rotor sur l'axe alpha avec un biais évolutif

Comme dans le cas d'un biais constant, avec la méthode polynomiale, on peut remarquer que quatre variables peuvent contenir un biais ( $i_{s\beta}$ ,  $i_{r\beta}$ ,  $V_{s\alpha}$  et  $V_{r\alpha}$ ). En effet, leur valeur moyenne est différente de zéro. Pour la méthode ACP, les variables suspectes sont les suivantes pour les courants :  $i_{s\beta}$  et  $i_{r\beta}$  et pour les tensions :  $V_{s\alpha}$ ,  $V_{s\beta}$  et  $V_{r\beta}$ .

Les valeurs moyennes de ces cinq variables sont éloignées de la valeur zéro ; ces cinq variables sont donc soupçonnées de contenir un biais évolutif.

On peut conclure que les deux méthodes détectent souvent les mêmes variables suspectées.

On constate aussi que les résidus avec le biais évolutif ont des valeurs plus importantes que dans le cas de biais constant. Pour bien localiser les variables d'état incriminées, il est important d'utiliser les trois tests statistiques. Les deux premiers tests sont rattachés à la méthode polynomiale et le troisième à la méthode ACP.

#### - Test de Student

Comme dans le cas d'un biais constant, le nombre de mesure des essais est fixé à 500. Les variables sont suspectées de contenir un biais si la variable correspondante dépasse la valeur limite de 1,96 fixée par le test de Student. Pour toutes les variables d'état, le tableau 5.2 suivant donne les résultats de ce test :

Tab.5.2: Tableau des résultats du test de Student avec de biais évolutif

Variables	$i_{s\alpha}$	$i_{s\beta}$	$i_{r\alpha}$	$i_{r\beta}$	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$	$V_{r\alpha}$	$V_{r\beta}$
Limite	0,1296	18,9775	0,2590	16,6770	25,2739	1,4085	14,4836	0,0473
Variables Suspectées		X		X	X		X	

Les quatre variables ( $i_{s\beta}$ ,  $i_{r\beta}$ ,  $V_{s\alpha}$  et  $V_{r\alpha}$ ), dépassent la valeur limite du test de Student, alors on peut confirmer qu'elles sont suspectées de contenir un biais.

- **Test de Page-Hinkley**

Le test de Page-Hinkley est la suite du test de Student, on utilise ce test sur les résidus des variables d'état suspectées par le test de Student. Sur les quatre variables incriminées, on détecte la présence d'un biais sur la variable  $V_{s\alpha}$ . La figure 5.35 et la figure 5.36 suivantes illustrent les résultats de simulation avec le test de Page-Hinkley [BENN06a].

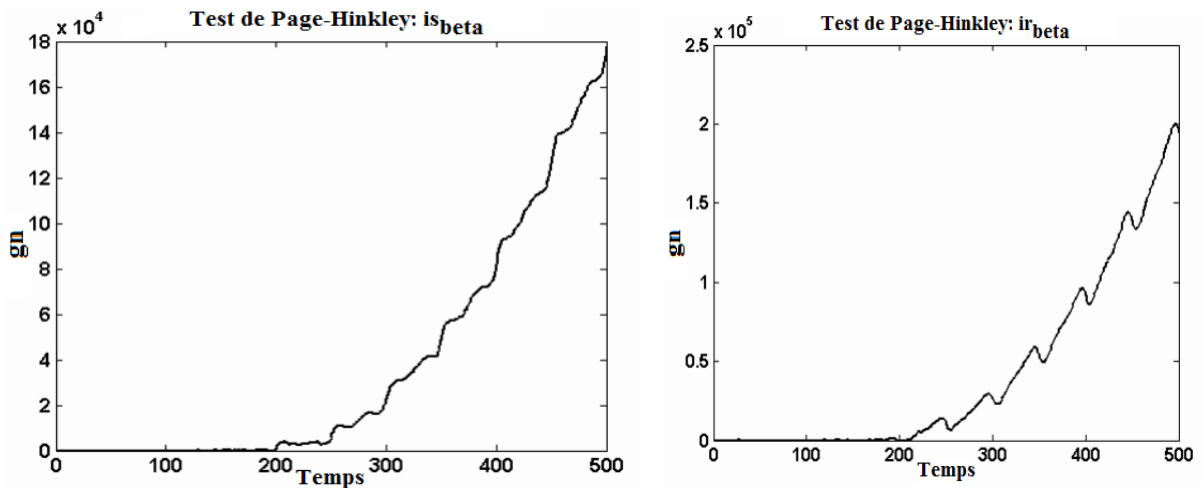


Fig. 5.36: Test de Page-Hinkley des variables courants ( $i_{s\beta}$  et  $i_{r\beta}$ ) avec de biais évolutif

