

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Université Amar Telidji de Laghouat



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE
OPTION ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Mémoire de MASTER

**Diagnostic d'un défaut rotorique d'une machine
Asynchrone par LS-SVM**

Présenté par:

- ❖ SEGHIR Mohammed
- ❖ BEHTITA Abdenour

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. AMEUR Aissa	Prof	Président
Mr. Djekidel Rabah	Prof	Examineur
Mr. Birame M'hamed	MCA	Encadreur
Mr. Sid Ahmed BESSEDIK	Prof	Co-encadreur

Année Universitaire 2024/2025

Dédicaces

**À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce
modeste travail...**

Ce projet est le fruit de votre soutien, de vos encouragements et de votre bienveillance.
Je vous le dédie avec toute ma reconnaissance, pour votre amour, votre confiance et
votre amitié sincère.

À mes chers parents,

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour profond et de ma gratitude infinie.
Vous êtes ma source d'inspiration, ma force et mon refuge.

À mes frères, sœurs et à toute ma famille,

Merci pour votre affection constante et votre soutien indéfectible.
Vous êtes ma fierté et ma chaleur.

À mes amis, compagnons de route,

Merci d'avoir été là tout au long de ce parcours.
Je vous dédie ces lignes avec toute mon amitié et ma reconnaissance.
Vous êtes ma seconde famille, et j'ai tant appris grâce à vous.

À vous tous...

Ma gratitude la plus sincère et mes remerciements les plus chaleureux.

Remerciements

Louange à Allah, Seigneur des mondes. C'est par Sa grâce que les bonnes œuvres s'accomplissent, et grâce à Son aide et à Sa bénédiction que ce travail a pu être achevé.

J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes chers parents pour tout l'amour, le soutien et l'attention qu'ils m'ont prodigué. Ils ont été un véritable pilier tout au long de mon parcours académique.

Je tiens également à remercier chaleureusement mes professeurs, qui ont grandement contribué, après Dieu, à ma formation et à mon orientation. Je remercie tout particulièrement **Monsieur Mohammed BIRAME** pour l'intérêt constant qu'il a porté à mon travail, ses conseils avisés et ses orientations précieuses, qui ont grandement enrichi et façonné ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également au **Dr Sid Ahmed BESSEDIK**, pour son soutien moral et scientifique, qui a joué un rôle fondamental dans la réalisation de ce projet.

Je remercie enfin l'ensemble de mes enseignants, collègues et amis, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ce travail, ne serait-ce que par une parole bienveillante ou une prière sincère.

Qu'Allah accorde à chacun d'eux la meilleure des récompenses, et fasse que ce travail soit sincèrement voué à Sa cause et bénéfique pour ceux qui viendront après moi.

Résumé

Ce travail porte sur le diagnostic des défauts de type rupture partielle ou totale des barres du rotor en cage d'écureuil, en utilisant un algorithme de classification basé sur les machines à vecteurs de support à moindres carrés (LS-SVM).

Ces dernières années, plusieurs approches de surveillance de l'état des machines électriques ont été développées en s'appuyant sur des techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones artificiels, la logique floue, ou encore les filtres de Kalman. Cependant, l'application des LS-SVM dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des défauts des machines reste encore peu exploitée.

La méthode LS-SVM se distingue par sa précision élevée en classification, ce qui en fait une solution prometteuse pour la détection et le diagnostic efficace des défauts, tout en offrant d'excellentes capacités de généralisation, même en présence de signaux complexes et bruités.

Mots-clés : machine asynchrone, diagnostique, défaut rotorique, Machine à Vecteurs de Support aux Moindres Carrés (LS-SVM).

Abstract

This work focuses on the diagnosis of faults such as partial or total breakage of rotor bars in squirrel-cage induction motors, using a classification algorithm based on Least Squares Support Vector Machines (LS-SVM).

In recent years, several approaches for monitoring the condition of electrical machines have been developed using artificial intelligence techniques such as artificial neural networks, fuzzy logic, and Kalman filters. However, the application of LS-SVM in the field of machine condition monitoring and fault diagnosis remains relatively underexplored.

The LS-SVM method stands out for its high classification accuracy, making it a promising tool for the effective detection and diagnosis of faults, while also offering excellent generalization capabilities, even in the presence of complex and noisy signals.

Keywords: Asynchronous machine, diagnosis, rotor fault, Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM).

المخلص

يتناول هذا العمل تشخيص الأعطال من نوع الانقطاع الجزئي أو الكلي في قضبان دوار المحرك ذي القفص السنجابي، وذلك باستخدام خوارزمية تصنيف تعتمد على آلات الدعم ذات المربعات الصغرى (LS-SVM).

في السنوات الأخيرة، تم تطوير العديد من الأساليب لمراقبة حالة الآلات الكهربائية، بالاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، المنطق الضبابي، ومرشحات كالمان. ومع ذلك، لا يزال استخدام تقنية LS-SVM في مجال مراقبة وتشخيص أعطال الآلات الكهربائية محدودًا.

تتميز طريقة LS-SVM بدقة عالية في التصنيف، مما يجعلها حلاً واعدًا للكشف والتشخيص الفعال للأعطال، إلى جانب قدرتها الممتازة على التعميم حتى في ظل وجود إشارات معقدة ومشوشة.

الكلمات المفتاحية: آلة غير تزامنية، التشخيص، عطل في الدوار، آلة الدعم ذات المربعات الصغرى (LS-SVM).

Liste des figures

Chapitre I

I.1	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	2
I.2	Stator d'une machine électrique	3
I.3	Rotor à cage d'écureuil	4
I.4	Causes internes des défauts	7
I.5	Causes externes des défauts	8
I.6	Roulement à bille	9
I.7	Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte	10
I.8	Les différents types de défauts courts-circuits	10
I.9	Différents défauts statoriques de la machine asynchrone	11
I.10	Rupture de barres	12
I.11	Rupture d'anneaux	13
I.12	Les différentes méthodes de diagnostic	15
I.13	Schéma de principe du diagnostic par projection dans l'espace de parité	16
I.14	Approche physique utilisation des observateurs	17
I.15	Principe de la technique estimation paramétrique	18
I.16	Architecture générale d'un système expert de diagnostic	19

Chapitre II

II.1	Modèle de la machine asynchrone	24
II.2	Repère de Park	28
II.3	Structure du stator (a), et du rotor (b)	32
II.4	Maile du rotor à cage d'écureuil	36

II.5	Vitesse de moteur	43
II.6	Couple électromagnétique	43
II.7	Courant statorique	43
II.8	spectre du courant statorique	43
II.9	Deux mailles adjacentes	44
II.10	Deux mailles adjacentes avec une barre cassée	44
II.11	fonctionnement d'un rotor sain et en défaut	45
II.12	Vitesse de moteur	49
II.13	Couple électromagnétique	49
II.14	Courant statorique	49
II.15	spectre du courant statorique	49
II.16	Vitesse de moteur	50
II.17	Couple électromagnétique	50
II.18	Courant statorique	50
II.19	spectre du courant statorique	50
II.20	Vitesse de moteur	50
II.21	Couple électromagnétique	50
II.22	Courant statorique	51
II.23	spectre du courant statorique	51
II.24	Vitesse de moteur	52
II.25	Couple électromagnétique	52
II.26	Courant statorique	52
II.27	spectre du courant statorique	52
II.28	Vitesse de moteur	52
II.29	Couple électromagnétique	52
II.30	Courant statorique	53
II.31	spectre du courant statorique	53

II.32	Vitesse de moteur	53
II.33	Couple électromagnétique	53
II.34	Courant statorique	53
II.35	spectre du courant statorique	53
II.36	Vitesse de moteur	54
II.37	Couple électromagnétique	54
II.38	Courant statorique	54
II.39	spectre du courant statorique	54
II.40	Vitesse de moteur	55
II.41	Couple électromagnétique	55
II.42	Courant statorique	55
II.43	spectre du courant statorique	55
II.44	Vitesse de moteur	55
II.45	Couple électromagnétique	55
II.46	Courant statorique	56
II.47	spectre du courant statorique	56

Chapitre III

III.1	Schéma fonctionnel du LS-SVM pour le diagnostic de défaut de rupture de barre rotorique	63
III.2	structure d'entrée/sortie du la méthode LS-SVM	64
III.3	Structure de la méthode LS-SVM proposé	65
III.4	Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble d'apprentissage	66
III.5	Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble de teste	67

Liste des tableaux

II.1	Paramètres de la machine étudiée	56
------	----------------------------------	----

Sommaire

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Introduction Générale

Chapitre I

I.1 Introduction	1
I.2 Constitution de la machine asynchrone	1
I.2.1 Stator	2
I.2.2 Rotor	3
I.2.3 Paliers.....	4
I.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	5
I.4 Applications.....	5
I.4.1 Avantages.....	6
I.4.2 Inconvénient.....	6
I.5 Les défaillances de la machine asynchrone	6
I.5.1 Défauts mécanique	8
I.5.1.1 Défauts de roulements	8
I.5.1.2 Défauts d'excentricité	9
I.5.2 Défaillances d'ordre électriques	10
I.5.2.1 Au niveau de stator	10
I.5.2.2 Les défauts d'isolation	11
I.5.3 Au niveau de rotor	12
I.5.3.1 Ruptures de barres.....	12
I.5.3.2 Ruptures d'anneaux.....	13
I.6 Diagnostic des défauts des machines asynchrones.....	13
I.7 Méthodes de diagnostic des defaults.....	14
I.8 Méthodes internes.....	15
I.8.1 Méthode basée sur l'espace de parité.....	15
I.8.2 Le diagnostic à base d'observateurs	16

I.8.3 Estimation paramétrique.....	17
I.9 Méthodes externes.....	18
I.9.1 Diagnostic par systèmes experts.....	18
I.9.2 Diagnostic par analyse des signaux.....	19
I.10 Conclusion.....	20

Chapitre II

II.1 Introduction.....	23
II.2 Hypothèses considérées pour le modèle circuit électrique de la MAS.....	23
II.3 Modélisation de la machine asynchrone saine	23
II.4 Modèle mathématique de la machine asynchrone	24
II.4.1 Équations électriques	24
II.4.2 Équations magnétiques.....	26
II.4.3 Équations mécaniques.....	27
II.4.4 Transformation de Park.....	28
II.4.4.1 Équations électriques.....	29
II.4.4.2 Équations magnétiques	30
II.4.4.3 Équation du couple électromagnétique.....	31
II.4.4.4 Équation mécaniques	31
II.5 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	31
II.5.1 Equations du stator.....	32
II.5.2 Equations du rotor	35
II.5.3 Système d'équations global de la machine	39
II.6 Simulation de moteur sain	42
II.7 Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts	43
II.7.1 Défaut de cassure de barre rotorique.....	43
II.7.1.1 Cassure totale d'une barre	44
II.7.1.2 Cassure partielle d'une barre.....	44
II.8 Rupture de barres au rotor	46

II.8.1 Représentation d'état du modèle de rupture de barre.....	47
II.9 Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit	47
II.9.1 Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit.....	47
II.10 Simulation de moteur en présence des Défauts	48
II.10.1 Fissure de 20% d'une barre rotorique.....	48
II.10.2 Fissure de 50% d'une barre rotorique.....	49
II.10.3 Fissure de 80% d'une barre rotorique.....	50
II.10.4 Fissure simultanément de 20% de deux barres rotorique	51
II.10.5 Fissure simultanément de 50% de deux barres rotorique	52
II.10.6 Fissure simultanément de 80% de deux barres rotorique	53
II.10.7 Fissure mixte de 20% et 60% de deux barres rotorique	54
II.10.8 Fissure mixte de 30% et 80% de deux barres rotorique	54
II.10.9 Fissure mixte de 50% et 10% de deux barres rotorique	55
II.11 Paramètres de la machine.....	56
II.12 Conclusion	57

Chapitre III

III.1 Introduction	59
III.2 Application de la méthode LSSVM.....	59
III.3 Machines vectorielles de support des moindres carrés.....	60
III.4 Méthodologie.....	62
III.4.1 Extraction des caractéristiques.....	62
III.5 Application méthode LS-SVM pour estimer la sévérité de défaut rotorique.....	63
III.5.1 Base de données.....	63
III.5.2 Diagnostic de la méthode LS-SVM.....	64
III.6 Conclusion.....	67

Conclusion générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

La machine asynchrone figure parmi les machines électriques les plus utilisées dans le domaine industriel, en raison de sa simplicité de construction, de son faible coût et de sa robustesse mécanique. Toutefois, ces avantages ne la mettent pas à l'abri de certains défauts pouvant nuire à la fiabilité du système de production, réduire la qualité du service et entraîner des pertes économiques importantes. Parmi ces défauts, la cassure des barres du rotor, qu'elle soit partielle ou totale, représente l'un des dysfonctionnements les plus critiques en raison de son impact direct sur les performances électromécaniques de la machine.

La détection précoce de ce type de défaut est d'une importance capitale afin d'éviter des pannes graves et des arrêts imprévus des installations industrielles. Le diagnostic des machines électriques tournantes repose généralement sur l'analyse des signaux mesurés lors du fonctionnement réel de la machine. Cette analyse peut parfois être complétée par des simulations numériques ou des modèles mathématiques afin de mieux interpréter le comportement en présence de défauts. Un diagnostic fiable nécessite une connaissance préalable de l'état de fonctionnement sain de la machine, indépendamment de la variable physique utilisée. L'identification du défaut repose alors sur la comparaison entre l'état actuel et l'état de référence sain, à l'aide d'indicateurs sensibles aux variations induites par le défaut. Cependant, la variation des conditions de charge peut engendrer plusieurs états de fonctionnement dits normaux, ce qui complique davantage le processus de diagnostic.

Dans ce contexte, ce travail vise à diagnostiquer les cassures partielles ou totales des barres du rotor dans les machines asynchrones, en se basant sur l'analyse des signaux électriques et l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle, avec la possibilité de recourir à une modélisation ou à des simulations pour mieux comprendre le comportement dynamique de la machine en présence du défaut. La méthodologie adoptée repose sur l'extraction des caractéristiques discriminantes à partir de données réelles ou générées, suivie de l'utilisation d'algorithmes de classification performants pour déterminer avec précision l'état de la machine.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect fondamental du processus de diagnostic, à savoir :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des composants de la machine asynchrone, à savoir le stator et le rotor, en abordant quelques défauts courants tels que la cassure des barres du rotor et les courts-circuits dans le stator. Il passe également en revue les principales techniques de diagnostic utilisées, allant de l'analyse harmonique et l'analyse vibratoire aux méthodes basées sur l'intelligence artificielle, en soulignant

Introduction Générale

les forces et les limites de chacune pour justifier le besoin de développer des approches diagnostiques plus précises et efficaces.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation de la cassure des barres du rotor, incluant les fissures partielles et la rupture totale, tout en étudiant l'état sain de la machine. Ce chapitre intègre des simulations pour analyser l'impact de ces défauts sur les performances, dans le but de développer des méthodes de diagnostic précises et efficaces.

Enfin, le troisième chapitre présente en détail la méthode des machines vectorielles supportant les moindres carrés (LS-SVM) et son application pour les diagnostics de défauts statistiques des machines asynchrones. Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont présentés et interprétés pour évaluer la performance et l'efficacité du diagnostic. Des expériences pratiques et des comparaisons avec d'autres méthodes sont également incluses pour valider l'approche proposée.

Chapitre I

État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

I.1 Introduction

Les machines électriques tournantes jouent un rôle fondamental dans divers secteurs industriels et occupent une place prépondérante en raison de leur importance fonctionnelle. Parmi elles, la machine asynchrone, également appelée moteur à induction (IM pour Induction Machine), est la plus répandue en industrie grâce à ses nombreux avantages : une bonne puissance massique, une grande robustesse, une mise en œuvre simple et un faible coût de fabrication. Elle est constituée de trois éléments essentiels : le stator, le rotor et les composants mécaniques.

Bien que cette machine soit connue pour sa robustesse, elle reste sujette, comme toute autre machine électrique, à des défaillances d'origine électrique ou mécanique. Compte tenu des conséquences importantes et coûteuses que peuvent engendrer ces défauts sur les processus industriels, le diagnostic des défaillances a suscité un intérêt croissant au cours des deux dernières décennies.

Il existe plusieurs approches de diagnostic, dont le choix dépend du type de connaissance que l'on souhaite obtenir sur le système ainsi que de sa complexité. Ainsi, deux grandes familles de méthodes sont utilisées dans le domaine du diagnostic en génie électrique : les méthodes basées sur une connaissance a priori du système, et celles qui ne nécessitent pas de connaissance préalable.

Ce chapitre est structuré en trois parties principales :

- La constitution des machines asynchrones,
- Les différents types de défauts pouvant survenir,
- Les techniques de diagnostic des machines électriques.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine électrique tournante qui convertit l'énergie par induction électromagnétique. Le terme "asynchrone" fait référence au fait que la vitesse de rotation de la machine ne correspond pas à celle du champ magnétique tournant.

Dans cette section, nous aborderons brièvement la constitution de la machine asynchrone, ce qui nous permettra de comprendre comment le système est physiquement réalisé. Les différentes parties des machines tournantes peuvent être classées selon les trois fonctions principales qu'elles accomplissent :

- Le stator : C'est la partie fixe de la machine qui est connectée à la source d'alimentation électrique.

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

- Le rotor : C'est la partie mobile qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers : Ce sont les éléments mécaniques qui supportent la rotation de l'arbre du moteur [1].

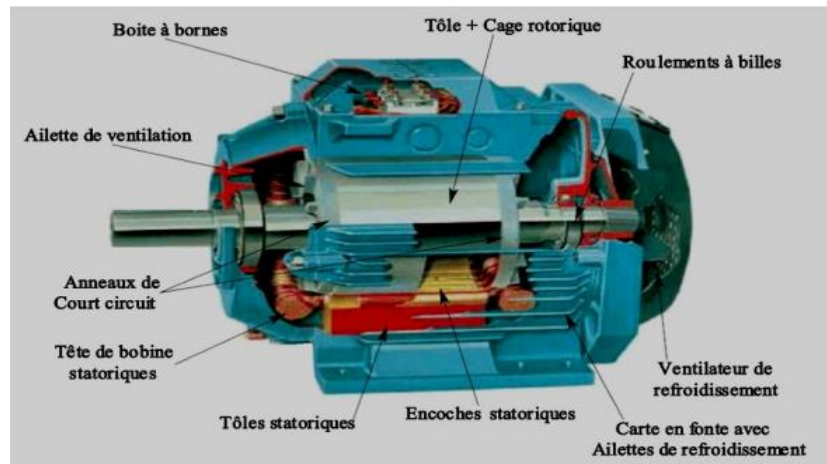


Fig I.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.1 Stator

Le stator d'une machine asynchrone est la partie fixe de la machine qui est composée de bobines de cuivre entourant le noyau en fer. Lorsque le stator est alimenté par un courant alternatif, il crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor de la machine à tourner également.

Les bobines de cuivre sont placées à des intervalles réguliers sur le stator pour créer un champ magnétique uniforme autour de l'axe de la machine. Le nombre de paires de pôles sur le stator détermine la vitesse de rotation du champ magnétique tournant et donc la vitesse de rotation de la machine.

Le stator est conçu pour être solide et robuste afin de supporter les forces électromagnétiques générées par la rotation du champ magnétique. Il peut être constitué de tôles d'acier empilées pour réduire les pertes par courants de Foucault et le noyau peut être également enrobé de matériau isolant pour protéger les bobines contre les court-circuits et l'humidité [2].

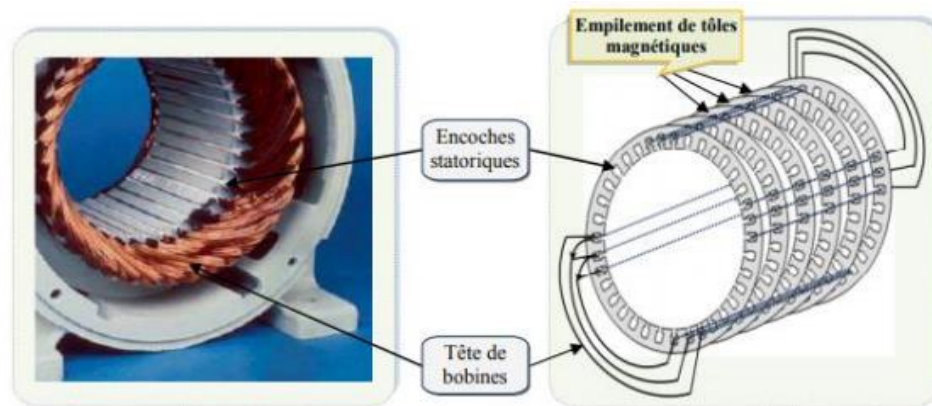


Fig I.2 Stator d'une machine électrique.

I.2.2 Rotor

Le rotor d'une machine asynchrone est la partie mobile de la machine qui tourne autour de son axe. Il est composé d'un noyau en acier laminé sur lequel sont fixées des barres en cuivre ou en aluminium, appelées "cages d'écureuil" en raison de leur forme. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux en cuivre ou en aluminium pour former un circuit fermé.