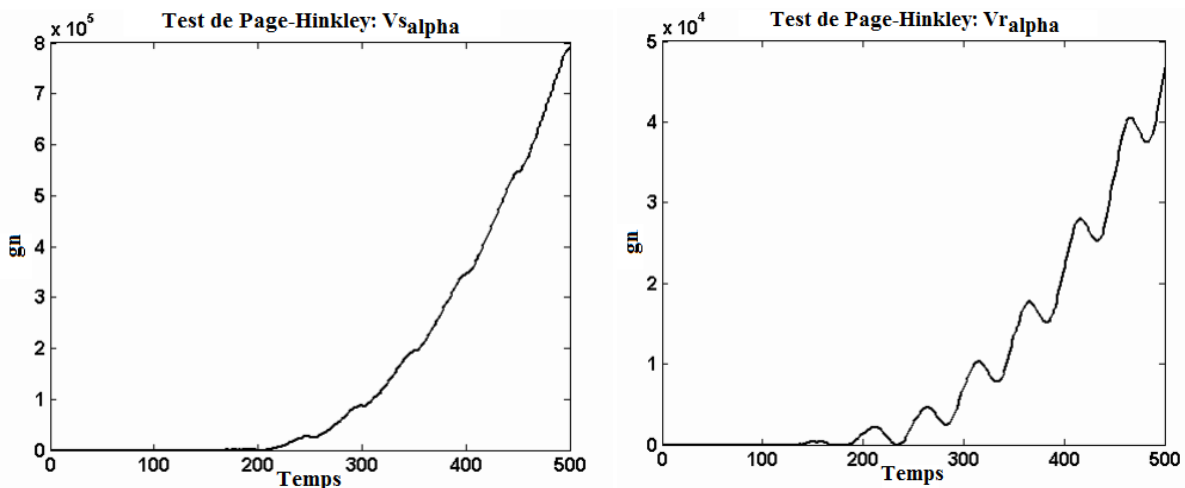


Fig. 5.37: Test de Page-Hinkley des variables tensions ( $V_{s\alpha}$  et  $V_{r\alpha}$ ) avec de biais évolutif

En combinant les deux tests, on peut dire qu'avec la méthode polynomiale, c'est la tension au stator sur la phase alpha, ( $V_{s\alpha}$ , de la figure 5.37), qui présente le risque le plus important de contenir un biais. En vue de comparer la méthode polynomiale avec la méthode ACP, on

propose de réutiliser la localisation des variables incriminées avec l'indice de localisation  $L_i$  déjà appliqué pour le biais constant.

- **Test avec l'indice de localisation  $L_i$**

On rappelle qu'une variable d'état est en défaut (ou contient un biais) si l'amplitude de l'histogramme de ladite variable dépasse le seuil de l'indice de localisation. Comme pour le biais constant, pour éliminer les fausses alarmes et pour améliorer la qualité de localisation, le filtre EWMA a été utilisé. La figure 5.36 suivante présente l'état des variables à surveiller de la GADA. La première figure montre la localisation des variables non filtrées tandis que la deuxième figure illustre la localisation avec le filtre EWMA.

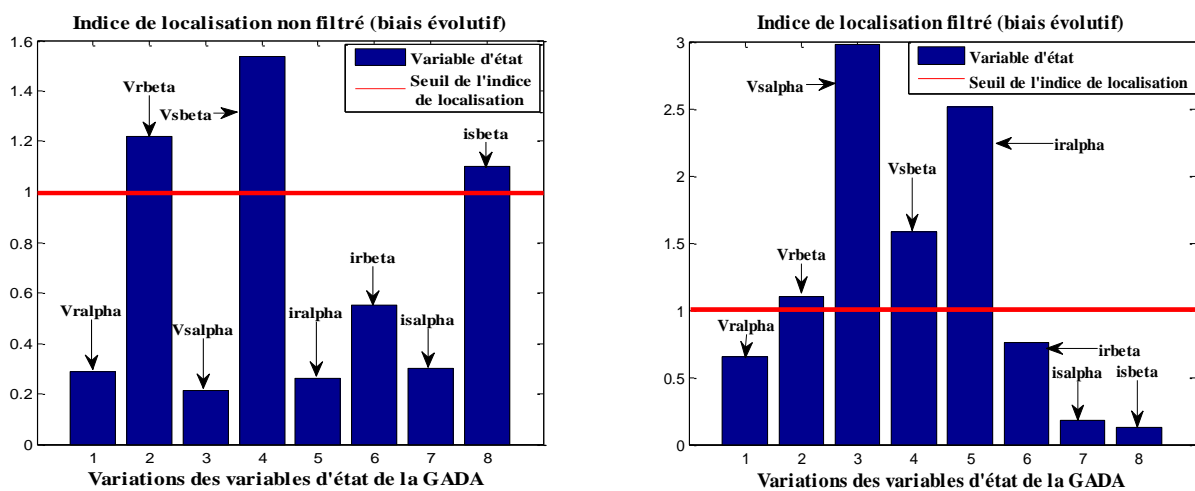


Fig. 5.38 : Localisation des variables d'états en défauts

On constate, après l'utilisation du filtre EWMA, que la variable de la tension au stator sur la phase alpha contient un biais évolutif. Les tensions  $V_{r_{beta}}$ ,  $V_{s_{beta}}$  et le courant  $i_{r_{alpha}}$  dépassent le seuil de l'indice de localisation alors ces trois variables peuvent contenir un biais. Comme toutes les variables de la GADA sont fortement corrélées, par conséquent, la présence d'erreur sur une variable engendre des suspicions d'erreurs sur les autres variables.

**5.3.3 Conclusion**

En vue d'une étude comparative de deux méthodes de détection de défaut, dont l'estimateur d'état et l'analyse en composantes principales, dans ce chapitre, on a présenté la théorie et la méthode de l'estimation d'état, pour détecter la présence de biais sur la GADA. Deux types de biais ont été étudiés dans ce chapitre dont le biais statique et le biais évolutif. Le test de Student et le test statique de Page-Hinkley sont utilisés avec l'approche polynomiale pour localiser les variables d'états qui contiennent

un biais. La méthode ACP est complétée avec l'indice de localisation  $L_i$  et le filtre EWMA pour localiser les variables suspectées.

On peut conclure que la méthode polynomiale est plus sensible pour la détection de biais. Par contre, en utilisant les résidus et la moyenne des résidus, la méthode ACP est plus sensible à la détection de défauts. Pour la localisation des variables suspectes, l'utilisation de l'indice de localisation est plus performante que les deux tests statistiques (Test de Student et test de Page-Hinkley).

## 5.4 REFERENCES DU CHAPITRE 5

- [BAGA08] BAGAJEWICZ M. J., NGUYEN D. Q., «Stochastic-based accuracy of data reconciliation estimators for linear systems», *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 32, pp. 1257-1269, 2008.
- [BAGA97] BAGAJEWICZ M. J., JIANG Q., «Integral approach to plant linear dynamic reconciliation», *AIChE Journal*, Vol. 43, pp. 2546-2558, 1997.
- [BASSE87] BASSEVILLE M., «Detecting Changes in Signals and Systems», publication interne de l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA), 1987.
- [BENN06a] BENNOUNA O., «Diagnostic des systèmes complexes application à un système à énergie renouvelable de type éolien», Rapport de thèse de doctorat de l'Université de Corse, 2006.
- [BENN06b] BENNOUNA O., HERAUD N., MALASSE O., POGGI P., NOTTON G., «Data reconciliation & gross error detection of the generator of a wind turbine», 8th wind energy conference, DEWEK'06, Bremen, Germany, 2006.
- [BENN06c] BENNOUNA O., HERAUD N., RODRIGUEZ M., CAMBLONG H., «Gross error detection applied to a wind turbine», *Computational Engineering in Systems Applications*, CESA'2006, Pékin, Chine 2006.
- [BENN06d] BENNOUNA O., HERAUD N., CRISTOFARI C., MUSELLI M., NOTTON G., POGGI P., «Gross error detecting of the generator of a wind turbine», The first International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area, IEEE ISEIM, Corte, France, 2006.
- [BHUS00] BHUSHAN M., RENGASWAMY R., «Design of sensor network based on the signed directed graph of the Process for efficient fault diagnosis», *Ind. Eng. Chem. Res.*, pp. 999, 2000.
- [CHEN84] CHEN H. S., STADTHERR M. A., «Enhancements of Han -Powell Method for Successive Quadratic Programming», *Computer Chemical Engineering.*, Vol. 8, pp. 229-234, 1984.