Lorsque la machine est alimentée en courant électrique, un champ magnétique est créé dans le stator (la partie fixe de la machine), qui induit un courant électrique dans les barres du rotor. Ce courant crée à son tour un champ magnétique dans le rotor qui réagit avec le champ magnétique du stator pour produire un couple de rotation.

Le rotor d'une machine asynchrone peut être de deux types :

- **Le rotor en cage d'écureuil** est le type de rotor le plus utilisé dans les moteurs asynchrones en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son faible coût. Il est composé de barres en cuivre ou en aluminium insérées dans les fentes d'un noyau en acier, reliées entre elles par des anneaux pour former un circuit fermé.

Lorsqu'un champ magnétique tournant est créé dans le stator, il induit des courants électriques dans les barres du rotor. Ces courants génèrent à leur tour un champ magnétique qui fait tourner le rotor.

Ce type de rotor est largement utilisé dans diverses applications industrielles et domestiques, telles que les ventilateurs, les pompes, les compresseurs, les machines-outils, ainsi que dans la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables comme l'éolien et l'hydroélectrique.

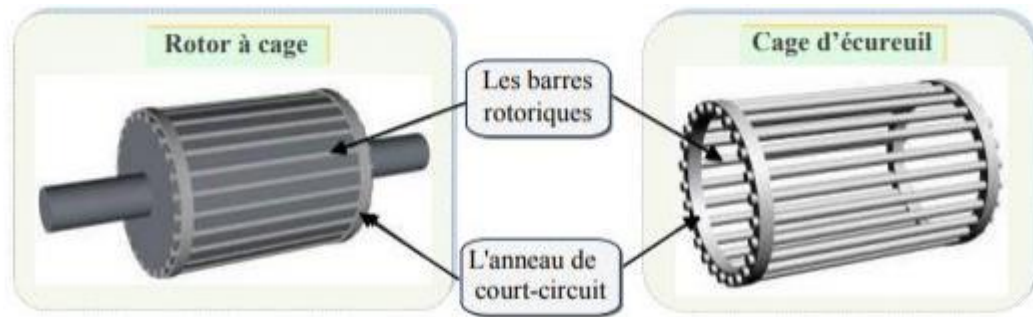


Fig I.3 Rotor à cage d'écureuil.

- **Le rotor bobiné** est un type de rotor utilisé dans les machines asynchrones, différent du rotor en cage d'écureuil par la présence de bobines en cuivre isolées enroulées autour d'un noyau en fer. Chaque bobine est connectée à une bague de glissement permettant le transfert d'énergie entre le stator et le rotor.

Lors de l'alimentation électrique, un champ magnétique tournant dans le stator induit des courants dans les bobines du rotor, générant un champ magnétique qui produit un couple de rotation [3].

I.2.3 Paliers

Les paliers jouent un rôle fondamental dans les moteurs asynchrones, car ils permettent de supporter les efforts radiaux et axiaux tout en assurant un fonctionnement stable et performant de la machine.

On distingue plusieurs types de paliers utilisés dans les machines asynchrones :

- Les paliers lisses : composés de deux surfaces métalliques en contact direct, ils nécessitent une lubrification efficace afin de limiter les frottements et l'usure.
- Les paliers à roulements : formés d'une bague intérieure, d'une bague extérieure et de billes ou rouleaux intercalés, ils permettent de réduire les frottements ainsi que les charges radiales et axiales, tout en assurant une bonne rotation.
- Les paliers magnétiques : reposant sur l'utilisation de champs magnétiques pour maintenir l'arbre en position, ils suppriment tout contact mécanique, réduisant ainsi considérablement l'usure et les pertes par friction.

Le choix du type de palier adapté dépend de plusieurs critères, notamment la taille et la vitesse de la machine, la nature des charges appliquées, la durée de fonctionnement souhaitée ainsi que les conditions environnementales. Une sélection appropriée est essentielle pour optimiser la fiabilité et prolonger la durée de vie du moteur [4].

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

I.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

La machine asynchrone est fonctionnée sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur, en général, la vitesse de rotation est donnée par l'équation suivante [5]:

$$N_s = \frac{f}{p} \text{ En tr/s } \text{ ou } N_s = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

N_s : Vitesse du champ tournant (tr/s).

f : Fréquence d'alimentation (Hz).

p : Nombre de paires de pôles.

L'équation suivante représente le glissement de la machine asynchrone :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

g : Glissement.

n_s : Vitesse de synchronisme (tr/s).

n_r : Vitesse du rotor (tr/s).

I.4 Applications

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans divers secteurs industriels et commerciaux en raison de leur robustesse, fiabilité et capacité à fonctionner à des vitesses variables.

- Pompes et compresseurs : utilisées pour garantir un débit constant dans les processus industriels.
- Ventilateurs et soufflantes : essentielles dans les systèmes de ventilation et de climatisation pour maintenir une circulation d'air stable.
- Convoyeurs : assurent une puissance constante pour déplacer des matériaux dans les lignes de production.

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

- Machines-outils : alimentent les équipements de fraisage, tournage et perçage avec une grande précision.
- Ascenseurs : offrent une solution fiable et sécurisée pour le transport des passagers grâce à une gestion précise de la vitesse.

Les machines asynchrones sont utilisées dans de nombreuses applications industrielles et commerciales en raison de leur capacité à fonctionner à des vitesses variables et à fournir une puissance constante.

I.4.1 Avantages

Les machines asynchrones, ont plusieurs avantages, notamment :

- Simplicité de construction : Elle ne nécessite ni balais ni collecteurs, ce qui réduit l'usure mécanique.
- Faible coût : Moins chère à fabriquer et à entretenir que d'autres types de machines électriques.
- Robustesse : Fonctionne efficacement même dans des environnements industriels sévères.
- Fiabilité : Longue durée de vie avec un minimum de maintenance.
- Polyvalence : Adaptée à une grande variété d'applications, notamment les charges constantes et variables.
- Bon rendement : Surtout dans les applications à pleine charge.

I.4.2 Inconvénient

Malgré leurs nombreux avantages, les machines asynchrones présentent certains inconvénients :

- Faible facteur de puissance à vide, entraînant une consommation élevée de courant même sans charge.
- Contrôle de vitesse limité, nécessitant l'utilisation de variateurs de fréquence pour un réglage précis, ce qui augmente les coûts.
- Rendement inférieur, à celui des machines synchrones dans certaines applications, notamment à charge partielle.
- Courant de démarrage élevé, pouvant provoquer des perturbations sur le réseau électrique.
- Difficulté de diagnostic précoce des défauts internes, comme les courts-circuits entre spires ou la perte de magnétisme.

Il est important de noter que certains de ces inconvénients peuvent être atténués ou résolus par des techniques de conception ou de contrôle appropriées.

I.5 Les défaillances de la machine asynchrone

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

Les défauts pouvant apparaître dans une machine asynchrone se répartissent en deux catégories principales : les défauts mécaniques et les défauts électriques. Ces anomalies peuvent entraîner divers dysfonctionnements, et dans certains cas, provoquer un arrêt imprévu de la machine. Il est donc essentiel d'y accorder une attention particulière [6].

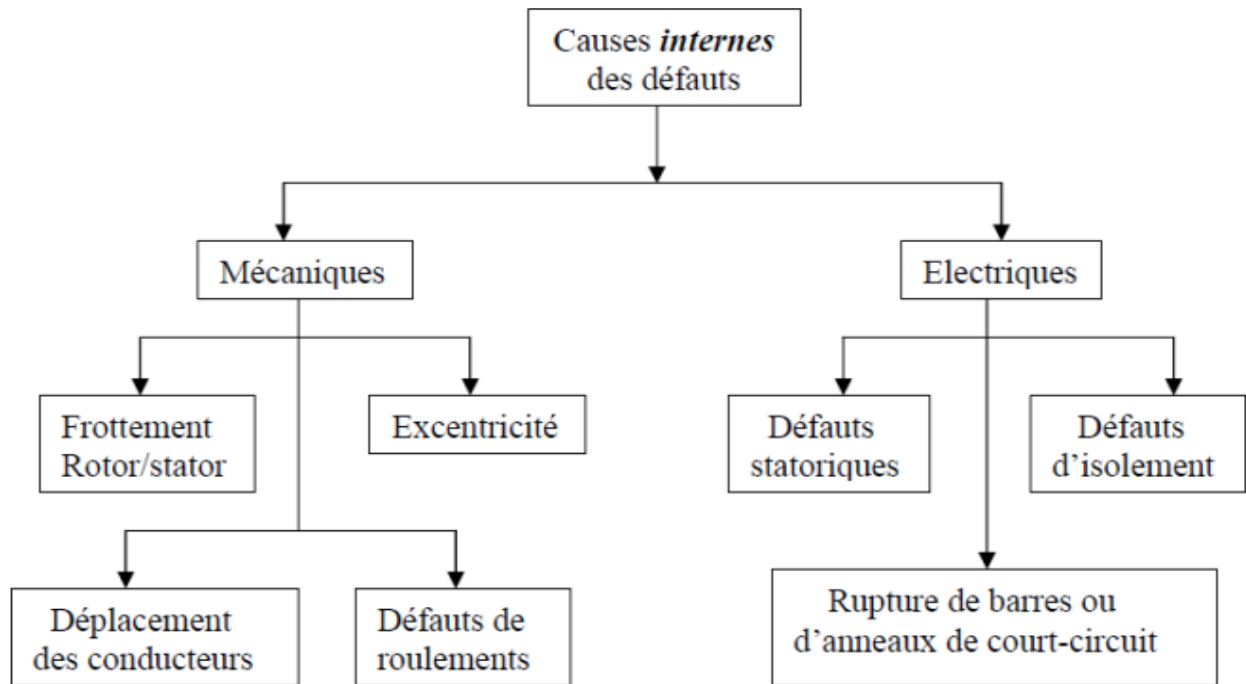


Fig I.4 Causes internes des défauts.

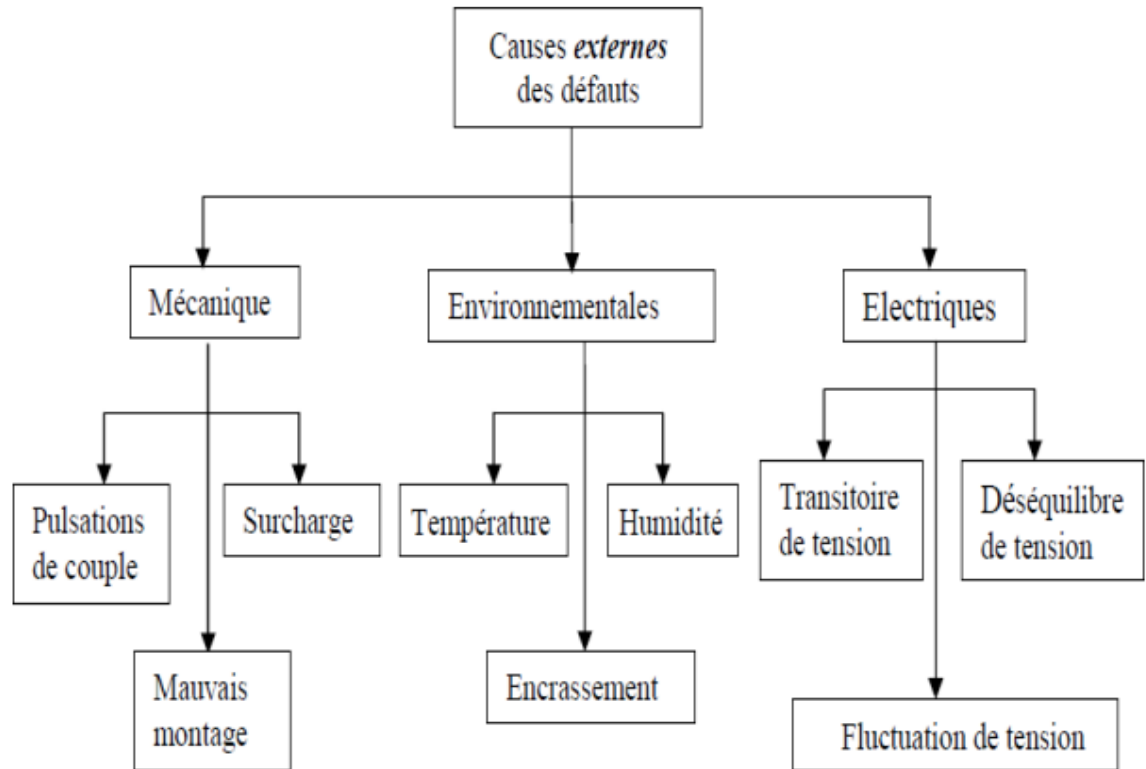


Fig I.5 Causes externes des défauts.

I.5.1 Défauts mécanique

Plus de 40% de défauts de moteurs asynchrones sont des défauts mécaniques. Ces défauts peuvent être des défauts de roulements, des défauts d'excentricité, . . .

I.5.1.1 Défauts de roulements

La raison principale des défaillances des machines concerne les défauts des roulements à billes qui ont de nombreuses causes telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs a MLI.

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations. Il a et montre également que les défauts de roulements induisent des variations dans le couple de charge de la machine asynchrone [7].

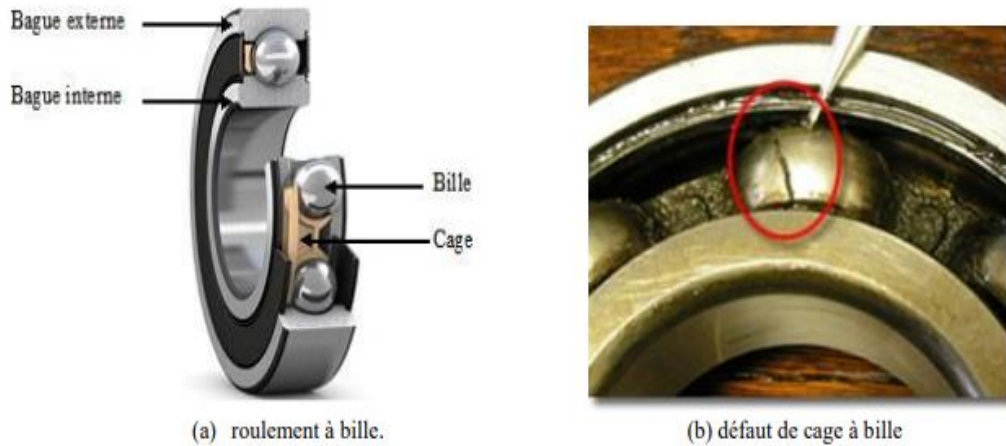


Fig I.6 Roulement à bille.

I.5.1.2 Défauts d'excentricité

L'excentricité est la variation d'épaisseur et l'uniformité de l'entrefer entraîne une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple globale non constant. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, à un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, à l'usure du roulement, ou à un déplacement du noyau statorique.

Trois cas d'excentricité sont distingués :

- a) Excentricité statique :** Déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor et/ou du stator à l'assemblage.
- b) Excentricité dynamique :** Le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation peut être provoqué par des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement...etc.
- c) Excentricité mixte :** Combinaison des excentricités statiques et dynamiques dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du rotor [7].

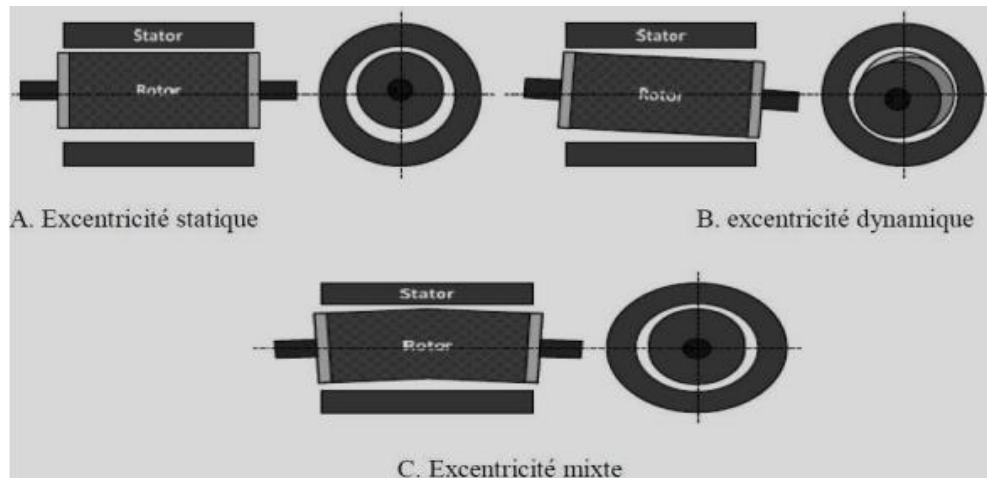


Fig I.7 Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

I.5.2 Défaillances d'ordre électriques

I.5.2.1 Au niveau de stator

Les défauts du stator apparaissent généralement sous forme de courts-circuits entre spires, entre phases, ou entre une phase et la carcasse métallique de la machine. Ces défauts surviennent souvent au niveau des têtes de bobines, où les conducteurs de différentes phases sont proches, ou à l'intérieur des encoches, ce qui entraîne une réduction du nombre de spires actives et une baisse de performance.

Ces anomalies provoquent un déséquilibre des courants entre phases, impactant directement le couple électromagnétique et la stabilité de la machine. De plus, elles perturbent considérablement les systèmes de commande basés sur le modèle de Park, qui repose sur l'hypothèse d'un système équilibré [8].

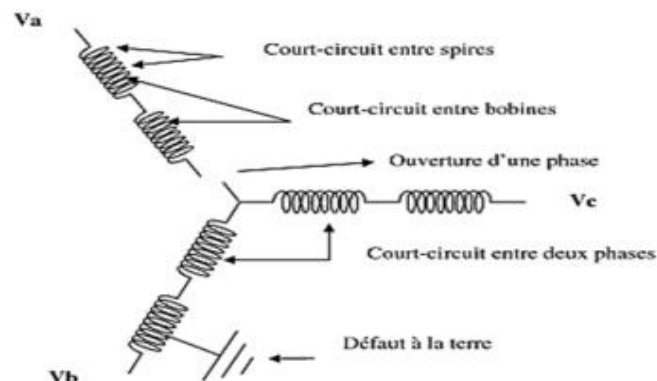


Fig I.8 Les différents types de défauts courts-circuits.

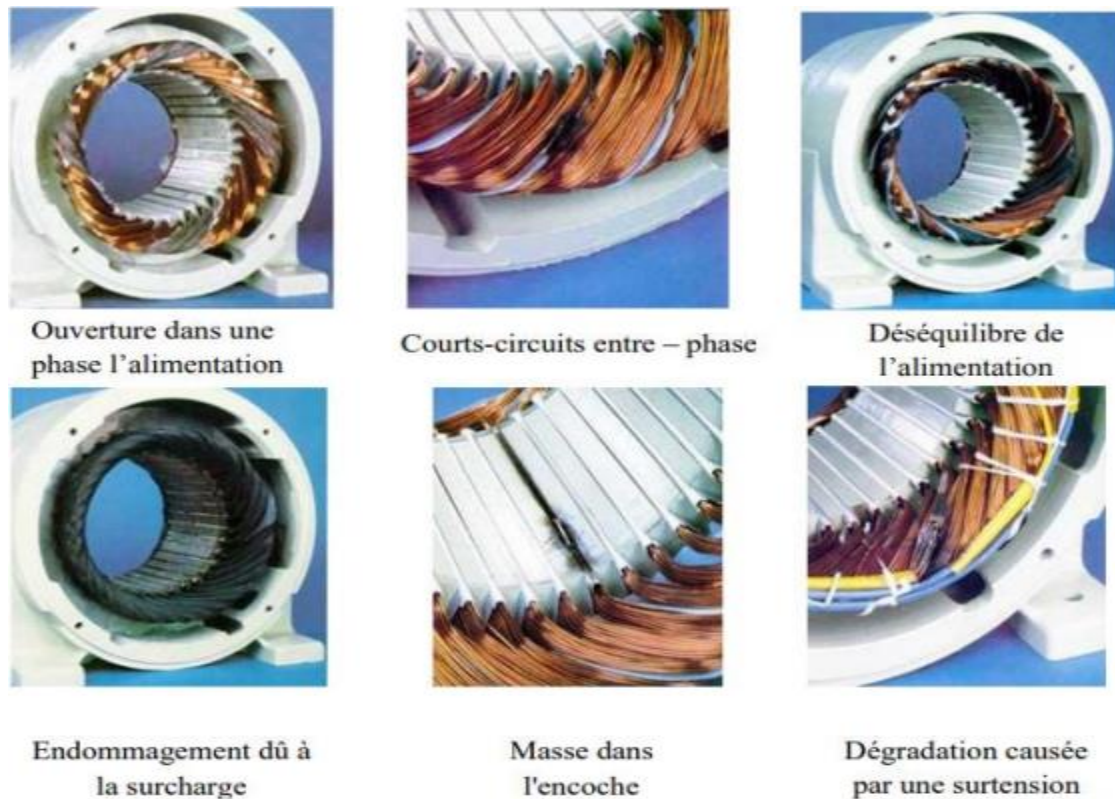


Fig 1.9 Différents défauts statoriques de la machine asynchrone.