- [DARO91] DAROUACH M., ZASADZINSKI M., «Data reconciliation in generalized linear dynamic systems», American Institute of Chemical Engineering Journal, Vol. 37, pp. 193, 1991.
- [DIBO05] ALHAJ DIBO M., «Validation de données et diagnostic des systèmes incertains à l'aide de l'analyse par intervalle», Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [FRAN09] FRANCKEN J., MAQUIN D., BELE B., RAGOT J., «Réconciliation de données robuste et surveillance d'un convertisseur à oxygène», PENTOM09, Autrans, 2009.
- [GERK09] GERKENS C., «Optimal synthesis of sensor networks», Thesis PhD, Laboratoire d'Analyse et de Synthèse des Systèmes Chimiques, Université de Liège, 2009.
- [HALL09] HALLIGAN R.G., JAGANNATHAN S., «PCA Based Fault isolation and prognosis with application to Water Pump, paper1, thesis, Fault detection and prediction with application to rotating machinery», Missouri University of Science and Technology, 2009.
- [HERA91] HERAUD N., MAQUIN D., RAGOT J., «Multilinear Balance Equilibration: Application to a Complex Metallurgical Process», Min. Metall. Proc., Vol.11, pp. 197 - 294, 1001.
- [ISER06] ISERMANN R., «Fault-Diagnosis Systems - An Introduction From Fault Detecting to Fault Tolerance», Springer, ISBN- 10 3 - 540 241 12 - 4, 2006.
- [KNEP80] KNEPER J.C., GORMAN J. W., «Statistical Analysis of Constrained Data Sets», AIChE Journal, Vol. 26, pp. 260-264, 1980.
- [KORB11] KORBEL M., «On-line steady-state data reconciliation for advanced cost analysis in the pulp and paper industry», Thesis PhD, Montreal University, 2011.
- [KUEH61] KUEHN D.R., DAVIDSON H., «Computer Control II, Mathematics of Control», Chem. Eng. Progress, Vol.57, pp. 44-47, 1961.
- [MACD80] MACDONALD R. J., HOWAT C. S. «Data reconciliation and parameter estimation in plant performance analysis», AIChE Journal, Vol. 34, pp. 1-8, 1980.

- [MADR92] MADRON F., «Process plant performance: Measurement and data processing for optimization and retrofits», Chichester, West Sussex, Ellis Horwood Limited Co., England 1993.
- [MOHA12] MOHAMMADNIA V., SALAHSHOOR K., «A new comprehensive sensor network design methodology for complex nonlinear process plants», *Journal Chem. Chem. Eng.*, Vol. 31, N°3, pp. 145-156, 2012.
- [PONZ98] PONZONI I., SANCHEZ M. C., BRIGNOLE N. B., «A new hybrid approach for instrumentation design of chemical plants », *Computation mechanics, New Trends and Applications*, pp. Barcelone, Spain 1998.
- [RAGO06] RAGOT J., MAQUIN D., «Validation et réconciliation de données. Approche conventionnelle, difficultés et développements», *SIM*, 2006.
- [RAGO90] RAGOT J. GAROUACH M. MAQUIN D. BLOCH G., «Validation de données et diagnostic», Hermès, Paris, 1990.
- [RAMA11] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HERAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J. M., «Principal Components Analysis Method: Application in Electrical Machines Diagnosis», 8<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Noordwykerhout, Pays Bas, 2011.
- [RAMA12a] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HÉRAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Performances of the PCA method in electrical machines diagnosis using Matlab», *Intech, MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, vol.1, ISBN 979-953-307-774-0, 9, p. 69-88, 2012.
- [RAMA12b] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HÉRAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «On the Sensitivity of Principal Components Analysis Applied in Wound Rotor Induction Machines Faults Detection and Localization», *International Journal on Energy Sciences (IJES)*, Vol.2, pp. 262-271, 2012.
- [RAMA13] RAMAHALEOMIARANTSOA J. F., HÉRAUD N., SAMBATRA E. J. R. and RAZAFIMAHENINA J.M., «Faults diagnosis of wind energy conversion

chain based on doubly fed induction generator by principal components analysis method », IEEE, IRSEC'13 Ouarzazate, Morocco, 2013.

[STAN77] STANLEY G. M., MAH R. S. H., «Estimation of flows and temperatures in process networks», AIChE Journal, Vol. 23, pp. 642-650, 1977.

[ULLR10] ULLRICH C., HEYEN G., and GERKENS C., «Influence of the moving window parameters on a posteriori standard deviations of estimated variables in dynamic data reconciliation», In proceeding of Escape 20 Congress, Ischia, Italy, 2010.

[VRIE02] VRIELYNCK B., CLOSON H., «Les process mieux maîtrises grâce à la réconciliation des données», Projet Belsim, Solutions, Contrôle de Process, Mesures 741, pp. 30-34, 2002.



# Conclusion Générale & Perspectives

## Conclusion générale

L'objectif de cette thèse a été d'établir une méthode de surveillance d'une éolienne, notamment de sa génératrice asynchrone doublement alimentée en utilisant la méthode d'Analyse en Composantes Principales. La surveillance de ces processus complexes demande une supervision efficace pour avoir un rendement énergétique optimal du système. Par conséquent, la méthode proposée doit répondre aux exigences, aux attentes et aux objectifs de la supervision du système automatisé parmi lesquels la détection, la localisation et l'identification rapide des défauts capteurs ou des défauts systèmes. Pour arriver à ces objectifs, un aperçu sur les notions de sûreté, de surveillance et de diagnostic de systèmes complexes a été fait. Dans ce premier chapitre, on a détaillé les différentes procédures de la surveillance et du diagnostic des actionneurs électriques. On s'est orienté vers la surveillance des actionneurs électriques et en particulier de la machine électrique en se basant sur deux approches : l'approche à base de modèle et l'approche sans modèle a priori. Ces deux méthodes ont été détaillées et on a choisi l'approche à base de modèle pour générer les données des variables d'état de la machine à surveiller.

Ensuite, on a détaillé dans le deuxième chapitre de cette thèse les éléments constituant la machine asynchrone à rotor bobiné (MARB) puis continué par l'élaboration du modèle magnétiquement couplé de la MARB [RAZI02]. Des résultats de simulation en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant de la MARB sous MATLAB/SIMULINK ont été présentés. Le défaut considéré est l'augmentation de la résistance des enroulements statoriques ou enroulements rotoriques par rapport à la normale, à l'instant initial de fonctionnement ou à un instant quelconque de fonctionnement. Avec la représentation temporelle des variables d'état en défaut, il est difficile de détecter la présence des défaillances sur les enroulements rotoriques ou enroulements statoriques par cette méthode. Seules les deux variables d'état dont le courant rotorique et la vitesse angulaire renferment plus d'informations sur le comportement de la machine en présence de défauts. Par contre, les allures simulées avec la transformation mathématique des variables d'état, ont montré que les variations du couple électromagnétique par rapport à vitesse de rotation de l'arbre montrent clairement que le comportement de la machine est en fonctionnement défaillant. La fin de ce chapitre a été axée sur le fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone à rotor bobiné. Nous avons montré que l'on peut faire fonctionner la Machine

Asynchrone à Rotor Bobiné (MARB) en Génératrice Asynchrone Doublement Alimentée (GADA). Ce type de génératrice est utilisé pour le système éolien étudié.