I.5.2.2 Les défauts d'isolation

Les défauts d'isolation dans les machines asynchrones constituent l'une des principales causes de défaillance électrique. Ils résultent d'un affaiblissement progressif ou brutal des matériaux isolants qui séparent les conducteurs dans les enroulements statoriques ou rotoriques. Lorsque ces matériaux perdent leurs propriétés diélectriques, des courts-circuits peuvent apparaître entre spires, entre phases ou entre phase et masse, compromettant ainsi le bon fonctionnement de la machine.

Les origines de ces défauts sont multiples : surchauffe due aux pertes (Joule, fer, mécanique), surtensions, vibrations mécaniques, vieillissement naturel des isolants, environnement sévère (humidité, poussière, agents chimiques), ou encore défauts de fabrication. La détérioration de l'isolant entraîne l'apparition de chemins conducteurs anormaux qui modifient la topologie du circuit magnétique et électrique, provoquant des déséquilibres, une élévation de température locale, voire une destruction complète de l'enroulement.

La détection précoce de ces défauts est cruciale pour éviter des pannes majeures. Elle repose souvent sur l'analyse des grandeurs électriques (courants, tensions, impédances) ou sur des tests spécifiques (mesure de la

résistance d'isolement, essais de surtension, analyse de décharges partielles). Une maintenance conditionnelle et un suivi régulier de l'état de l'isolation permettent ainsi d'anticiper les défaillances et d'optimiser la durée de vie de la machine.

I.5.3 Au niveau du rotor

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent

Être définis comme suit :

- Rupture de barres ;
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit ;

I.5.3.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [9].

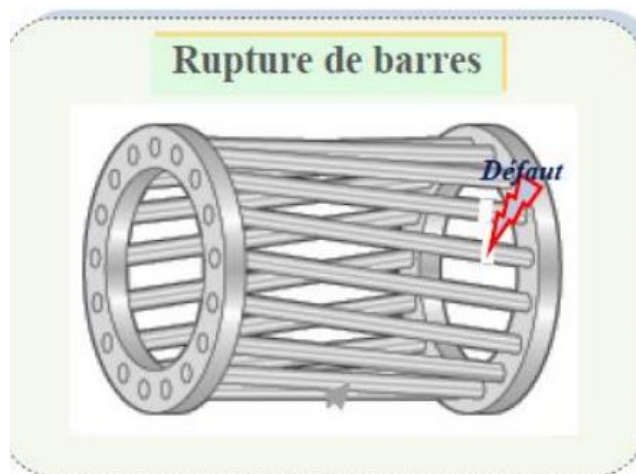


Fig I.10 Rupture de barres.

I.5.3.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [9].

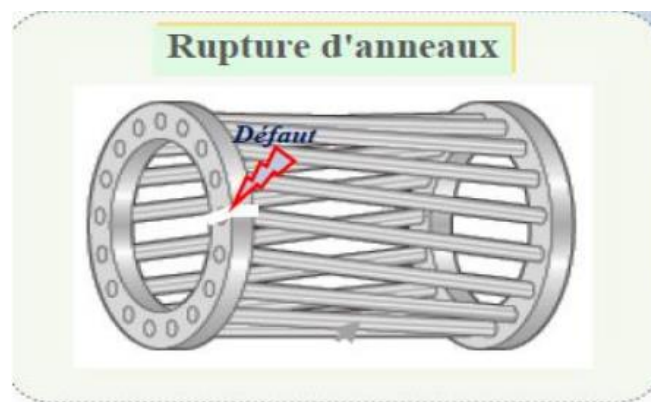


Fig I.11 Rupture d'anneaux.

I.6 Diagnostic des défauts des machines asynchrones

Le diagnostic est un processus analytique visant à identifier les problèmes ou défaillances pouvant survenir dans des systèmes ou machines. Il constitue un outil essentiel pour découvrir les causes sous-jacentes des dysfonctionnements. Le processus commence par la collecte de données relatives aux performances du système, telles que les courants, les tensions, les vibrations et la température, puis ces données sont comparées aux valeurs de référence ou aux normes de performance idéales. Toute déviation par rapport à ces valeurs indique la présence d'un problème ou d'un défaut. Une fois le problème détecté, on analyse les causes possibles, qu'elles soient mécaniques, électriques ou environnementales, et on utilise des techniques avancées comme l'intelligence artificielle ou des algorithmes pour en identifier la cause racine. Enfin, des solutions