Le troisième chapitre de cette thèse est orienté sur la modélisation mathématique de la GADA. La GADA choisie est celle utilisée par Camblong, pour minimiser l'impact des perturbations d'origine éolienne, dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable [CAMB03]. En tenant compte de toutes les hypothèses, nous avons modélisé la GADA dans un système référentiel à deux axes. En effet, les équations de la génératrice ont été présentées dans le référentiel  $(\alpha, \beta)$  et dans le référentiel  $(d, q)$ . Ensuite nous avons inséré les modèles de la GADA dans le modèle Simulink de l'ensemble du système éolien pour étudier ses comportements. Le modèle Simulink de l'ensemble a été développé pour générer des données, nécessaires pour la surveillance de défauts sur le système. Des détails sur le fonctionnement des éléments constituant de l'éolienne sont présentés. Par suite, des simulations en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant de l'éolienne ont été montrées. Le fonctionnement défaillant de l'aérogénérateur permet de dire qu'il est difficile de scruter et d'étudier le comportement de l'ensemble éolien par la méthode temporelle et fréquentielle. C'est pourquoi, on a utilisé la méthode statistique « d'Analyse en Composantes Principales (ACP) » pour le diagnostic de l'éolienne.

Ainsi, le quatrième chapitre a été consacré à l'analyse en composantes principales. Cette méthode sans modèle a priori est basée sur la réduction de la matrice de covariance en conservant le maximum d'information. José Ragot et al. ont utilisé l'ACP pour les défauts capteurs [RAGO09]. Dans notre cas on a utilisé cette méthode pour le diagnostic de défauts des deux actionneurs dont le MARB et la génératrice GADA. Les principes de la méthode ACP sont détaillés. Nous avons montré que la construction du modèle ACP est basée sur deux étapes, la détermination de la structure du modèle qui consiste à bien calculer le nombre de composantes à retenir et la construction dudit modèle ACP avec le nombre de composante retenu. Pour le choix du nombre de composantes, comme les données sont centrées et réduites, nous avons utilisé les critères heuristiques « *moyenne des valeurs propres* ». On a trouvé que ce critère est plus avantageux par rapport aux autres critères cités et présentés auparavant. Puisque la diagonale de la matrice de covariance est toujours égale à un, par conséquent, il suffit de négliger les composantes des valeurs propres dont ses variances ont une valeur inférieure à l'unité. Nous avons utilisé des données issues de la littérature et les données réelles du service météorologique de Madagascar pour valider le modèle ACP obtenu. En vue du diagnostic de défauts de deux actionneurs susmentionnés, nous avons optés

pour l'approche utilisant la somme des carrés des dernières composantes principales, appelé indice de détection  $Di$ , une approche traitée et validée par Harkat et al. [HARK02]. On a remarqué que cette approche présente plus d'avantage que la statistique de Hotelling  $T^2$  qui engendre une perte d'efficacité du test et que la méthode SPE, qui s'avère très sensible aux erreurs de modélisation. Pour la détection et la localisation de défauts de la MARB et de la GADA, nous avons utilisé l'approche ACP. Les simulations en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant des deux actionneurs ont été utilisées pour construire les matrices de données des variables d'état, dont l'ACP a besoin pour générer des résidus porteurs des informations nécessaires à l'étude du comportement du système. L'analyse des résidus des variables d'état de la machine avec la méthode ACP a permis de certifier la présence ou pas de défaillance sur le système. On a appliqué cette méthode sur la machine asynchrone à rotor bobiné et sur la génératrice asynchrone doublement alimentée de l'éolienne. On a montré que, même pour des faibles amplitudes de défauts (augmentation de 0,001%), la méthode ACP arrive à détecter les variables défaillantes [RAMA12]. On a constaté aussi, qu'avec la méthode de détection de défaut par l'analyse en composante principale, les courants dans les enroulements statoriques et les courants dans les enroulements rotoriques sont sensibles aux variations des paramètres de la machine. On a montré qu'on arrive à détecter la présence ou non de défaillances sur les variables d'état de la machine avec la variation temporelle du résidu. Nous avons présenté plusieurs figures, pour montrer l'efficacité de la génération de résidu par la méthode ACP, pour le diagnostic des deux actionneurs étudiés. Une autre méthode, dont l'utilisation de l'indice de détection  $Di$ , déjà validée par Harkat et al. pour localiser les capteurs défaillants d'un réseau de surveillance de la qualité d'air [HARK02], a été effectuée pour la détection et localisation de défauts des deux machines. Les résultats de simulation montrent que l'utilisation de l'indice de détection  $Di$ , avec le filtre EWMA, élimine les fausses alarmes et améliore notablement la qualité de détection et la qualité de localisation des variables d'état défaillantes de la MARB et de la GADA [RAMA12c].