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

~~~~~

correctives sont proposées, telles que le remplacement des pièces défectueuses ou l'adaptation des processus pour améliorer les performances. Le diagnostic précoce permet de prévenir les défaillances majeures, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité des systèmes, réduire les coûts et les interventions d'urgence, et accroître la fiabilité et la longévité des machines.

### **I.7 Méthodes de diagnostic des defaults**

L'apparition d'un défaut au niveau du système d'entraînement entraîne une altération de son fonctionnement, ce qui affecte négativement son efficacité.

En raison de la diversité de ces défauts et de la complexité des relations de cause à effet qui les caractérisent, de nombreuses méthodes ont été développées afin de mettre en place une démarche efficace de diagnostic, permettant ainsi d'anticiper autant que possible la dégradation du système surveillé.

Notre choix de ce sujet vise à présenter un aperçu des méthodes les plus couramment utilisées pour diagnostiquer les pannes des machines asynchrones.

Les méthodes de diagnostic se divisent en deux grandes catégories [10] :

- Les méthodes internes
- Les méthodes externes

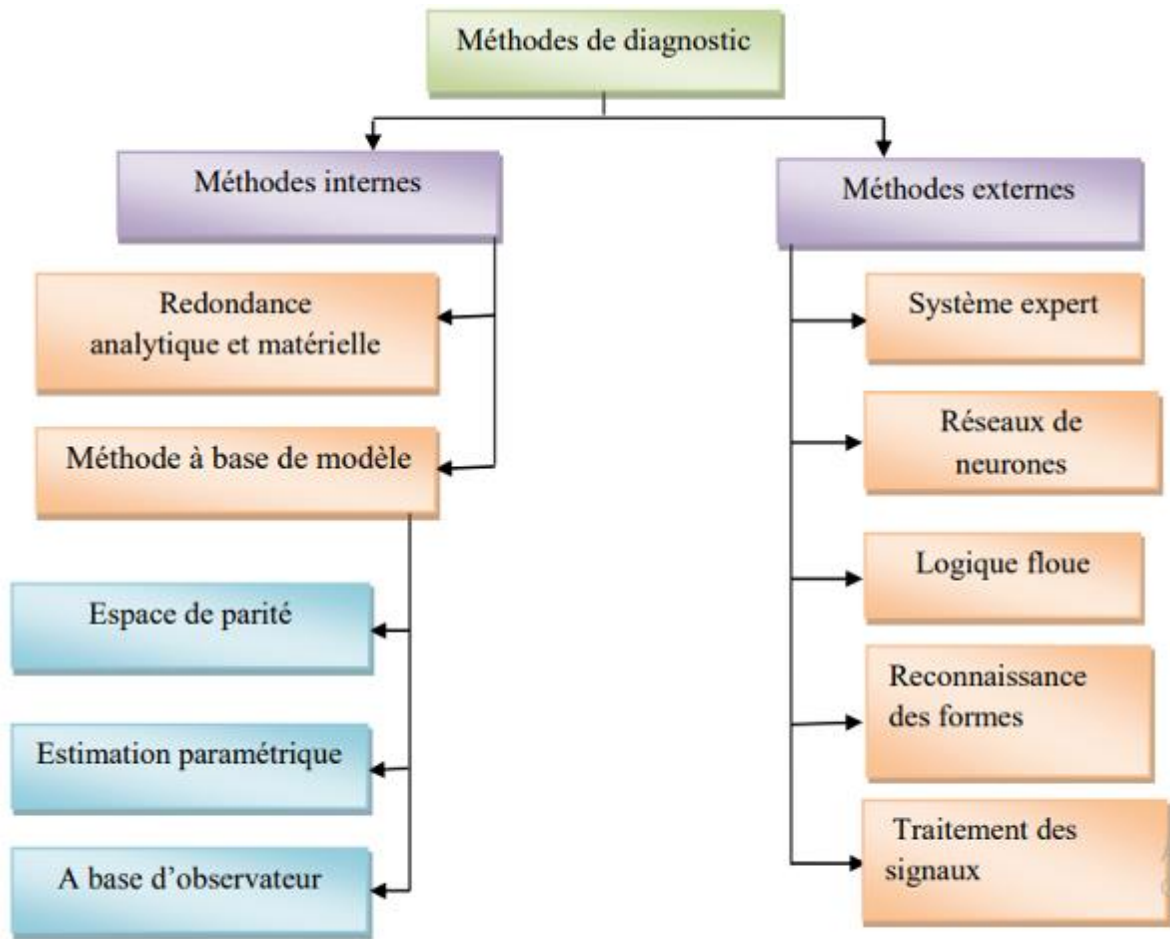


Fig I.12 Les différentes méthodes de diagnostic [10].

### I.8 Méthodes internes

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus (méthode des résidus). Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle d'un défaut.

#### I.8.1 Méthode basée sur l'espace de parité

Le principe de l'approche par projection dans l'espace de parité est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations de modélisation du dispositif surveillé. On cherche à établir des relations de redondance analytique entre les mesures qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent

## Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

sensibles aux défaillances. Ces relations de redondance servent à construire, par des techniques de projection matricielles, le vecteur de parité. Ce dernier représente une quantité ayant pour propriété d'être nul en fonctionnement normal et d'évoluer en présence de défauts. L'analyse du vecteur de résidus dans l'espace de parité permet alors de mettre en évidence la présence d'une défaillance [11].

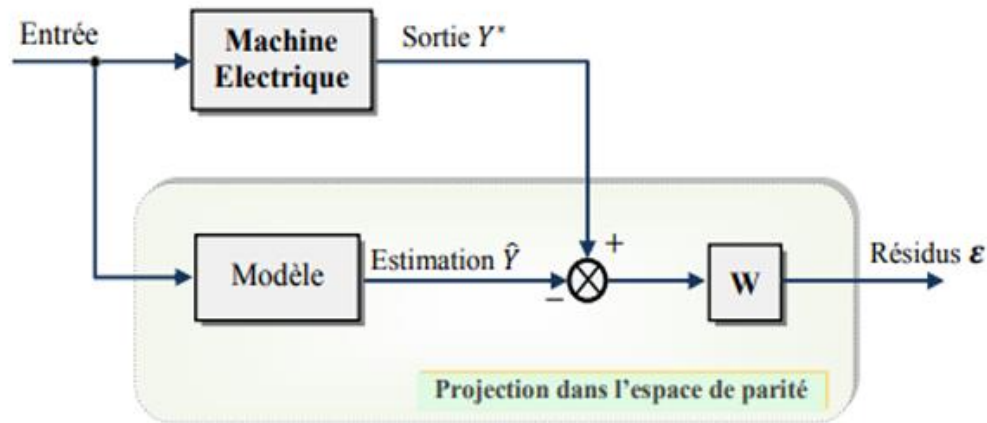


Fig I.13 Schéma de principe du diagnostic par projection dans l'espace de parité.

### I.8.2 Le diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes d'observateurs sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Cette technique se doit de donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateur de résidus flexible.

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateur et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

Plusieurs techniques existent pour la synthèse d'un générateur de résidus par exemple : observateur de Luenberger, observateurs à entrées inconnues, observateur proportionnel intégral. Les résidus ainsi générés sont exploités par un système de décision permettant de déterminer l'action à mener en fonction des propriétés du résidu [11].



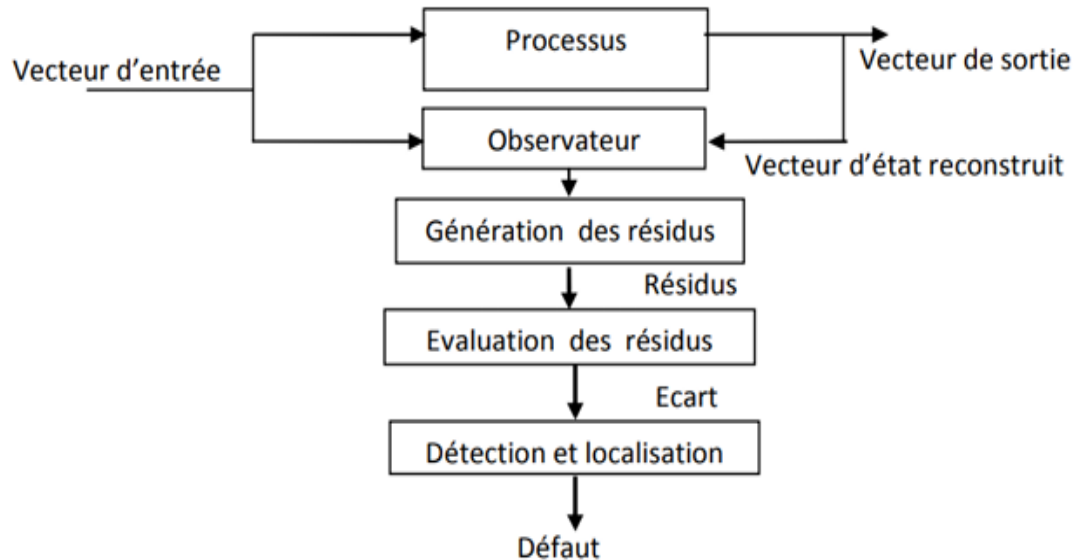


Fig I.14 Approche physique utilisation des observateurs.

### I.8.3 Estimation paramétrique

Les techniques estimations paramétriques sont utilisées depuis plusieurs années dans les applications des machines électriques, et leur objectif est de déterminer un modèle dynamique du système basé sur des mesures expérimentales (entrées et sorties). Le diagnostic repose sur les variations des paramètres qui indiquent des défauts dans le système.

Ces techniques nécessitent le choix d'un modèle adapté et d'un algorithme permettant de minimiser l'erreur entre le modèle et la machine. La sensibilité au bruit et la précision des mesures sont essentielles pour évaluer la performance. De plus, l'excitation utilisée dans le modèle doit être suffisante pour garantir la stabilité et la précision.

Différents modèles ont été développés pour les machines asynchrones et synchrones afin d'identifier les paramètres, en utilisant des algorithmes comme le filtre de Kalman étendu et la méthode des moindres carrés. La plupart des études se concentrent sur l'amélioration de la connaissance des paramètres pour optimiser les performances des algorithmes de contrôle, comme le contrôle adaptatif.

Cependant, ces techniques ne permettent pas d'étudier tous les défauts, tels que les défauts de roulements. Dans la section suivante, nous aborderons les méthodes de diagnostic sans modèle, qui se concentrent sur le suivi et l'analyse de grandeurs telles que les courants, les vibrations, les flux et le couple [11].



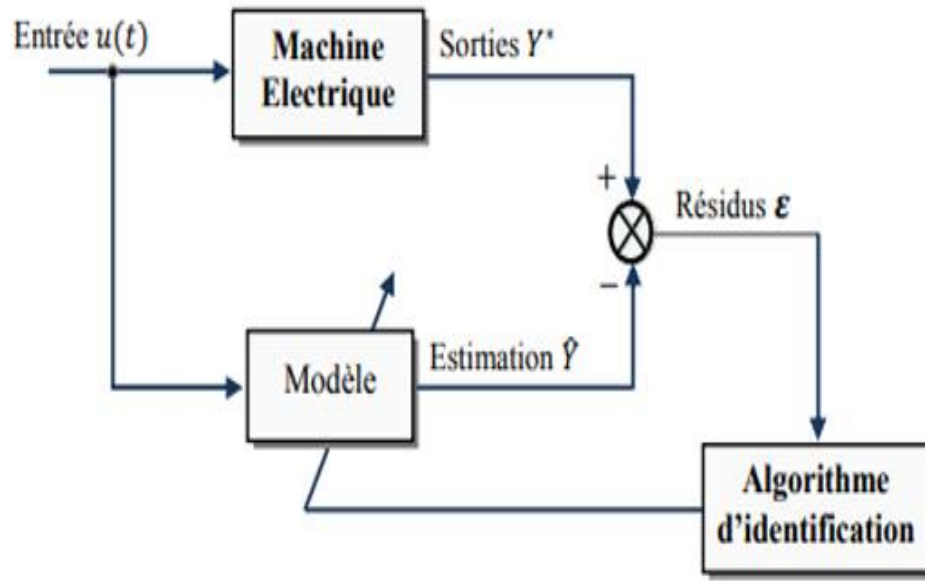


Fig I.15 Principe de la technique estimation paramétrique.

### I.9 Méthodes externes

Les méthodes externes représentent un ensemble d'approches qui reposent sur le suivi direct de grandeurs telles que les courants, le couple estimé ou mesuré, les flux, et les vibrations, sans nécessiter de connaissance préalable du comportement dynamique du système. Contrairement aux méthodes basées sur des modèles, ces techniques, dites "sans modèles", s'appuient sur l'analyse des signaux acquis directement du système. L'un des principaux avantages de ces méthodes réside dans leur indépendance vis-à-vis des fluctuations internes du système, ce qui les rend moins sensibles aux perturbations imprévues au sein de la machine. De plus, les informations contenues dans ces signaux restent intactes et complètes, puisqu'elles ne sont pas filtrées ou altérées par un modèle, ce qui permet un diagnostic plus direct et précis des défauts.

#### I.9.1 Diagnostic par systèmes experts

Un système expert est un outil intelligent qui simule le raisonnement d'un spécialiste, notamment dans des situations complexes où il est difficile de prévoir toutes les configurations possibles à l'avance. À partir d'une description partielle d'une situation, le système est capable de formuler un diagnostic initial, de générer de nouvelles hypothèses, puis d'affiner son analyse en exploitant des informations supplémentaires recueillies.

Ce type de système repose sur trois composants essentiels :

- La base de connaissances : Elle regroupe l'ensemble des règles et des savoirs du domaine concerné. C'est une partie stable du système, utilisée pour résoudre les problèmes [12].

## Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

- La base de faits : Elle contient les données initiales sur le système étudié et s'enrichit au fur et à mesure avec de nouveaux faits ou conclusions issues du raisonnement.
- Le moteur d'inférence : C'est le cœur du raisonnement du système. Il croise les faits avec les connaissances pour produire des résultats, et génère de nouvelles informations à ajouter à la base de faits.

L'interaction entre ces composants permet au système expert de prendre des décisions pertinentes même en présence d'informations incomplètes.

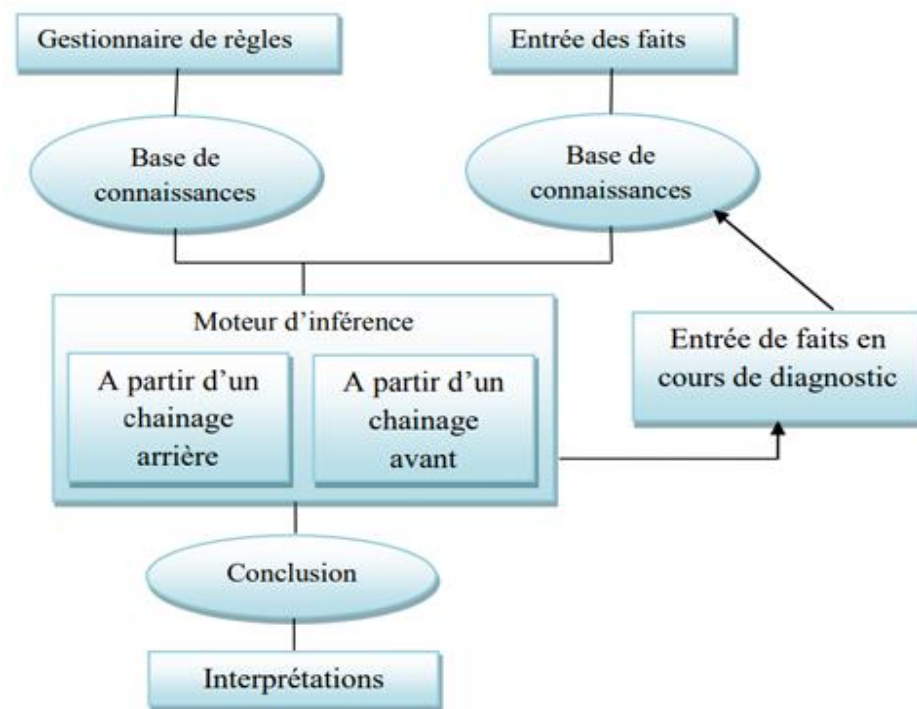


Fig I.16 Architecture générale d'un système expert de diagnostic.

### I.9.2 Diagnostic par analyse des signaux

Le principe des méthodes d'analyse des signaux repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles spécifiques au fonctionnement normal ou défaillant d'un système. La première étape de cette approche consiste à modéliser les signaux en l'analysant dans le domaine fréquentiel, en identifiant leur contenu spectral, leur variance, etc.

L'apparition d'un défaut engendre divers phénomènes tels que le bruit, l'échauffement ou les vibrations, qui traduisent une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. De nombreuses techniques de traitement du signal ont été développées dans la littérature pour détecter ce type de défauts, notamment dans les machines électriques, avec une efficacité particulière pour les

## Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

---

défauts du rotor. Ces défauts se manifestent par l'apparition de fréquences spécifiques liées à la vitesse de rotation, ce qui rend ces méthodes bien adaptées à leur détection.

L'analyse spectrale, ne nécessitant qu'un capteur de courant et/ou un capteur de vitesse, est aujourd'hui l'une des méthodes les plus économiques et rapides, d'où son adoption par de nombreux industriels. Toutefois, elle reste principalement applicable aux diagnostics effectués à vitesse constante et sur des machines alimentées par un réseau à fréquence fixe.

Ces méthodes présentent l'avantage d'être indépendantes des fluctuations internes du système. De plus, l'information contenue dans les signaux reste intacte, car elle n'est pas filtrée par un modèle mathématique [12].

### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents concepts liés au diagnostic des pannes, ainsi que la structure de la machine asynchrone (MAS). Les principales pannes courantes affectant cette machine ont également été passées en revue. Une analyse critique des méthodes de diagnostic adoptées a été réalisée, et nous avons conclu que les techniques de diagnostic sont généralement adaptées au système étudié, en raison de la difficulté, voire de l'impossibilité, de modéliser avec précision toutes les pannes physiques pouvant affecter la machine asynchrone.

Dans le chapitre suivant, l'accent sera mis sur la modélisation du comportement de la machine asynchrone en régime normal et en présence de pannes, ainsi que sur l'étude de l'impact de ces pannes sur ses performances.

## **Chapitre I : État de l’art sur le diagnostic des machines asynchrones**

.....



## **Chapitre II**

# **Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts**

### II.1 Introduction

La simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil constitue une étape essentielle faisant suite à la modélisation mathématique, laquelle repose sur l'utilisation de circuits électriques interconnectés magnétiquement. Ce chapitre se concentre sur la modélisation des défauts pouvant affecter le rotor, en particulier ceux liés aux barres du rotor ou à l'anneau de court-circuit.

Cette modélisation vise à analyser les effets des défauts du rotor sur les performances globales de la machine, en étudiant les variations de certaines grandeurs électriques et mécaniques telles que la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, les courants dans le stator et les courants dans le rotor.

Cette étude contribue à une meilleure compréhension du comportement de la machine en conditions non idéales, ce qui permet d'améliorer les techniques de détection des défauts et de développer des stratégies de maintenance préventive.

### II.2 Hypothèses considérées pour le modèle circuit électrique de la MAS

La modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil, en particulier dans le cas de l'étude des défauts des barres du rotor tels que les cassures ou les fissures, repose sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices afin de garantir la précision de l'analyse sans complexifier le modèle.

Parmi les principales hypothèses, on considère :

- Un entrefer constant,
- Un équilibrage des enroulements,
- L'absence de saturation magnétique,
- Répartition uniforme des barres dans la cage d'écureuil.
- Il est également supposé que le champ magnétique est de forme sinusoïdale et que les surfaces internes de la machine sont lisses, en négligeant les effets de bout d'enroulement.

Ces hypothèses permettent l'élaboration d'un modèle électrique équivalent apte à analyser l'impact des défauts sur les performances du moteur en termes de courants, de flux magnétique et de couple électromagnétique [13].

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone saine

Le comportement dynamique du moteur asynchrone est considéré comme complexe en raison de son lien avec le phénomène d'induction électromagnétique, qui constitue le principe fondamental de

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

fonctionnement de ce type de machine. Toutefois, l'adoption d'un ensemble d'hypothèses simplificatrices permet de construire un modèle mathématique représentant avec précision le comportement de la machine.

### II.4 Modèle mathématique de la machine asynchrone

La machine est représentée par le schéma de la figure, se compose :

Un circuit statorique fixe, et rotorique mobile comportant trois enroulements identiques décalés dans l'espace faisant eux de  $2\pi/3$ .

Les trois enroulements rotoriques sont coupés en étoile et court-circuités [14].

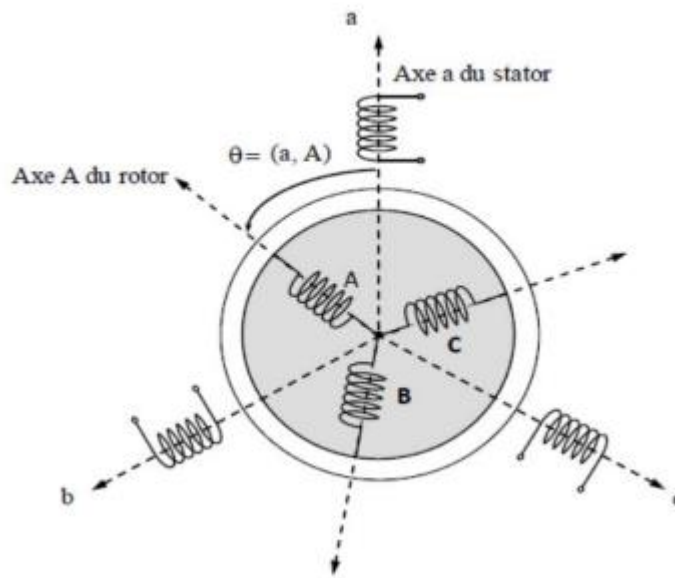


Fig II.1 Modèle de la machine asynchrone.

$\theta$ : Angle électrique de rotation du rotor mesurée entre l'axe magnétique de la phase statorique  $S_a$  et la phase rotorique  $R_a$ .

#### II.4.1 Équations électriques

Chaque phase statorique présente une résistance  $R_s$ . Les tensions aux bornes des phases a, b, c sont respectivement appelées ( $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$ ) les courants qui les parcourent ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) et les flux totaux à travers ces bobines ( $\phi_{sa}$ ,  $\phi_{sb}$ ,  $\phi_{sc}$ ) les lois des mailles s'écrivent ainsi :



## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Ces relations peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.2})$$

En posant :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; \quad I_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; \quad \phi_s = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} : \quad R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Chaque phase rotorique présente une résistance  $R_r$ . Les tensions aux bornes des phases A, B, C sont respectivement appelées ( $V_{rA}$ ,  $V_{rB}$ ,  $V_{rC}$ ) les courants qui les parcourent ( $i_{rA}$ ,  $i_{rB}$ ,  $i_{rC}$ ) et les flux totaux à travers ces bobines ( $\phi_{rA}$ ,  $\phi_{rB}$ ,  $\phi_{rC}$ ) les lois des mailles s'écrivent ainsi :

$$\begin{cases} V_{rA} = R_r i_{rA} + \frac{d}{dt} \phi_{rA} \\ V_{rB} = R_r i_{rB} + \frac{d}{dt} \phi_{rB} \\ V_{rC} = R_r i_{rC} + \frac{d}{dt} \phi_{rC} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Ces relations peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[V_{rABC}] = [R_r][I_{rABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rABC}] \quad (\text{II.4})$$

En posant :

$$V_r = \begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix} ; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{rA} \\ i_{rB} \\ i_{rC} \end{bmatrix} ; \quad \phi_r = \begin{bmatrix} \phi_{rA} \\ \phi_{rB} \\ \phi_{rC} \end{bmatrix} : \quad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$V_r$  Est la matrice colonne des tensions,  $i_r$  la matrice colonne des courants,  $\phi_r$  la matrice colonne des flux totaux pour le rotor.