Le dernier chapitre est consacré à l'étude comparative de deux méthodes de détection de défauts. La première méthode a déjà été utilisée par Tharrault pour une application au diagnostic de fonctionnement d'une station de traitement des eaux usées [THAR08], et par Harkat et al. pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs d'un réseau de surveillance de la qualité d'air [HARK05], la seconde méthode a été le thème de recherche de Bennouna basée sur la représentation polynomiale, déjà utilisée par Bagajewicz et Jiang [BAGA97]. Elle a été étendue au cas des systèmes linéaires dynamique avec second membre [BENN06a]. Les deux méthodes que l'on avait comparées ont été appliquées sur la génératrice asynchrone

doublement alimentée d'une éolienne. Après avoir présenté et défini le principe de la réconciliation des données puis la théorie de l'estimation d'état des systèmes, nous avons exposé les méthodes les plus utilisées pour la détection de défaut avec l'estimation d'état, en particulier, l'approche basée sur la représentation polynomiale. Deux types de biais ont été traités avec les deux méthodes dont le biais statique et le biais évolutif. La comparaison des résultats des simulations, nous permet de dire que les deux méthodes présentent les variations temporelles similaires pour les données estimées et les données mesurées. Pour le biais statique introduit sur la tension au stator sur l'axe alpha, l'analyse en composantes principales détecte facilement la présence du biais qui se traduit par une correction des amplitudes de variable incriminée (figure 5.5 : tension au stator sur la phase alpha) contrairement à la méthode polynomiale. Par contre, pour le biais évolutif, la représentation polynomiale permet une meilleure détection (figure 5.24 tension au stator sur la phase alpha). En comparant les résidus des variables d'état du système à surveiller, avec les deux biais, on a établi qu'à partir de l'instant où le biais est introduit, les résidus des variables changent d'amplitude, deviennent plus importants pour la méthode polynomiale et commencent à décroître pour la méthode ACP. La moyenne des résidus s'éloigne de plus en plus la valeur zéro pour les variables suspectées et très faible voire presque nulle pour les variables saines. On a trouvé qu'en utilisant le résidu et la moyenne des résidus, l'ACP est plus intéressante et plus sensible à la détection de défauts. Pour la localisation des variables biaisées, l'utilisation de l'indice de localisation, avec l'analyse en composantes principales, présente plus d'avantage que les deux tests statiques, à savoir le test de Student et le test de Page-Hinkley. La méthode ACP affiche directement l'histogramme de la variable incriminée donc est plus simple à interpréter, tandis que la localisation par l'approche polynomiale est coûteuse en calculs et les résultats moins contrastés.

Ces travaux peuvent être poursuivis et affinés par des perspectives pouvant aider à l'amélioration du fonctionnement du dispositif de surveillance des systèmes en particuliers des éoliennes mais également dans la surveillance des générateurs en général.

## Perspectives

Parmi les perspectives envisageables, on peut prévoir de :

✓ Considérer plusieurs défauts sur les paramètres de la machine. En effet, dans la réalité, des paramètres de la MARB sont susceptibles de modifications par rapport à leur valeur nominale, ce qui entraîne une influence sur le comportement de la machine. Cela permettra d'étudier également la robustesse de la méthode ACP.

- ✓ Affiner le choix du nombre de composantes principales à retenir par :
  - *le pourcentage cumulé de la variance totale (PCV),*
  - *les critères de validation croisée,*
  - *la reconstruction des données.*

Cela permettrait de certifier que l'ACP est une méthode intéressante pour la détection de défaut.

✓ Considérer la vitesse de la génératrice de l'éolienne et la machine asynchrone à rotor bobiné variable et étudier le cas de systèmes non linéaires.