Dans le fonctionnement normal du moteur, l'enroulement du rotor est en court-circuité (c'est le seul cas possible pour un moteur a cage), est l'équation électrique du moteur devient :

$$0 = R_r i_r + \frac{d}{dt} \phi_r \quad (\text{II.5})$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

Avec :

$V_{sabc}$  : Tension instantanée des phases a, b, c statorique (V).

$V_{rABC}$  : Tension instantanée des phases A, B, C rotoriques (V).

$I_{sabc}$  : Courants instantanées des phases a, b, c statorique (A).

$I_{rABC}$  : Courants instantanées des phases A, B, C rotoriques (A).

$\phi_{sabc}$  : Flux totaux à travers les phases a, b, c statorique (Wb).

$\phi_{rABC}$  : Flux totaux à travers les phases A, B, C rotorique (Wb).

$R, R_r$  : Respectivement les résistances d'une phase statorique et rotorique ( $\Omega$ ).

### II.4.2 Équations magnétiques

Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = [L_s] I_{sa} + [M_{sr}] I_{rA} \\ \phi_{sb} = [L_s] I_{sb} + [M_{sr}] I_{rB} \\ \phi_{sc} = [L_s] I_{sc} + [M_{sr}] I_{rC} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{rA} = [L_r] I_{rA} + [M_{rs}] I_{sa} \\ \phi_{rB} = [L_r] I_{rB} + [M_{rs}] I_{sb} \\ \phi_{rC} = [L_r] I_{rC} + [M_{rs}] I_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Les relations entre flux totaux et les courants peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[\phi_s] = [L_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \quad (\text{II.8})$$

$$[\phi_r] = [L_r] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \quad (\text{II.9})$$

En posant :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad ; \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Ou :

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Notons que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

$L_{ss}, L_{rr}$ : Sont respectivement les matrices des inductances statorique et rotorique.

$L_s, L_r$ : Sont respectivement les inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique.

$M_s, M_r$ : Sont respectivement les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques.

$M_{sr}$ : Est la valeur maximale de l'inductance mutuelles entre la phase statorique et la phase rotorique.

### II.4.3 Équations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$J$ : Moment d'inertie (kg.m<sup>2</sup>).

$\Omega$ : Vitesse de rotation rotorique de la machine (rad/s).

$C_e$  : Couple électromagnétique (N.m).

$C_r$  : Couple résistant (couple de charge) (N.m).

$f$ : Coefficient de frottement (N.m.s/rad).

On note que le modèle obtenu de la machine étudiée présente un inconvénient majeur :

- Un membre important de variable couplée entre elles ;

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

- Des paramètres des équations différentielles et les matrices  $[M_{sr}]$ ,  $[M_{rs}]$  dépendent de l'angle de rotation  $\theta$  entre stator et rotor.

Pour pallier à ce problème, on cherche une transformation linéaire des variables triphasées de la machine qui permet la réduction de la complexité du système à étudier, on peut citer la transformation de Park qui sera utilisée dans notre travail.

### II.4.4 Transformation de Park

Cette conversion est appelée souvent transformation des axes. Elle fait correspondre aux trois enroulements de la machine originale des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

Cette transformation a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation.

La transformation de Park permet de transformer les trois phases statorique et rotoriques du système triphasé (a, b, c) par un système biphasé (d, q, h) constitué des grandeurs équivalentes d'axes d et q et une composante homopolaire (h) qui n'est pas prise en compte dans le modèle de la machine [14].

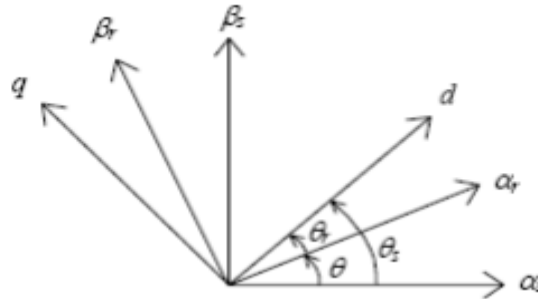


Fig II.2 Repère de Park.

Les angles sont liés à l'angle électrique définissant la position du rotor par :

$\theta_s$ : Angle électrique entre (od) et le stator

$\theta_r = \theta_s - \theta$  : (angle de glissement), angle électrique entre (od) et le rotor est :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (II.12)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (II.13)$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Alors ; } \omega_s = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.15})$$

La matrice de transformation directe de Park permet d'obtenir les composantes du système réel à partir des composantes du système fictif.

$$[X_{dq}] = P(\theta) [X_{abc}] \quad (\text{II.16})$$

On a ;

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2*\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2*\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2*\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2*\pi}{3} \right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice de transformation inverse de Park permet d'établir les valeurs des composantes fictives du système réel.

Le passage de système triphasé abc vers le système diphasé dq :

$$[X_{abc}] = P(\theta)^{-1} [X_{dq}] \quad (\text{II.18})$$

On a ;

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2*\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2*\pi}{3} \right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos \left( \theta + \frac{2*\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2*\pi}{3} \right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

### II.4.4.1 Équations électriques

Nous pouvons en déduire les relations entre les composantes de Park :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} (\Phi_{sd}) - \Phi_{sq} \frac{d\theta_s}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} (\Phi_{sq}) + \Phi_{sd} \frac{d\theta_s}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Introduisons la vitesse angulaire électrique du repère dq, définie par :

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

Les expressions des tensions deviennent ainsi :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\Phi_{sd}) - \Phi_{sq} \omega_s \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}(\Phi_{sq}) + \Phi_{sd} \omega_s \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

La même démarche appliquée au rotor conduit à :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} - \Phi_{rq} \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d}{dt}(\Phi_{rd}) \\ 0 = R_r i_{rq} + \Phi_{rd} \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d}{dt}(\Phi_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :  $\omega = \omega_s - \omega_r$  , Alors :  $\omega_r = \omega_s - \omega$ .

Donc les expressions des tensions rotoriques deviennent ainsi :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} - \Phi_{rq}(\omega_s - \omega) + \frac{d}{dt}(\Phi_{rd}) \\ 0 = R_r i_{rq} + \Phi_{rd}(\omega_s - \omega) + \frac{d}{dt}(\Phi_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Alors le modèle électrique de la MAS est décrit par le système d'équation :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\Phi_{sd}) - \Phi_{sq} \omega_s \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}(\Phi_{sq}) + \Phi_{sd} \omega_s \\ 0 = R_r i_{rd} - \Phi_{rq}(\omega_s - \omega) + \frac{d}{dt}(\Phi_{rd}) \\ 0 = R_r i_{rq} + \Phi_{rd}(\omega_s - \omega) + \frac{d}{dt}(\Phi_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

### II.4.4.2 Équations magnétiques

Partons de la relation :

$$\Phi_s = L_s I_s + M_{sr} i_r$$

Les expressions des composantes de Park des flux totaux du stator sont :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Les expressions des composants de Park des flux totaux du rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$L_s$ : C'est l'inductance cyclique du stator.

$L_r$ : C'est l'inductance cyclique du rotor.

$L_{rb}$ : Sont inductance homopolaire.

$M$  : Est l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Alors le modèle magnétique de la MAS est décrit par le système d'équation :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

### II.4.4.3 Équation du couple électromagnétique

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} I_{sq} - \Phi_{rq} I_{sd}) \quad (\text{II.28})$$

### II.4.4.4 Équation mécaniques

$$C_e - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r \quad (\text{II.29})$$

$J$  : Moment d'inertie des pièces tournantes.

$\omega_r$ : Vitesse mécanique du rotor en (tr/mn)

## II.5 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Considérons une machine à cage d'écureuil ayant (3) enroulements identiques et symétriques au stator dont Chacun est traité en tant qu'enroulement séparé [15].

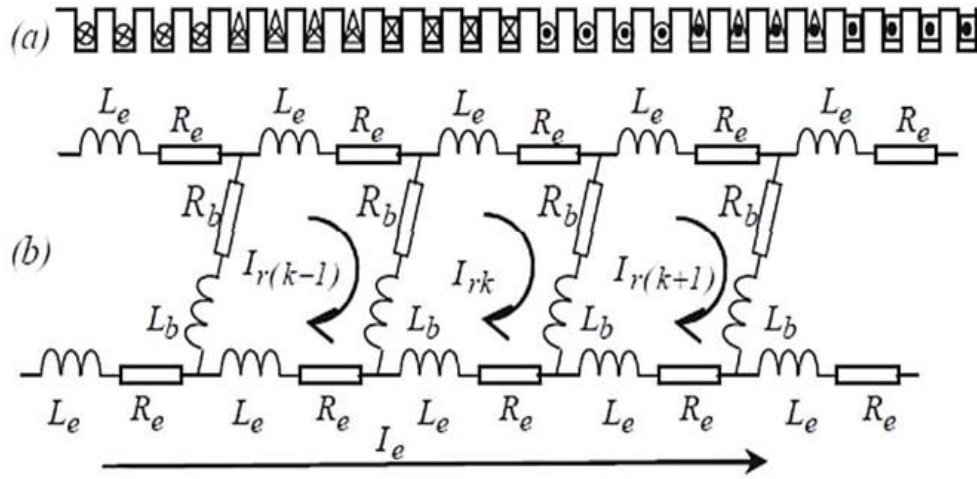


Fig II.3 Structure du stator (a), et du rotor (b).

Le rotor est considéré comme un circuit maillé, c'est-à-dire constitué d'un nombre ( $N_{br}$ ) de barres identiques et équidistantes court-circuitées aux deux extrémités par deux anneaux identiques.

### II.5.1 Equations du stator

Ces équations différentielles vont nous permettre d'associer le vecteur de tension, le vecteur de courant ainsi que le vecteur de flux pour les trois phases statoriques ( $S_a S_b S_c$ ). En généralisant les équations à toutes les phases statoriques, alors l'équation du stator peut être mise sous la forme vectorielle suivante :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (II.30)$$

Où :

$V_s$  : Vecteur des tensions des phases statoriques de dimension 3 (V).

$I_s$  : Vecteur des courants des phases statoriques de dimension 3 (A).

$\psi_s$  : Vecteur des flux traversant les phases statoriques de dimension 3 (Wb).

$R_s$  : Matrice diagonal des résistances des phases du stator de dimensions (3,3) ( $\Omega$ ).

Les vecteurs  $[V_s]$   $[I_s]$   $[\psi_s]$  et la matrice des résistances  $[R_s]$  s'écrivent de la façon suivante :

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}] = [I_{sa} I_{sb} I_{sc}]^t [\psi_s] = [\psi_{sa} \psi_{sb} \psi_{sc}] \quad (II.31)$$



## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \text{ Avec } R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_s$$

Le vecteur de flux statorique  $[\psi_s]$  s'exprime en fonction des vecteurs courants statoriques et courants rotoriques de la manière suivante :

$$[\psi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \quad (\text{II.32})$$

$$[I_r] = [I_{r1} \ I_{r2} \ I_{r3} \ \dots \ I_{r(Nbr+1)}]^t \quad (\text{II.33})$$

Où :

$L_{ss}$  : Est la matrice symétrique des inductances statoriques de dimension (3,3).

$M_{sr}$  : Est la matrice des inductances mutuelles des phases statoriques et les mailles rotoriques de dimension (3, Nbr+1).

Ces deux matrices s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sasa} & M_{sasb} & M_{sasc} \\ M_{sbbsa} & L_{sbbsb} & M_{sbbsc} \\ M_{scbsa} & M_{scbsb} & L_{scbsc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Où : L'inductance totale d'une bobine statorique est la somme à l'inductance magnétisant  $L_{ms}$  et l'inductance de fuite  $L_{fs}$ :

$$L_{sasa} = L_{sbbsb} = L_{scbsc} = L_{ms} + L_{fs} \quad (\text{II.35})$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sar2} & M_{sar} \\ M_{sbr1} & M_{sbr2} & M_{sbr} \\ M_{scr1} & M_{scr2} & M_{scr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$M_{sari}$  : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la ( $i^{eme}$ ) maille rotorique.

$M_{sbri}$  : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "b" et la ( $i^{eme}$ ) maille rotorique.

$M_{scri}$  : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "c" et la ( $i^{eme}$ ) maille rotorique.

$M_{smri}$  : L'inductance mutuelle entre la phase m du stator et la maille i du rotor s'écrit de la façon suivante :

$$M_{sari} = M_{sr} \cos(\theta + K_a)$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$M_{sari} = M_{sr} \cos(\theta + K_a - \frac{2\pi}{3})$$

$$M_{sari} = M_{sr} \cos(\theta + K_a + \frac{2\pi}{3}) \quad (II.37)$$

$$M_{sr} = \frac{4u_0 N_s Rl}{ep^2\pi} \sin(\frac{a}{2}) \quad (II.38)$$

$$a = p \frac{2\pi}{q} \quad \text{Et } k = 1, 2, 3, \dots \text{ Nbr}-1$$

La matrice  $M_{sr}$  peut-être représenté sous la forme suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & M_{sr} \cos(\theta + K_a) & \dots \\ \dots & M_{sr} \cos(\theta + K_a - \frac{2\pi}{3}) & \dots \\ \dots & M_{sr} \cos(\theta + K_a - \frac{4\pi}{3}) & \dots \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

Où :

$u_0$  : Perméabilité magnétique de l'entrefer.

$N_s$  : Nombre de spires par phase statorique.

$R_e$  : Rayon moyen de l'entrefer.

$l$  : Longueur de rotor.

$q$  : Nombre des barres rotoriques.

$e$  : L'épaisseur de l'entrefer.

Si les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les segments de l'anneau de court-circuit sont négligées, la dernière colonne de la matrice représentée par un zéro. Ce qui peut se mettre sous la forme :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sar2} & M_{sar}(nbr) & 0 \\ M_{sbr1} & M_{sbr2} & M_{sar}(nbr) & 0 \\ M_{scr1} & M_{scr2} & M_{sar}(nbr) & 0 \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

On peut remarquer, à ce stade, que la matrice  $[L_{ss}]$  est de dimensions (3,3) compte tenu du nombre de phases statoriques, alors que la matrice  $[M_{sr}]$  est de dimensions (3, Nbr+1) ce qui implique que le vecteur  $[i_r]$  des courants rotoriques comportera (Nbr+1) éléments Correspondants aux (Nbr) mailles (Nbr barres) de la cage plus la maille de l'anneau de court-circuit. En remplaçant l'équation (II.32) dans (II.30) on obtient :

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d[i_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[i_r]}{dt} + [i_r] \frac{d[M_{sr}]}{dt} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

$$\frac{d[M_{sr}]}{dt} [i_r] = \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [i_r] \quad (\text{II.42})$$

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Où :

$\theta_r$  : Est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

$\Omega$  : Est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (II.42) et (II.43) dans (II.41), on obtient :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d[i_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[i_r]}{dt} + \Omega \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_r] \quad (\text{II.44})$$

### II.5.2 Equations du rotor

La cage d'écuréuil de la machine se compose de (Nbr) encoches rotoriques (nombre de barres rotoriques) qui peuvent se décomposer en (Nbr+1) circuits électriques rotoriques indépendants. À chacun de ces circuits (boucles) on associe un courant, ce qui amène à calculer (Nbr+1) courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit.

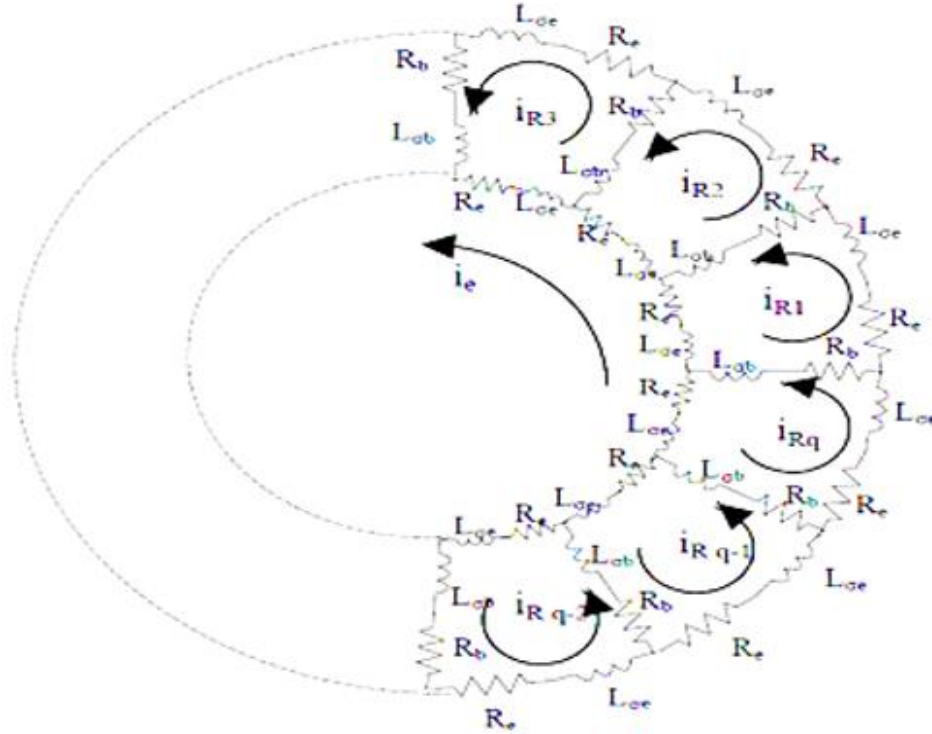


Fig II.4 Maile du rotor à cage d'écureuil.

Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus un (tenant compte de l'un des deux anneaux). Par conséquent, les courants indépendants dans la cage sont au nombre de (Nbr+1).