✓ Utiliser l'analyse en composantes principales pour des systèmes multi sources. Ce type de configuration est un domaine d'actualité, et est très présent dans la production d'énergies renouvelables.

## Annexe I

Les deux tableaux suivants affichent les paramètres du MARB et les paramètres de la GADA, deux types de machines utilisées dans ce rapport de thèse.

### I.1 Paramètres de la MARB

Les valeurs des paramètres de la machine asynchrone à rotor bobiné (MARB) sont données par le tableau suivant :

Tab. I.1 : Paramètres de la machine asynchrone à rotor bobiné (MARB)

<i>Désignations</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Résistance statorique	2,86	[Ohms]
Résistance rotorique	2,756	[Ohms]
Inductance principale du stator	0,397	[H]
Inductance principale du rotor	0,397	[H]
Inductance mutuelle stator-stator	0,1985	[H]
Inductance mutuelle rotor-rotor	0,1985	[H]
Inductance de fuite du stator	0,009594	[H]
Inductance de fuite du rotor	0,009594	[H]
Inductance mutuelles du stator-rotor	0.3953	[H]
Inductance cyclique du stator	0,605094	[H]
Inductance cyclique du rotor	0,605094	[H]
Nombre de paires de pole	1	
Moment d'inertie de la machine	0.023976	[Kg.m <sup>2</sup> ]
Frottement visqueux	0.0014439	[Nm/rad/s]
Fréquence de la tension d'alimentation	50	[Hz]
Couple résistant	10	[Nm]

## I.2 Paramètres de la GADA

Les valeurs des paramètres de la génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA) utilisée sont données par le tableau suivant :

Tab. I.2 : Paramètres de la génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA)

<i>Désignations</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Puissance nominale	15	[kW]
Vitesse de rotation nominale	1440	[tr/min]
Couple nominal	100	[Nm]
Moment d'inertie	0,5	[kgm <sup>2</sup> ]
Coefficient de frottement	0,01	[kgm <sup>2</sup> /s]
Tension au stator	220	[V]
Tension au rotor	220	[V]
Courant au stator	32	[A]
Courant au rotor	2,5	[A]
Résistance au stator	0,17	[Ohm]
Résistance au rotor	0,2	[Ohm]
Inductance au stator	0,05	[H]
Inductance au rotor	0,05	[H]
Inductance mutuelle	0,045	[H]

## Annexe II

Les deux tableaux suivants présentent la décomposition en vecteurs propres et en valeurs propres de la matrice de covariance des données des variables d'état à surveiller pour l'étude comparative des deux méthodes traitées au chapitre 5.

Tab.II.1 : Tableau des vecteurs propres

0,4740466	0,1950191	0,242951	-0,008508	0,403281	-0,705552	-0,13152	-0,02032
0,1737051	-0,474845	-0,02203	0,1843739	-0,711138	-0,444929	0,0776357	-0,012753
0,0304834	0,455065	-0,749265	0,4398413	-0,064962	-0,155003	-0,010032	0,0937133
0,4836792	-0,07748	-0,470357	-0,717868	-0,078461	0,1155335	-0,048021	-0,040876
-0,4413	-0,255924	-0,24504	-0,256145	0,3019686	-0,386596	0,5537465	0,2585066
-0,242763	0,4408907	0,2004187	-0,344073	-0,385499	-0,16075	-0,240627	0,5964693
0,4624439	0,2232641	0,2174387	0,1303713	-0,094492	0,2508112	0,7068834	0,3170226
0,2066339	-0,462249	-0,101805	0,2369508	0,2693452	0,1692843	-0,331735	0,6825443

Tab.II.2 : Tableau des valeurs propres

3,68866	0	0	0	0	0	0	0
0	3,8992622	0	0	0	0	0	0
0	0	0,3058334	0	0	0	0	0
0	0	0	0,0889498	0	0	0	0
0	0	0	0	0,0100916	0	0	0
0	0	0	0	0	0,0061769	0	0
0	0	0	0	0	0	0,0006131	0
0	0	0	0	0	0	0	0,0004129

Seule la diagonale de la matrice des valeurs propres est différente de zéro, car nous avons utilisé la loi de distribution normale des données, et avec la méthode ACP nous avons travaillé avec des données centrées et réduites.