La mise en équation de la maille rotorique (k) de la cage donne lieu à l'expression suivante :

$$-R_b i_{rk-1} + 2(R_b + R_e) i_{rk} - R_b i_{rk+1} - R_e i_e + \frac{d}{dt} \psi_{rk} + \frac{d}{dt} \psi_{sk} = 0 \quad (\text{II.45})$$

Où :

$\psi_{rk}$  Et  $\psi_{sk}$  : ont respectivement le flux de la cage envoyé à travers la maille (k), y compris le flux propre de la maille (k), et le flux envoyé par les bobinages statoriques à travers la maille (k). De la même façon pour le stator, en désignant par ( $L_{rrkn}$ ) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la maille (n) d'un côté, et par ( $L_{rskn}$ ) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la phase statorique (n) de l'autre, les flux  $\psi_{rk}$  et  $\psi_{sk}$  s'écrivent en fonction des courants de mailles et de phases de la façon suivante :

$$\psi_{sk} = \sum_{n=1}^m L_{rskn} I_{sn} \quad (\text{II.46})$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$\psi_{sk} = (L_{rrkn} - L_b)L_{rk-1} + (L_{rrkn} + 2(L_b + L_e)L_{rk-1} + (L_{rrkn} - L_b)L_{rk+1} + \sum_{\substack{n=1 \\ n=k \\ n=k+1}}^n L_{rrkn} - L_e I_e$$

Les équations précédentes peuvent être généralisées à toutes les mailles de la cage. A cela, il faut ajouter l'équation d'un anneau de court-circuit en considérant qu'il n'y a pas de flux axial dans la machine :

$$qR_e i_e - \sum_{n=1}^m R_e I_{rn} + \frac{d}{dt} (qL_e i_e - \sum_{n=1}^q L_e I_{rn}) = 0 \quad (\text{II.47})$$

En regroupant les équations précédentes (2-18) et (2-19) sous forme matricielle, on aboutit à l'équation du rotor :

$$[V_r] = [0] = [R_r][V_r] + \frac{d}{dt} [\psi_s] \quad (\text{II.48})$$

Le vecteur flux rotorique  $[\psi_s]$  s'exprime en fonction des vecteurs courants rotoriques et statoriques de la manière suivante :

$$[\psi_s] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.49})$$

Où :

$V_r$  : Est le vecteur des tensions rotoriques, qui est nul pour le cas d'un rotor à cage d'écureuil (V).

$i_r$  : Est le vecteur des courants de mailles rotoriques, de dimension (q+1) (A).

$\psi_s$  : Est le vecteur des flux traversant les mailles rotoriques, de dimension (q+1) (Wb).

$R_r$  : Est la matrice des résistances de la cage, de dimensions (q+1, q+1) ( $\Omega$ ).

$L_{rr}$  : Est la matrice des inductances propres rotoriques.

$M_{rs}$  : Est la matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques, elle est égale à la matrice  $[M_{rs}]^t$ .

$$[i_r] = [i_{r1} \ i_{r2} \ i_{r3} \ \dots \ i_{r(q+1)}]^t \quad \text{Et} \quad [\psi_s] = [\psi_{s1} \ \psi_{s2} \ \dots \ \psi_{s(q+1)}]^t \quad (\text{II.50})$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \dots & 0 & -R_e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & (N_{br} + 1)(-R_e) \end{bmatrix}$$

Avec :  $R_b$  et  $R_e$  représentent, respectivement, la résistance d'une barre rotorique et la résistance d'un segment de l'anneau de court-circuit.

- $L_{rr}$  : Est de dimensions  $(N_{br}+1, N_{br}+1)$  composées par l'inductance de fuite d'une barre  $L_b$  et l'inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit  $L_e$  en plus insérant les inductances propres aux mailles  $L_{mr}$  et les inductances mutuelles  $L_{rirj}$  entre la maille  $i$  et la maille  $j$ .
- $M_{rs}$  : Est de dimensions  $(N_{br}+1, 3)$ . Ces deux matrices s'écrivent de la façon suivante :

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sbr1} & M_{scr1} \\ M_{sar2} & M_{sbr2} & M_{scr2} \\ \dots & \dots & \dots \\ M_{sar(N_{br}+1)} & M_{sbr(N_{br}+1)} & M_{scr(N_{br}+1)} \end{bmatrix} \quad (II.51)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \dots & -L_{r1rq} - L_b & -L_e \\ -L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_{r2r3} - L_b & \dots & -L_{r2rq} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -L_e \\ L_{rqr1} - L_b & L_{rqr2} & L_{rqr3} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -(N_{br} + 1)L_e \end{bmatrix}$$

Où :

$L_{mr}$  : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique. L'inductance principale d'une maille rotorique est donnée par l'équation suivante :

$$L_{rp} = \frac{N_{br}-1}{N_{br}^2} \frac{u_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot R_e \quad (II.52)$$

La mutuelle entre deux mailles rotoriques est donnée par l'équation suivante :

$$M_{rr} = \frac{-1}{N_{br}^2} \frac{u_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot R_e \quad (II.53)$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

En remplaçant l'équation (II.49) dans (II.48), on obtient :

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{di_r}{dt} [M_{rs}] \frac{di_s}{dt} + \frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] \quad (\text{II.54})$$

Sachant que :

$$\frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] = \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [i_s] \quad (\text{II.55})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{di_r}{dt} [M_{rs}] \frac{di_s}{dt} + \Omega \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_s] \quad (\text{II.56})$$

### II.5.3 Système d'équations global de la machine

Les deux équations matricielles (II.34) et (II.42) du stator et du rotor peuvent être regroupées dans une seule équation sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{rs}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \Omega \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

On obtient :

$$[V] = [R][I] + L \left\{ \frac{d}{dt} [i] \right\} + \Omega \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (\text{II.58})$$

Où :

- $[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix}$  de dimension  $(3 + N_{br} + 1)$ .
- $[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}$  de dimension  $(3 + N_{br} + 1)$ .
- $[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix}$  de dimension  $(3 + N_{br} + 1, 3 + N_{br} + 1)$ .
- $[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{rs}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$  de dimension  $(3 + N_{br} + 1, 3 + N_{br} + 1)$ .

La vitesse mécanique de rotation du rotor :

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.59})$$

La vitesse mécanique de l'arbre s'écrit de la façon suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{II.60})$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

Où :

$C_{em}$  : Est le couple électromécanique (Nm).

$C_r$  : Est le couple de charge (Nm).

$J$  : Est le moment d'inertie de l'ensemble de masses tournantes.

$f$  : Est le coefficient de frottement visqueux.

Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de la Co-énergie magnétique emmagasinée dans la machine :

$$C_{em} = \left[ \frac{\partial W_{ce}}{\partial \theta_r} \right] \quad (\text{II.61})$$

Dans un système magnétique linéaire, la Co-énergie est égale à l'énergie stockée dans un circuit linéaire s'exprime en fonction des courants et des inductances :

$$W_{co} = \frac{1}{2} [I]^T [L] [I] \quad (\text{II.62})$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I]^T \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (\text{II.63})$$

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^t & i_r^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.64})$$

$$W_{co} = \frac{1}{2} i_s^t L_{ss} + \frac{1}{2} i_s^t M_{sr} i_r + \frac{1}{2} i_s^t M_{rs} i_s + \frac{1}{2} i_r^t L_{rr} i_r \quad (\text{II.65})$$

Dans ce cas  $L_{ss}$  et  $L_{rr}$  contiennent seulement des éléments constants donc :

$$\frac{dL_{ss}}{d\theta_r} = 0 \quad \text{Et} \quad \frac{dL_{rr}}{d\theta_r} = 0 \quad (\text{II.66})$$

En remplaçant les équations (II.65) et (II.66) dans (II.61), on obtient :

$$C_{em} = \frac{1}{2} i_s^t \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r + \frac{1}{2} \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r^t i_s \quad (\text{II.67})$$

Pour un entrefer uniforme  $M_{sr}$  et  $M_{rs}$  sont égaux, l'expression du couple électromagnétique se réduit à la forme suivante :



## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$C_{em} = i_s^t \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r \quad (\text{II.68})$$

Les équations (II.59) et (II.60) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{em} & - & C_r \\ 0 & & \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

En combinant l'équation électrique (II.69) et l'équation de mouvement (II.58), les équations de la machine asynchrone s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] + \Omega \frac{d}{d\theta_r} [L] & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} [i]^t \frac{d[L]}{d\theta_r} & f & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

Ce qui donne une forme condensée sous la forme suivante :

$$[U] = [B][X] + [A][\dot{X}] \quad (\text{II.71})$$

Le vecteur  $[X]$  peut s'écrire :

$$[\dot{X}] = [A]^{-1}([U] - [B][X]) \quad (\text{II.72})$$

Le vecteur  $[u]$  est donné par l'expression suivante :

$$[u] = ([v], [-C_r], [0])^t \quad (\text{II.73})$$

La matrice  $[A]$  obtenue s'écrit sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [A_0]^t & [A_0]^t \\ [M_{rs}] & [L_r] & [A_0]^t & [A_0]^t \\ [A_0] & [A_0] & j & 0 \\ [A_0] & [A_0] & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.74})$$

Avec :  $[A_0] = [A_{0sta} \ A_{0rot} \ A_{0cc}]$

$$A_{0stator} = \text{zeros}(1,3)$$

$$A_{0rotor} = \text{zeros}(1, N_{br})$$

$$A_{0cc} = 0$$

La matrice  $[B]$  est donnée sous la forme suivante :

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$B = \begin{bmatrix} [R_s] & \Omega \left[ \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] & [S_0]^t & [S_0]^t \\ \Omega \left[ \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] & [R_r] & [B_0]^t & [B_0]^t \\ C_{stator} & C_{barre} & f & 0 \\ [S_0] & [B_0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.75)$$

Les deux matrices qui interviennent dans l'expression de la matrice [B] sont :

$$\left[ \Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] = -M_{rs} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1Nr+1} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2Nr+1} \\ g_{31} & g_{32} & \dots & g_{3Nr+1} \end{bmatrix} \quad (II.76)$$

$$\left[ \Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] = -M_{rs} \begin{bmatrix} \Omega \sin(\theta_r) & \Omega \sin(\theta_r + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r + (N_{rb+1})a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (N_{rb+1})a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + (N_{rb+1})a) \end{bmatrix}$$

Les constantes  $C_{stator}$  et  $C_{rotor}$  et  $C_{barre}$  et  $B_0$  sont définies comme suit :

$$C_{stator} = 0.5p[i_r][H]^T \quad (II.77)$$

$$C_{rotor} = 0.5p[i_s][H] \quad (II.78)$$

$$C_{barre} = [C_{rotor} \ 0] \quad (II.79)$$

$$[B_0] = \text{zeros}(1, N_{br} + 1) \quad (II.80)$$

$$[H] = M_{rs} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + a) & \dots & \sin(\theta_r + (N_{rb+1})a) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + (N_{rb+1})a) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (N_{rb+1})a) \end{bmatrix} \quad (II.81)$$

### II.6 Simulation de moteur sain

Une simulation d'un moteur en bon état a été réalisée, ce qui a permis de tracer les courbes des grandeurs électromécaniques (couple, vitesse et courant). Les figures II.5, II.6, II.7 montrent l'évolution de ces grandeurs en régime transitoire et permanent, en fonctionnement sain sous une charge de 4 Nm.

Il est très clair que le comportement de ces grandeurs ne présente aucune ondulation ni perturbation. Afin d'obtenir des données plus précises et représentatives, il est utile d'effectuer une analyse spectrale du courant statorique à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide (FFT). La figure Fig II.8 représente le spectre du courant statorique.

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

Ce spectre montre que seule l'harmonique fondamentale apparaît à 50 Hz, indiquant qu'il n'y a pas de défaut dans le système.

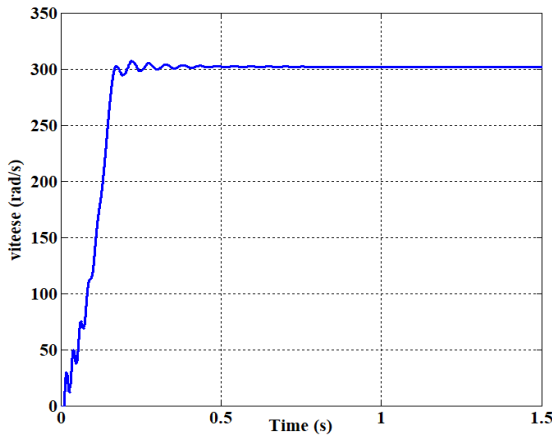


Fig II.5 Vitesse de moteur.

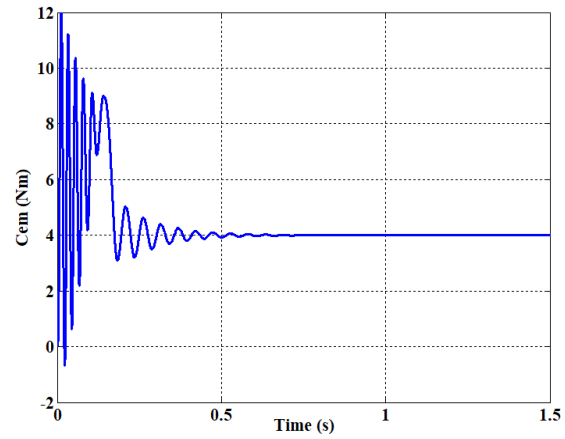


Fig II.6 Couple électromagnétique.

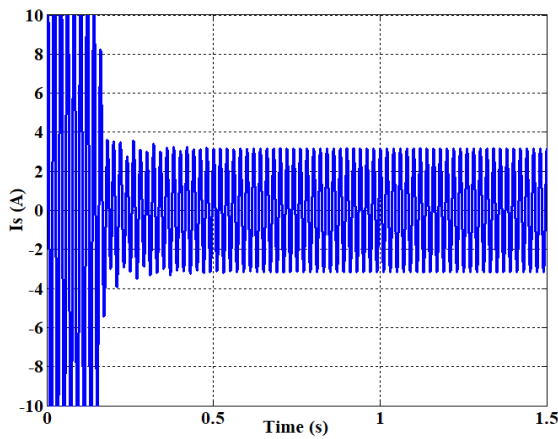


Fig II.7 Courant statorique.

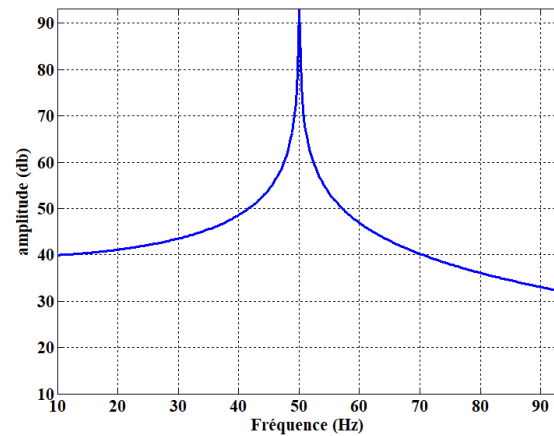


Fig II.8 spectre du courant statorique.

### II.7 Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts

Dans la simulation des défauts affectant les barres du rotor ou les segments des anneaux de court-circuit, le modèle du moteur sain est utilisé tel quel, sans modification de sa structure de base. Les défauts sont simulés en augmentant la résistance des barres ou des segments concernés, de manière à refléter le niveau de rupture partielle souhaité. Cette approche est justifiée par le fait que les ruptures totales des barres sont rarement observées en pratique. Les résultats obtenus sont pertinents, car toutes les composantes fréquentielles prédites par les modèles analytiques peuvent être observées dans les spectres résultants. De plus, plus le facteur de multiplication appliqué aux résistances est élevé, plus la sévérité du défaut simulé est grande, ce qui démontre l'efficacité de ce modèle dans la représentation des défauts partiels [16].

#### II.7.1 Défaut de cassure de barre rotorique

La rupture d'une barre peut être totale ou partielle.

### II.7.1.1 Cassure totale d'une barre

Le cas d'une cassure totale d'une barre signifie que le courant ne passe pas dans cette barre, donc il est nul. La (Fig II.9) montre la disposition générale de deux mailles adjacentes et donne les courants qui circulent dans les barres et dans les anneaux [16].

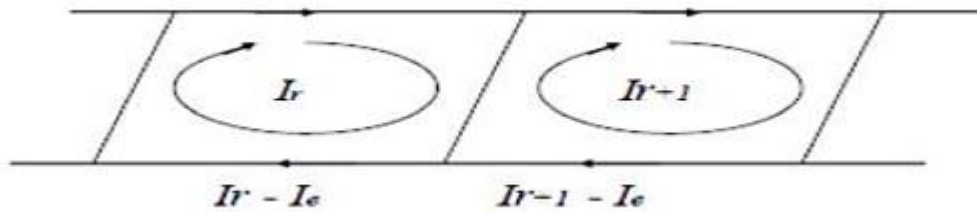


Fig II.9 Deux mailles adjacentes.

Si une barre est ouverte (cassée), cela implique que  $(I_{r+1} = I_r)$  ;

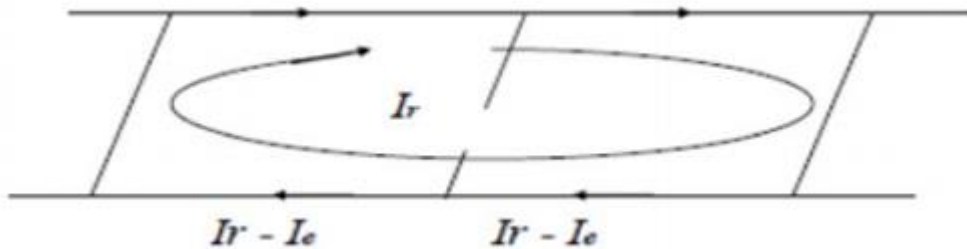


Fig II.10 Deux mailles adjacentes avec une barre cassée.

La condition  $(I_{r+1} = I_r)$  est imposée sur la matrice des résistances et des inductances par l'addition de la colonne relative à  $(I_{r+1})$ , à celle relative à  $(I_r)$ . De même pour les lignes  $(I_{r+1})$  est supprimé du vecteur courant et tension. La taille des matrices est réduite selon le nombre de barres cassées [16].

### II.7.1.2 Cassure partielle d'une barre

Une barre rétrécie ou mal soudée représente une augmentation de la résistance de cette dernière par rapport à une barre normale, Ce qui signifie le passage d'un faible courant dans cette barre. La matrice de résistance est modifiée en augmentant la valeur de la résistance de la barre défectueuse.

Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la Vitesse  $(g\Omega_s)$  par rapport au rotor (glissement de la

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

machine), un champ inverse qui, lui tourne à une Vitesse  $(-g\Omega_s)$  L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance des composantes de fréquence  $(2g\Omega_s)$  dans le couple électromagnétique. Ces composantes seront la cause d'oscillations de la vitesse. Cette dernière donne naissance à des f.é.m. aux pulsations  $(\Omega_s)$ ,  $(1 - 2g)\Omega_s$ , et  $(1 - 4g)\Omega_s$  qui créent à leur tour des courants aux mêmes pulsations. Les champs créent par ces courants vont à leur tour induire au rotor des courants directs et inverses. Ainsi par un processus identique, on retrouve dans le courant statorique des Composantes de fréquences [16] :

$$f_{defaur} = (1 \pm kg)f \quad (II.83)$$

Où :

$k$  : Un entier positif.

$g$  : Le glissement.

$f$  : La fréquence d'alimentation (Hz).

La figure (II.13) permet une meilleure compréhension du fonctionnement du moteur avec un rotor sain et en défaut.

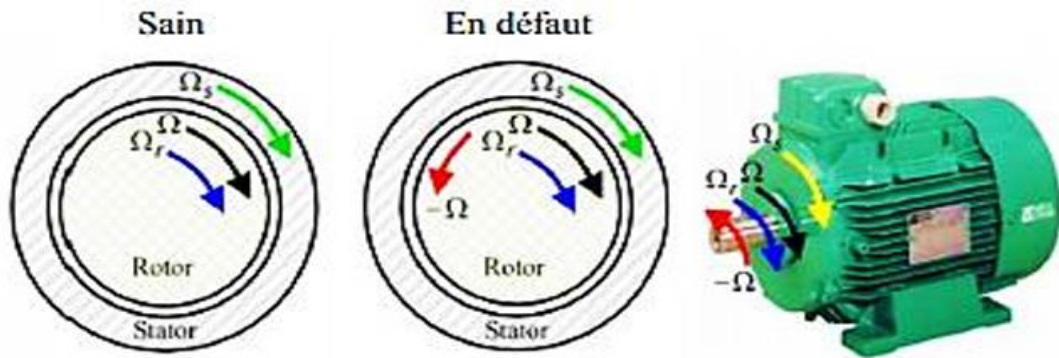


Fig II.11 fonctionnement d'un rotor sain et en défaut.

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (II.84)$$

$\Omega_s$  : Représente la vitesse de synchronisme (rad/s).

$p$  : Est le nombre de paires de pôles de la machine.

$$\Omega_r = (1 - g)\Omega_s \quad (II.85)$$

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$\Omega_r$  : Représente la vitesse de rotation (rad/s).

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{II.86})$$

$g$  : Est le glissement.

Alors :

$$\Omega_{defaut} = \Omega_r - g\Omega_s = (1 - g)\Omega_s - g\Omega_s \quad (\text{II.87})$$

$$\Omega_{defaut} = (1 - 2g)\Omega_s \quad (\text{II.88})$$

D'où la fréquence du défaut :

$$f_{defaut} = (1 - g)f - gf = (1 - 2g)f \quad (\text{II.89})$$

### II.8 Rupture de barres au rotor

Il est assez difficile d'écrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre. La simulation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée. Le circuit électrique rotorique donné par la (Figure II.10) doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

Une première méthode de modélisation consiste à annuler le courant qui traverse cette barre. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre  $k$  est rompue, le courant ( $i_{bk}$ ) dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille ( $k-i$ ) devient égal au courant dans la maille ( $k$ ), c'est-à-dire ( $i_{r(k-i)} = i_{rk}$ ) Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, Par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courant  $i_{r(k-i)}$  et  $i_{rk}$ . Le courant  $i_{rn}$  est donc supprimé du vecteur des courants.

La seconde approche consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible du zéro en régime permanent. En comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle

contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut [17].

### II.8.1 Représentation d'état du modèle de rupture de barre

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est presque le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain. Alors que la matrice des résistances rotoriques est définie comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & . & . & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & . & . & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & .. & . & . & 0 & -R_e \\ . & . & . & .. & . & . & . & . \\ . & . & . & .. & . & . & . & . \\ . & . & . & .. & . & . & . & . \\ . & . & . & .. & \alpha R_{bk} & . & . & . \\ . & . & . & ... & (\alpha 2R_b + R_e) & . & . & . \\ . & . & . & .... & . & . & . & . \\ -R_b & 0 & 0 & .. & .... & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_b & -R_e & -R_e & ... & ... & -R_e & -R_e & (N_{br+1}) - R_e \end{bmatrix}$$

$\alpha$  Est le coefficient d'augmentation de la barre incriminée.

### II.9 Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

Les défauts qui peuvent apparaître au niveau des segments d'anneau de court-circuit ont souvent les mêmes origines que celle présentées pour la cassure d'une barre de la cage rotorique. La méthodologie adoptée pour la prise en compte de ce type de défaut dans le modèle est elle aussi identique à l'approche utilisée pour la simulation d'une barre rotorique défaillante. La simulation d'une rupture d'un segment d'anneau de court-circuit s'effectue en augmentant la valeur de sa résistance de telle sorte que le courant le traversant soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.

#### II.9.1 Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est aussi le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain, avec la matrice résistances rotoriques est définie comme suit :

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & . & . & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & . & . & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & .. & . & . & 0 & -R_e \\ . & . & . & .. & . & . & . & . \\ . & . & . & .. & ... & . & . & . \\ . & . & 2(R_b + \beta R_e) & ... & . & . & . & -\beta R_e \\ . & . & . & .. & ... & . & . & . \\ -R_b & 0 & 0 & ... & ... & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & ... & ... & -R_e & -R_e & -(N_{br+1})R_e + \beta R_e \end{bmatrix}$$

$\beta$  est le coefficient d'augmentation de l'anneau incriminé.

### II.10 Simulation de moteur en présence des Défauts

La simulation du fonctionnement du moteur avec fissure d'une barre rotorique est traduite par l'augmentation de la résistance des barres fissurée. Autrement dit, la résistance  $R_b$  est multipliée par un facteur  $k$  varie entre 70 et 700. Nous pouvons écrire ce facteur en fonction d'un autre facteur  $k'$  varié en pourcentage comme suit :  $k=700*k'$ , avec  $k'=10\%, 20\% \dots 100\%$

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de simulation du fonctionnement du moteur avec fissure d'une barre et de deux barres simultanément.

#### II.10.1 Fissure de 20% d'une barre rotorique

Résultats de la simulation du régime transitoire et permanent du fonctionnement du moteur en charge (Couple résistant  $C_r = 4 \text{ Nm}$ ) :

À l'instant  $t = 1$  seconde, un défaut est introduit sous forme d'une fissure dans une seule barre du rotor. Les figures II.12 et II.13 illustrent respectivement l'évolution du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation.

Ces figures révèlent clairement l'apparition de fluctuations dans le couple et la vitesse par rapport à celles d'un moteur sain. Ces variations sont attribuées à l'effet perturbateur de la fissure sur l'équilibre électromagnétique du système.

La figure II.14 montre l'évolution de courant statorique, On observe que la présence de la fissure affecte significativement l'amplitude du courant statorique, qui présente alors un comportement ondulant (phénomène de battement) en régime permanent.



## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

Enfin, la figure Fig II.15 présente le spectre complet du courant statorique, il est clairement visible que la fissure dans une barre rotorique engendre l'apparition d'harmoniques latérales autour de la fréquence fondamentale.

Ces composantes sont considérées comme des signatures spectrales caractéristiques du défaut de fissure d'une barre, ce qui permet d'envisager une détection précoce à travers l'analyse fréquentielle.

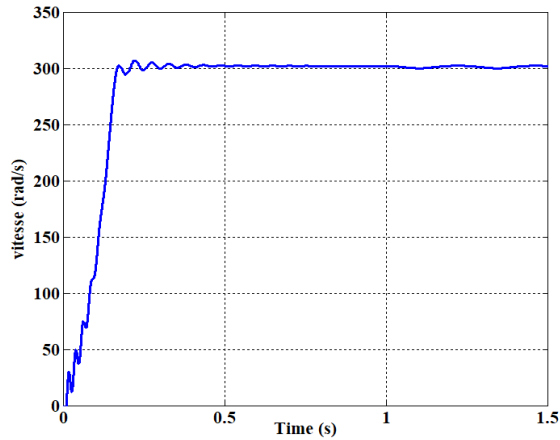


Fig II.12 Vitesse de moteur.

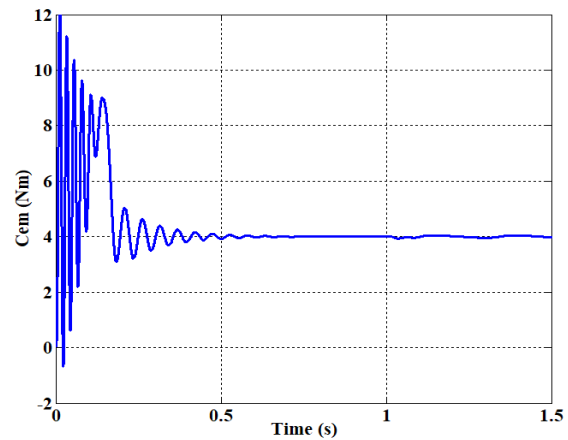


Fig II.13 Couple électromagnétique.

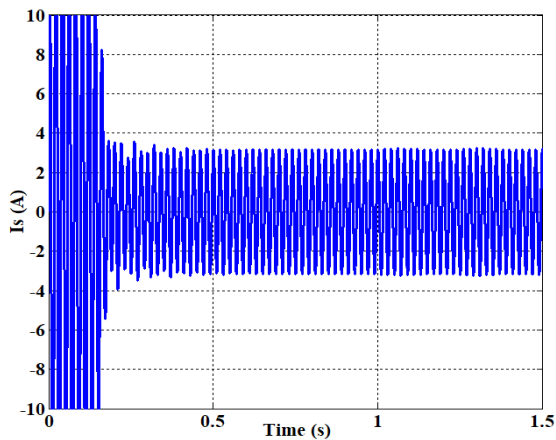


Fig II.14 Courant statorique.

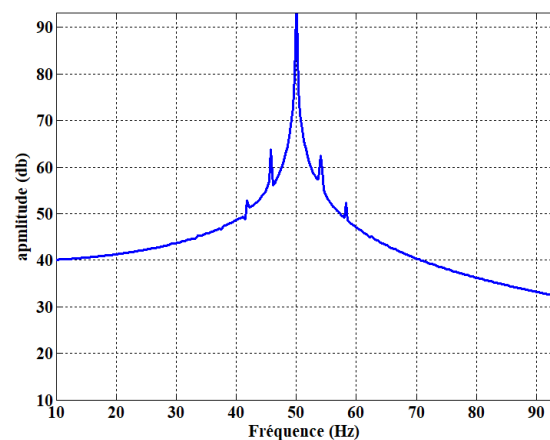
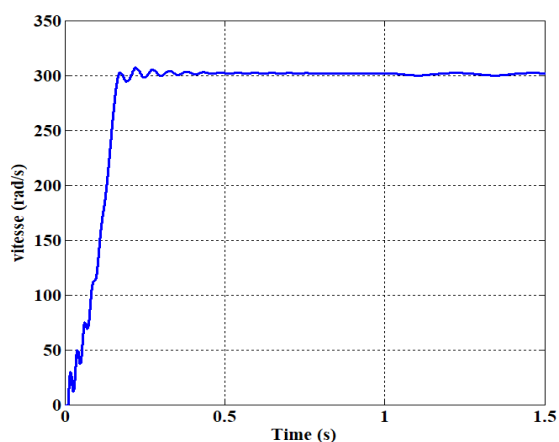


Fig II.15 spectre du courant statorique.

### II.10.2 Fissure de 50% d'une barre rotorique



II.16 Vitesse de moteur.

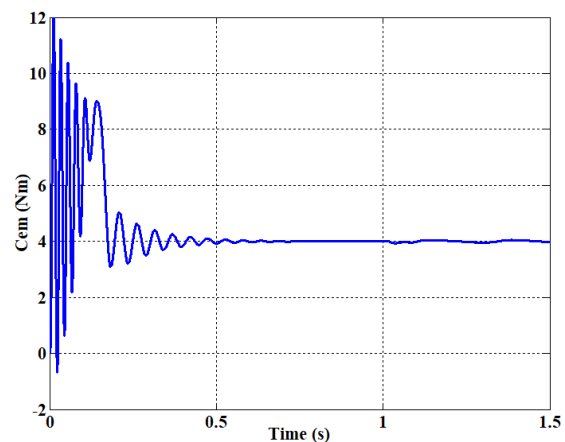


Fig II.17 Couple électromagnétique.

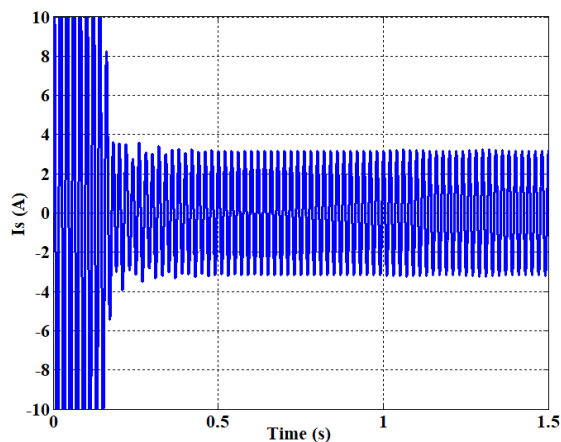


Fig II.18 Courant statorique.

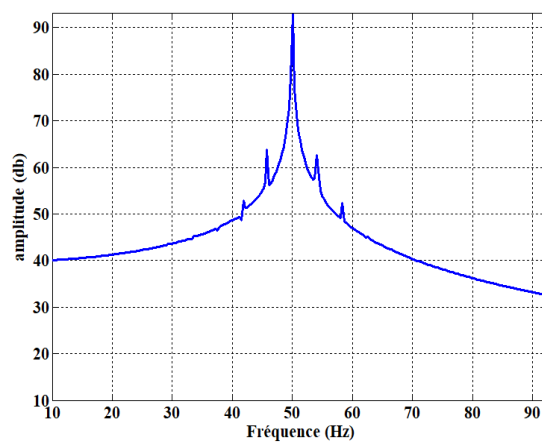
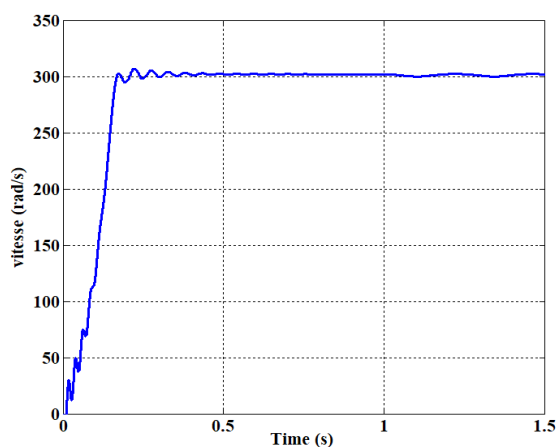


Fig II.19 spectre du courant statorique.

### II.10.3 Fissure de 80% d'une barre rotorique



II.20 Vitesse de moteur.

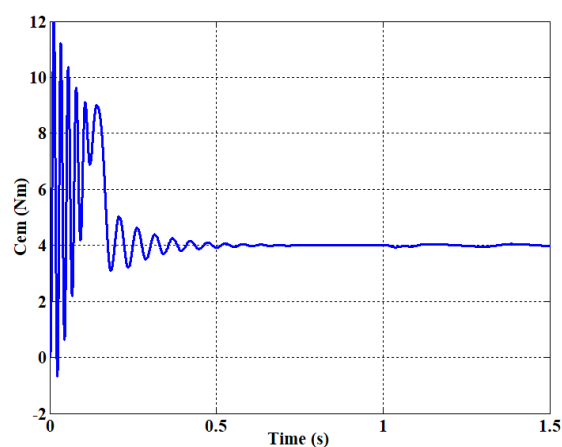


Fig II.21 Couple électromagnétique.

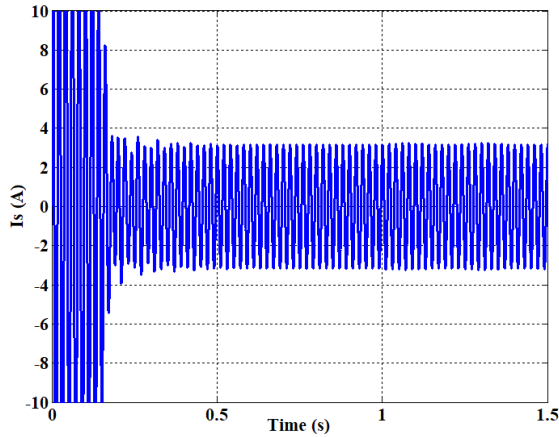


Fig II.22 Courant statorique.

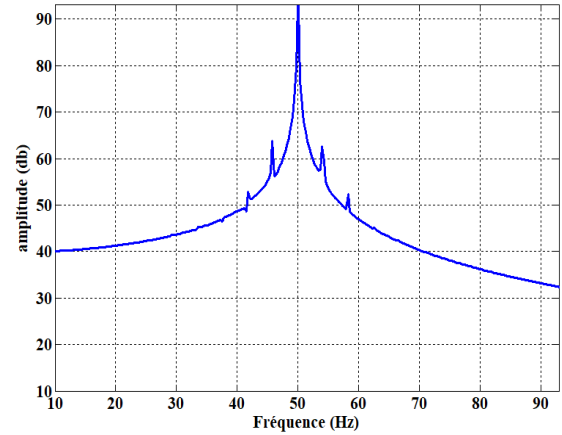


Fig II.23 spectre du courant statorique.

Pour les différentes courbes du spectre des courants statoriques (FFT) décrit précédemment pour les différents cas de fonctionnement : fissure de 20%, 50% et 80% d'une barre rotorique montre que l'amplitude de l'harmonique qui caractérise le défaut croît légèrement avec la croissance de la fissure.

### II.10.4 Fissure simultanément de 20% de deux barres rotorique

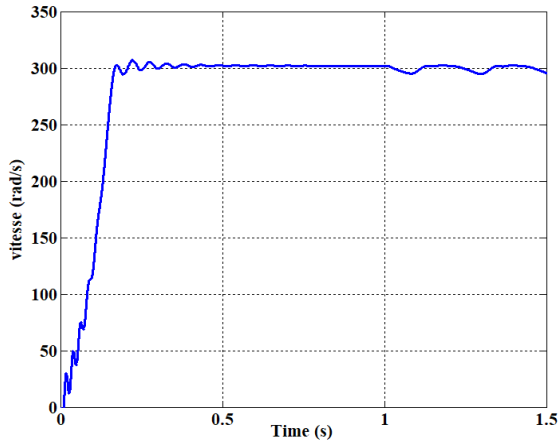
Cette section présente les grandeurs électromécaniques et le spectre du courant statorique d'un moteur présentant un défaut à deux barres.

Les figures II.24 et II.25 représentent le couple électromagnétique et la vitesse de rotation en régime permanent.

On constate que les grandeurs (vitesse et couple) présentent des fluctuations et que leurs amplitudes sont supérieures à celles correspondant au défaut à une seule barre.

La figure II.26 représente le courant statorique en régime permanent. On constate que la présence du défaut à deux barres augmente également l'amplitude des impulsions de courant statorique.

La figure II.27 montre le spectre complet et son extension autour de la ligne de base du courant statorique. Le défaut à deux barres entraîne l'apparition de nouvelles harmoniques par rapport au cas précédent. Ces harmoniques sont des multiples des harmoniques caractéristiques de ce défaut.



II.24 Vitesse de moteur.

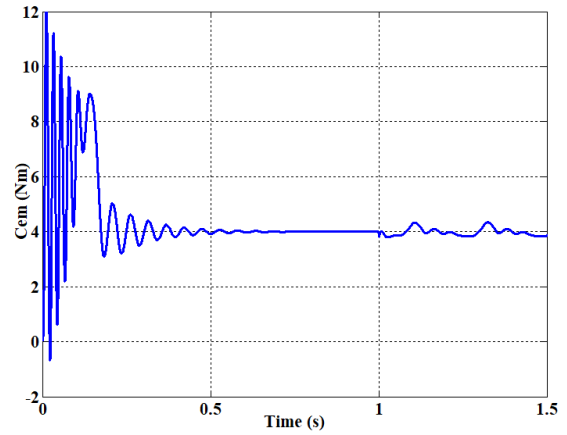


Fig II.25 Couple électromagnétique.

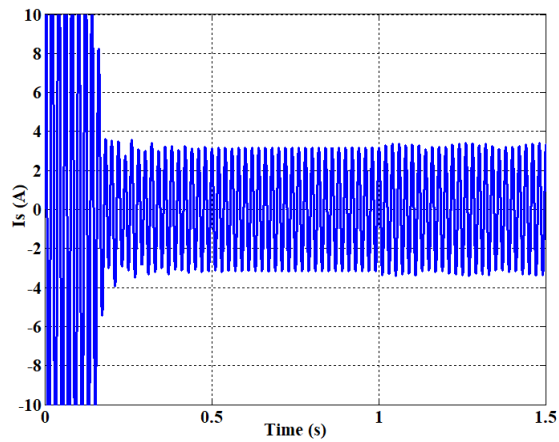


Fig II.26 Courant statorique.

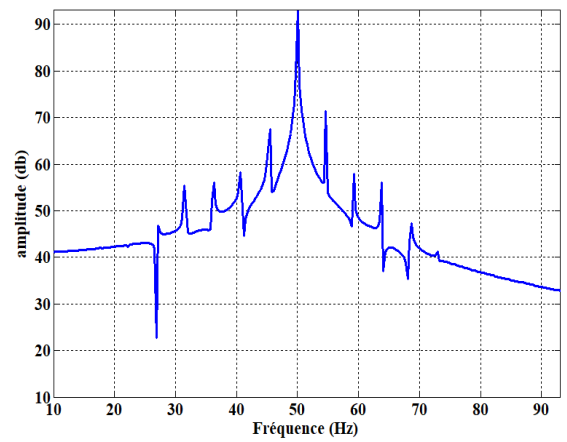
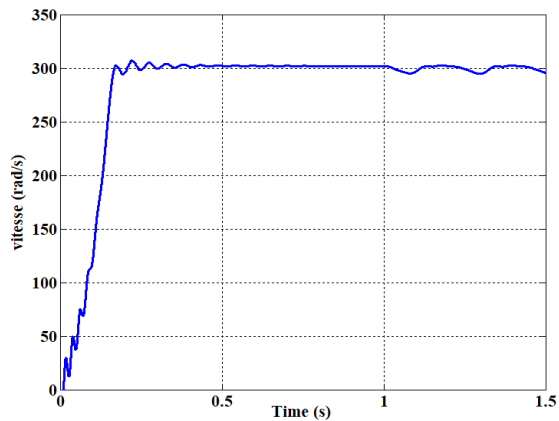


Fig II.27 spectre du courant statorique.

### II.10.5 Fissure simultanément de 50% de deux barres rotorique



II.28 Vitesse de moteur.

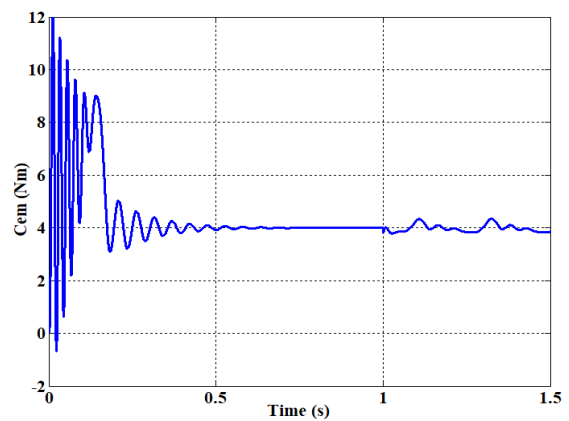


Fig II.29 Couple électromagnétique.

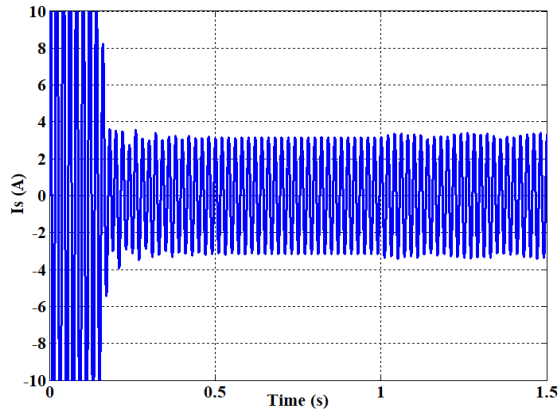


Fig II.30 Courant statorique.

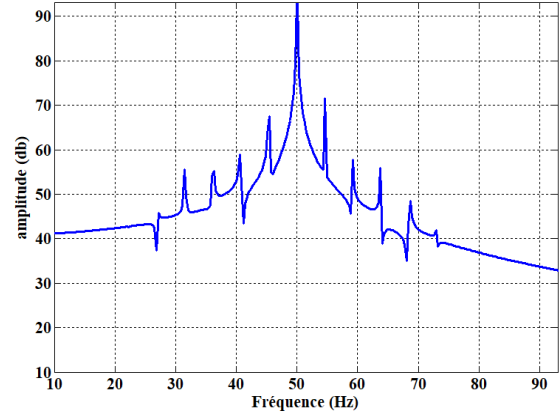
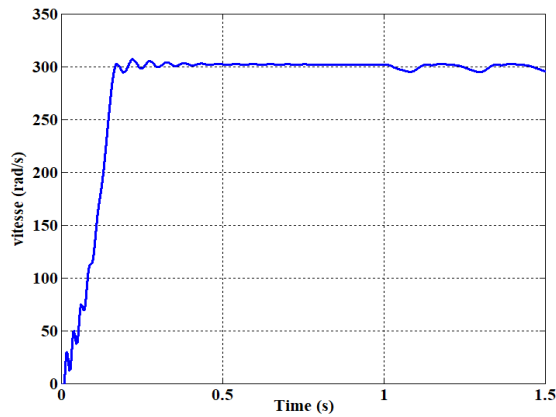


Fig II.31 spectre du courant statorique.

### II.10.6 Fissure simultanément de 80% de deux barres rotorique



II.32 Vitesse de moteur.

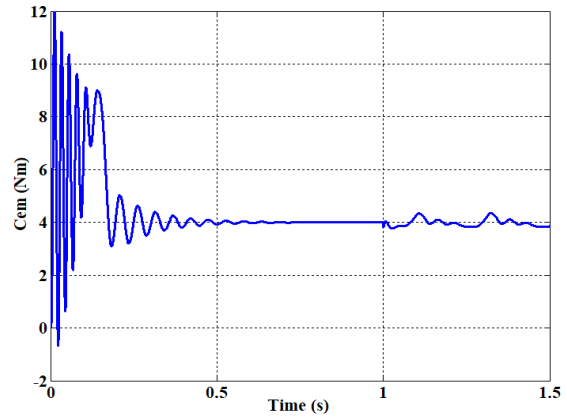


Fig II.33 Couple électromagnétique.

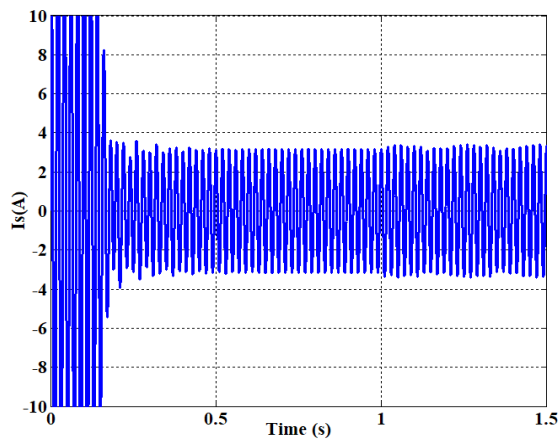


Fig II.34 Courant statorique.

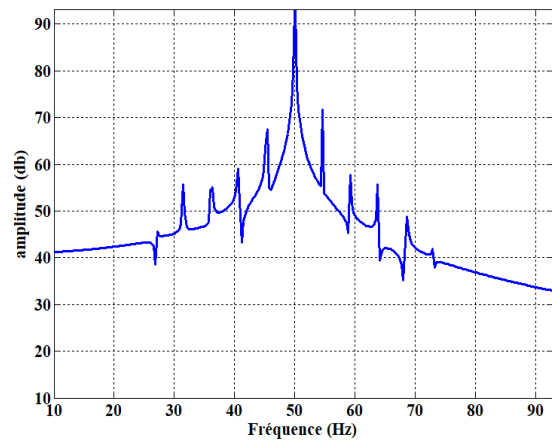
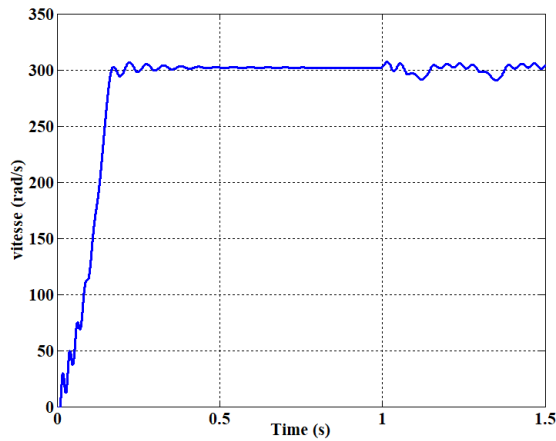


Fig II.35 spectre du courant statorique.

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

Les différentes courbes du spectre des courants statoriques pour différents cas de fonctionnement : fissure simultanément de 20%, 50% et 80% de deux barres rotorique montre également l'influence de degré de sévérité du défaut sur l'amplitude de l'harmonique.

### II.10.7 Fissure mixte de 20% et 60% de deux barres rotorique



II.36 Vitesse de moteur.

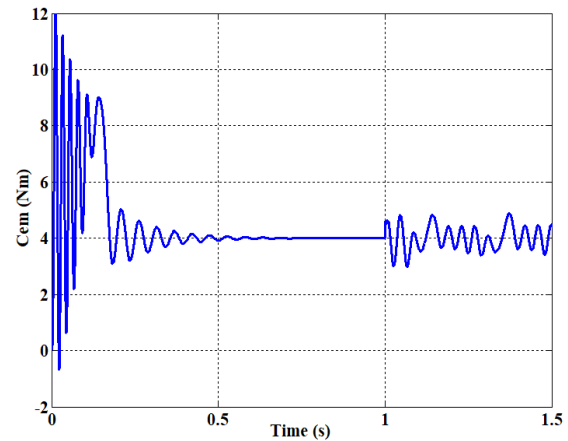


Fig II.37 Couple électromagnétique.

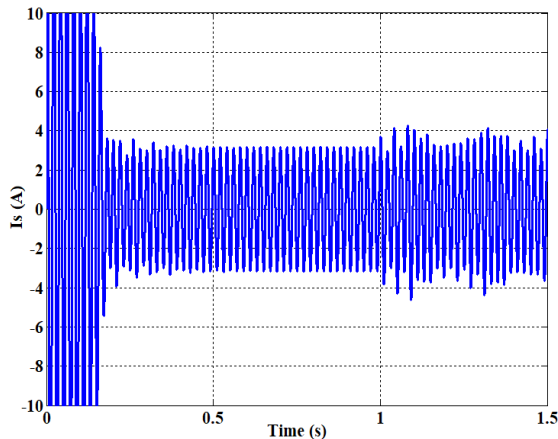


Fig II.38 Courant statorique.

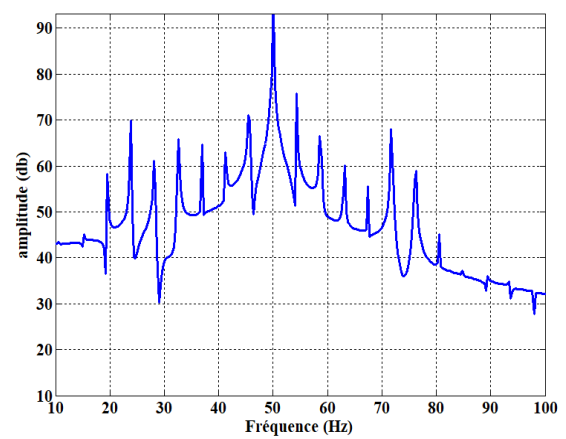
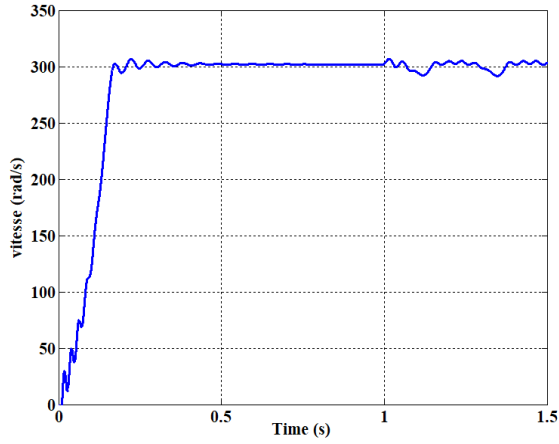


Fig II.39 spectre du courant statorique.

### II.10.8 Fissure mixte de 30% et 80% de deux barres rotorique



II.40 Vitesse de moteur.

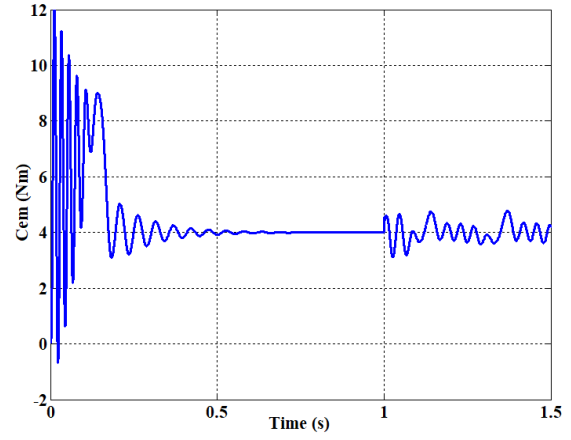


Fig II.41 Couple électromagnétique.

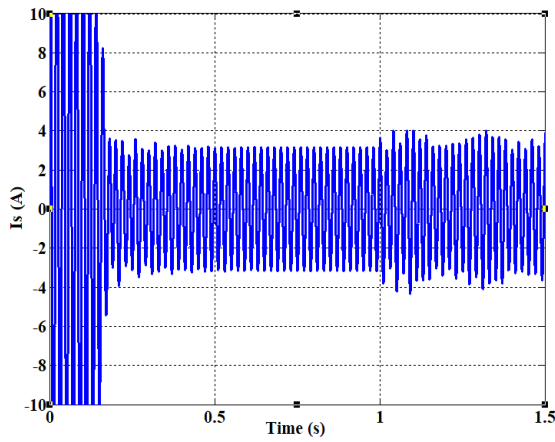


Fig II.42 Courant statorique.

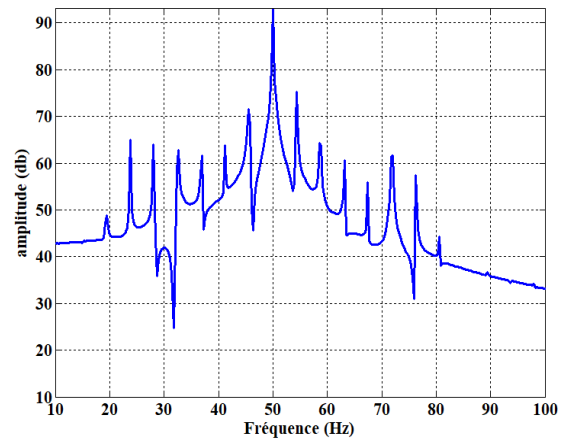
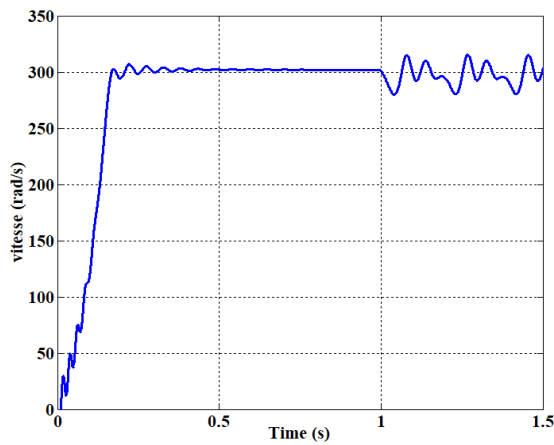


Fig II.43 spectre du courant statorique.

### II.10.9 Fissure mixte de 50% et 10% de deux barres rotorique



II.44 Vitesse de moteur.

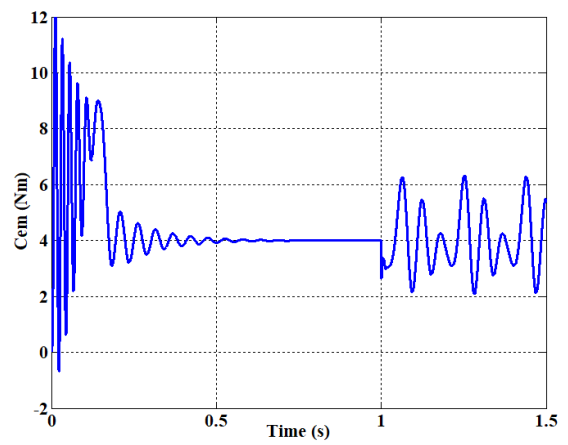


Fig II.45 Couple électromagnétique.

## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

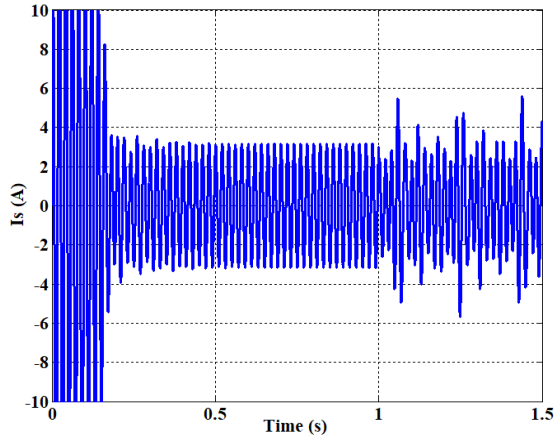


Fig II.46 Courant statorique.

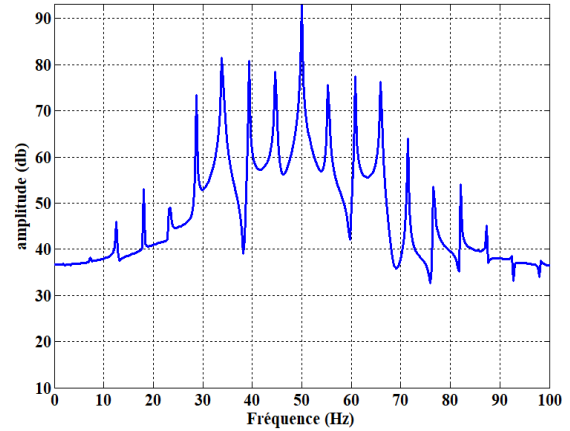


Fig II.47 spectre du courant statorique.

Les différentes courbes du spectre des courants statoriques des différents cas de fonctionnement: fissure mixte de (20%, 60%), (30%, 80%) et (50%, 10%) de deux barres rotorique montre que dans ce cas apparaissent plusieurs harmoniques adjacentes que celles de fissure simultanément de deux barre, en effet, pour le cas mixte de (20%, 60%) nous avons à gauche neuf harmoniques adjacentes, alors pour le cas de fissure simultanément de 80% il y a que six harmoniques adjacentes à gauche.

De plus, l'amplitude de l'harmonique qui caractérise le défaut croît avec la croissance de la fissure mixte.

### II.11 Paramètres de la machine

|                                            |                                        |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| Tension                                    | $V_{\text{eff}} = 220 \text{ v}$       |
| Nombre de pôles                            | $2p = 2.$                              |
| Nombre d'encoches statoriques              | $m = 36.$                              |
| Nombre de barres rotoriques                | $N_r = 16.$                            |
| Epaisseur de l'entrefer                    | $\delta = 0,45 \text{ mm}.$            |
| Rayon moyen de la machine                  | $r = 63,29 \text{ mm}$                 |
| Nombre des spires par phase statorique     | $N_s = 235$                            |
| Longueur de la machine                     | $l = 0,102 \text{ m}$                  |
| Moment d'inertie                           | $J = 0,0054 \text{ kg.m}^2$            |
| Résistance d'une phase statorique          | $R_s = 9,20 \text{ } \Omega.$          |
| Inductance de fuite d'une phase statorique | $L_{fs} = 0,0138 \text{ H}.$           |
| Résistance d'une barre rotorique           | $R_b = 68,35.10^{-3} \text{ } \Omega.$ |



## Chapitre II : Modélisation de la MAS sain et en présence des défauts

|                                                            |                              |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Inductance de fuite d'une barre rotorique                  | $L_b=0,174 \mu\text{H}$ .    |
| Résistance d'un segment d'anneau de court-circuit          | $R_e=20,26.10^{-6} \Omega$ . |
| Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit | $L_e=0,0375 \mu\text{H}$ .   |

Tableau II.1 Paramètres de la machine étudiée.

Les simulations ont été réalisées pour un fonctionnement moteur sous une alimentation sinusoïdale équilibrée 220V, 50Hz.

### II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle détaillé à fichiers multiples du rotor de la machine asynchrone, prenant en compte la structure complète du rotor à cage d'écureuil. L'objectif de ce modèle est de nous permettre de simuler avec précision des cas de rupture de barre ou de court-circuit partiel dans les anneaux du rotor. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations relatives aux différents types de barres et parties des anneaux, ce qui a permis une description précise du comportement électromagnétique et mécanique du rotor.

Ensuite, nous avons réalisé la simulation du moteur dans les conditions de vide et de charge, et présenté les courbes de vitesse, de couple électromagnétique et de courant dans le stator pour les deux cas. Une analyse spectrale du courant statorique a également été effectuée afin d'identifier les composantes fréquentielles caractéristiques liées aux défauts rotoriques, en particulier celles dues aux ruptures partielles des barres.

Ce modèle constitue ainsi une base solide pour les études futures, dans lesquelles nous aborderons l'analyse des fissures dans les barres de la cage à l'aide de la technique d'apprentissage automatique LS-SVM.



## **Chapitre III**

# **Machines vectorielles de support des moindres carrés**

### III.1 Introduction

La méthode LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine), ou (machine à vecteurs de support des moindres carrés), est une technique d'apprentissage automatique supervisé utilisée pour des tâches de classification et de régression. Elle repose sur les mêmes principes que les SVM classiques, mais elle utilise la méthode des moindres carrés pour simplifier la résolution mathématique.

La LS-SVM transforme les données d'entrée en un espace de caractéristiques de dimension supérieure à l'aide de fonctions noyaux (kernels), ce qui permet de trouver des frontières de décision linéaires même dans des cas non linéaires. Ensuite, un algorithme d'optimisation est utilisé pour déterminer les poids optimaux qui minimisent la fonction de perte, que ce soit pour classifier des données ou prédire des valeurs.

Cette méthode se distingue par sa capacité à gérer de grands ensembles de données, sa robustesse face au bruit, et son efficacité dans le traitement de problèmes non linéaires grâce à l'utilisation de noyaux non linéaires.

### III.2 Application de la méthode LSSVM

La méthode LS-SVM (Least Squares Support Vector Machines) est utilisée pour le diagnostic des pannes en suivant généralement les étapes suivantes :

1. Collecte des données : Constituer un jeu de données contenant des informations relatives aux pannes antérieures, incluant les symptômes, les mesures de performance, et les conditions de fonctionnement.
2. Prétraitement des données : Nettoyer et normaliser les données, ce qui peut comprendre la suppression des valeurs aberrantes, la gestion des données manquantes, et la mise à l'échelle des variables.
3. Sélection des caractéristiques : Identifier les variables les plus pertinentes pour le diagnostic en utilisant des méthodes telles que l'analyse de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP), ou d'autres techniques adaptées.
4. Division des données : Séparer les données en un ensemble d'apprentissage et un ensemble de test. Le premier sert à entraîner le modèle, le second à évaluer ses performances.

## Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés

5. Entraînement du modèle LS-SVM : Appliquer la méthode LS-SVM sur les données d'apprentissage pour modéliser la relation entre les caractéristiques et les pannes. Cette méthode combine des techniques de régression linéaire et de machines à vecteurs de support pour minimiser l'erreur prédictive.
6. Optimisation des paramètres : Ajuster les paramètres du modèle via des méthodes comme la validation croisée ou la recherche par grille afin d'améliorer ses résultats.
7. Évaluation du modèle : Tester la performance du modèle sur l'ensemble de test en utilisant des indicateurs tels que la précision, le rappel, la F-mesure ou la courbe ROC pour mesurer sa capacité à détecter les pannes.
8. Prédiction des pannes : Après validation, utiliser le modèle pour prédire les pannes sur de nouvelles données en appliquant la fonction apprise.

Il est essentiel de disposer d'un jeu de données adapté, de bien choisir les caractéristiques, et de régler précisément les paramètres pour obtenir un diagnostic fiable. Il est également recommandé d'appliquer des méthodes rigoureuses de validation et d'évaluation pour garantir la robustesse du modèle [18].

### III.3 Machines vectorielles de support des moindres carrés

Cette section présente un aperçu des machines à vecteurs de support à moindres carrés (LS-SVM), tandis qu'une explication plus détaillée est disponible dans la référence citée. Les LS-SVM sont particulièrement efficaces pour traiter des problèmes avec peu d'échantillons, de nature non linéaire ou de haute dimension. Toutefois, lorsqu'elles sont appliquées à des problèmes non linéaires, le choix de la fonction noyau a une influence déterminante sur la qualité du résultat de classification.

Étant donné un ensemble d'apprentissage de  $N$  points de données [18].

$$\{Y_k + X_k\}_{k=1}^N \quad (\text{III.1})$$

Où représente le  $k$ -ième motif d'entrée.

Lorsque ' $x$ ' représente le  $k$ -ième échantillon de sortie, le classifieur peut être construit à l'aide de la méthode des machines à vecteurs de support (SVM), selon la formulation suivante :

$$Y(x) = \text{sign}[\sum_{k=1}^N Y_k K(x, x_k) + b] \quad \alpha = [\alpha_1; \dots; \alpha_N] \quad (\text{III.2})$$

Où sont appelées valeurs de support et  $b$  est une constante.  $L$  est le noyau, qui peut être soit

### Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés

$$K(x, x_k) = X_k^T X \quad (\text{SVM linéaire}) \quad (\text{III.3})$$

$$K(x, x_k) = (x_k^T x + 1)^d \quad (\text{Polynôme SVM de degré } d) \quad (\text{III.4})$$

$$K(x, x_k) = \tan h [k x_k^T x + \theta] \quad (\text{Perceptron multicouche SVM}), \text{ où} \quad (\text{III.5})$$

$$K(x, x_k) = \exp\{-||x - x_k||_2^2 / \sigma^2\} \quad (\text{RBF SVM}), \text{ où } K, \theta \text{ et } \sigma \text{ sont des constantes.} \quad (\text{III.6})$$

Par exemple, le problème de la classification de deux classes est défini comme :

$$\begin{cases} W^T \varphi(x_k) + b \geq +1 & \text{IF } y_k = +1 \\ W^T \varphi(x_k) + b \leq -1 & \text{IF } y_k = -1 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Cela peut aussi s'écrire comme

$$y_k = [w^T \varphi(x_k) + b] \geq 1, k = 1, \dots, N \quad (\text{III.8})$$

Où  $\varphi(\cdot)$  est un mappage de fonction non linéaire de l'espace d'entrée à un espace de dimension supérieure.

Classificateurs LS-SVM

$$\min_{w,b,e} J_{LS}(w, b, e) = \frac{1}{2} w^T w + \gamma \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (\text{III.9})$$

Soumis aux contraintes d'égalité :

$$Y_k = [w^T \varphi(x_k) + b] = 1 - e_k, k = 1, \dots, N \quad (\text{III.10})$$

Le lagrangien est défini comme

$$L(w, b, e; \alpha) = J_{LS} - \sum_{k=1}^N \alpha_k \{ y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k \} \quad (\text{III.11})$$

Avec multiplicateurs de Lagrange  $\alpha_k \in \mathbb{R}$  (appelés valeurs de support).

Les conditions d'optimalité sont données par

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 & \rightarrow & w = \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k \varphi(x_k) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 & \rightarrow & \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 & \rightarrow & \alpha_k = \gamma e_k \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 & \rightarrow & y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k = 0 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Pour  $k=1 \dots N$ . Après élimination de  $e$  et on obtient la solution :

$$\begin{bmatrix} 0 & y^T \\ y & yzz^T + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1_y \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec

$$\begin{aligned} Z &= [\varphi(x_1)^T y_1, \dots, \varphi(x_N)^T y_N], \\ Y &= [y_1, \dots, y_N], 1_y = [1, \dots, 1], \\ e &= [e_1, \dots, e_N] \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

ET

$$\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N] \quad (\text{III.15})$$

La condition de Mercer est appliquée à la matrice  $\Omega = zz^T$  avec

$$\Omega_{kl} = y_k y_l \varphi(x_k)^T \varphi(x_l) = y_k y_l K(x_k, x_l) \quad (\text{III.16})$$

Les paramètres du noyau, comme  $\sigma$  pour le noyau RBF, peuvent être déterminés de façon optimale en minimisant une borne supérieure de la dimension VC. Dans les LS-SVM, les coefficients de support  $\alpha_k$  reflètent directement les erreurs associées aux points de données, alors que dans les SVM classiques, beaucoup de ces coefficients sont souvent nuls. Lorsque l'on doit résoudre de grands systèmes linéaires, il devient indispensable d'utiliser des méthodes itératives pour garantir une résolution efficace [18].

### III.4 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie adoptée, qui comprend les étapes d'extraction des caractéristiques, la sélection d'une base de données appropriée, ainsi que l'utilisation de l'algorithme LS-SVM pour le diagnostic des défauts de rupture partielle des barres dans le rotor du moteur à cage d'écureuil.

#### III.4.1 Extraction des caractéristiques

Dans ce cas, un ensemble de données relatif au défaut de cassure partielle des barres du rotor en cage d'écureuil a été utilisé pour entraîner et tester la méthodologie proposée (voir Figure III.1).

- 0: Moteur sain.
- 1: Fissure de 20% d'une barre rotorique
- 2: Fissure de 50% d'une barre rotorique
- 3: Fissure de 80% d'une barre rotorique

## Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés

- 4: Fissure simultanément de 20% de deux barres rotorique
- 5 : Fissure simultanément de 50% de deux barres rotorique
- 6 : Fissure simultanément de 80% de deux barres rotorique
- 7 : Fissure mixte de 20% et 60% de deux barres rotorique
- 8 : Fissure mixte de 30% et 80% de deux barres rotorique
- 9 : Fissure mixte de 50% et 10% de deux barres rotorique

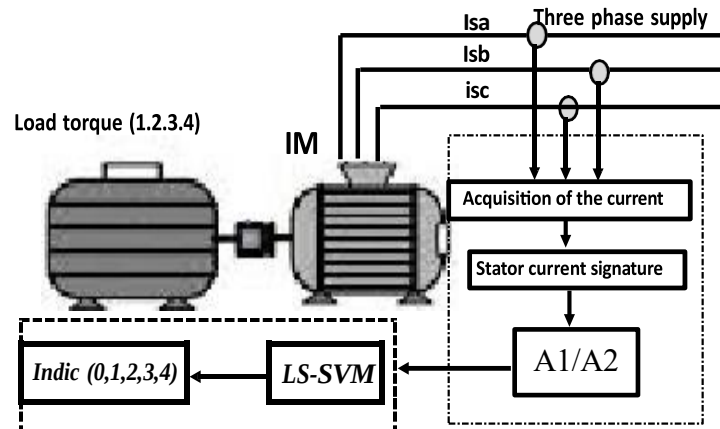


Fig III.1 Schéma fonctionnel du LS-SVM pour le diagnostic de défaut de rupture de barre rotorique.

### III.5 Application méthode LS-SVM pour estimer la sévérité de défaut rotorique

#### III.5.1 Base de données

L'élaboration d'une base de données consiste à déterminer les entrées/sorties d'apprentissage du Méthode LS-SVM utilisé (Annexe A).

Ces entrées/sorties sont choisies suivant la technique de diagnostic appliquée. Dans notre étude, nous nous intéressons à la détection du défaut de barres par l'emploi des données issues du spectre du courant statorique. Les résultats de simulation présentés dans la section précédente montrent que l'absence du défaut se traduit par l'apparition seulement de l'harmonique fondamental. Par contre, la présence du défaut de barres se traduit par la création d'harmoniques caractéristiques du défaut sur le spectre du courant statorique.

Dans cette étude, nous avons suivi les mêmes démarches proposées par des travaux antérieurs. Nous supposons donc:



1. La fréquence des harmoniques caractéristiques du défaut de barres ( $f_{b1,2} = (1 \pm 2g) f$ ) varient avec la variation de la vitesse.
2. La variation de la charge, pour le même degré de sévérité du défaut, influe à la fois sur l'amplitude du fondamental ainsi que sur l'amplitude des harmoniques caractérisant le défaut.
3. La variation du degré de sévérité du défaut pour une charge donnée influe sur les harmoniques caractéristiques du défaut.

Nous avons négligé l'effet de la charge en considérant le rapport de l'amplitude de l'harmonique  $(1-2s) f$  sur celle du fondamental ( $A_1 = \text{Amp}f_{b1} / \text{amp}f$ ) et le rapport de l'amplitude de l'harmonique  $(1+2s) f$  sur celle du fondamental ( $A_2 = \text{Amp}f_{b2} / \text{amp}f$ ). Afin de pallier le problème de variation de l'amplitude des harmoniques caractéristiques du défaut avec la charge.

### III.5.2 Diagnostic de la méthode LS-SVM

Dans notre cas la méthode LS-SVM fait appel à des données fournies par le spectre du courant afin de donner une information sur la sévérité du défaut.

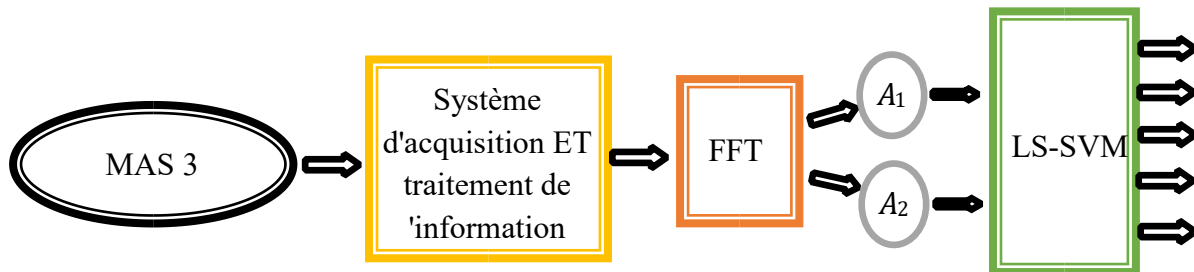


Fig III.2 structure d'entrée/sortie du la méthode LS-SVM.

Le classificateur que nous avons utilisé est basé sur la méthode LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine), qui est une version modifiée de la SVM classique. Cette méthode permet une classification efficace en minimisant une fonction de coût quadratique, ce qui simplifie le problème d'optimisation tout en assurant une bonne capacité de généralisation.

Les variables d'entrée du classificateur LS-SVM sont  $A_1$  et  $A_2$ , où  $A_1$  représente le rapport de l'amplitude du premier harmonique du défaut de barres  $fb_1$  à celle du fondamental ( $A_1 = \text{Amp}f_{b1} / \text{Amp}f$ ), et  $A_2$  celui du deuxième harmonique  $fb_2$  ( $A_2 = \text{Amp}f_{b2} / \text{Amp}f$ ). L'ensemble de données est constitué de 88 vecteurs d'entrée, dont 49 vecteurs ont été sélectionnés pour l'entraînement et le test. Parmi eux, 30 vecteurs (soit environ 60 %) ont été utilisés pour l'apprentissage du modèle LS-SVM, tandis que les 19 vecteurs restants (soit environ 40 %) ont servi à l'évaluation de ses performances (figure III.3).

### Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés

La variable de sortie prend quatre valeurs décrivant le degré de sévérité du défaut de cassure partielle des barres du rotor.

- [0.2, 1.0] : Degré de défaut d'une barre de 20% jusqu'à 100%.
- [0.22, 1.1] : Degré de défaut de deux barres de 20% et 20% jusqu'à 100% et 100%.
- [0.12, 0.97] : Degré de défaut de deux barres de 10% et 20% jusqu'à 90% et 70%.

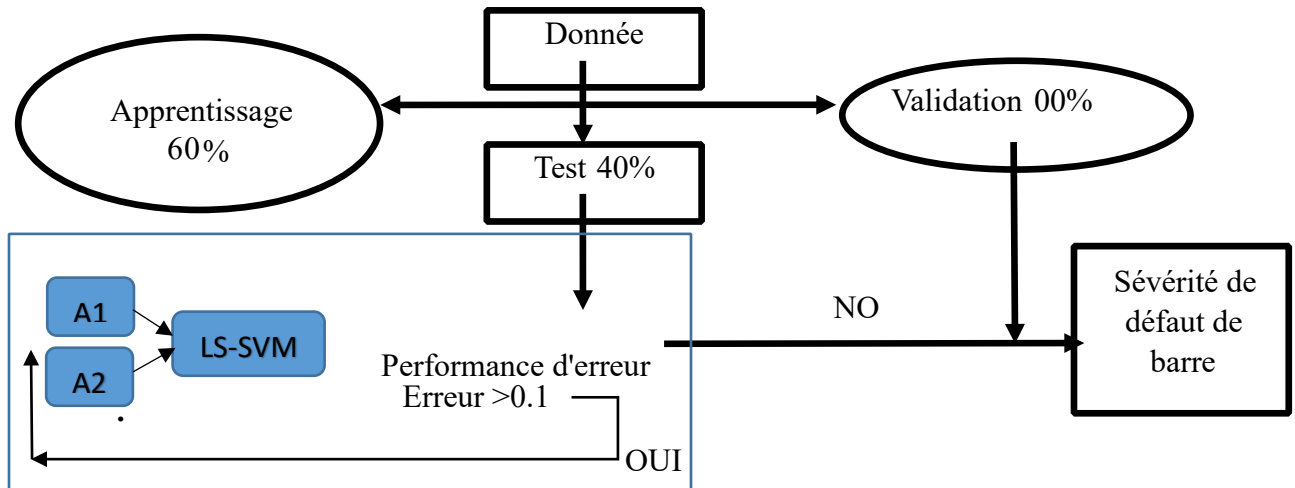


Fig III.3 Structure de la méthode LS-SVM proposé.

Les paramètres du classificateur LS-SVM utilisés sont les suivants :

- Type de modèle : Machine à vecteurs de support à moindres carrés (LS-SVM).
- Fonction noyau (Kernel) : noyau radial de base (RBF) utilisé pour modéliser les relations non linéaires entre les variables d'entrée.

Paramètres du modèle :

- $\sigma^2$ : paramètre de largeur du noyau RBF, ajusté pour optimiser la séparation entre les classes.
- $\gamma$ : paramètre de régularisation permettant de contrôler le compromis entre complexité du modèle et précision

Méthode d'apprentissage : apprentissage basé sur la résolution d'un système linéaire dérivé du critère des moindres carrés, permettant une convergence rapide et stable.

### Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés

La figure III.4 représente la sortie désirée (résultats de simulation) et la sortie estimée par le modèle LS-SVM lors de la phase d'apprentissage.

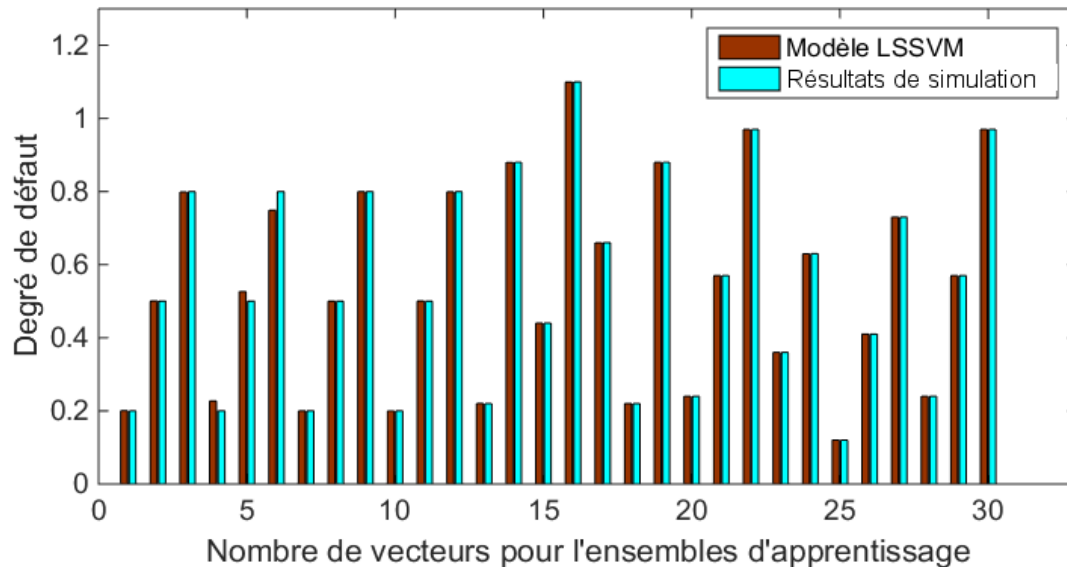


Fig III.4 Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble d'apprentissage.

Une fois le modèle LS-SVM entraîné, il est nécessaire de l'évaluer à l'aide d'une base de données différente de celle utilisée pendant la phase d'apprentissage. Ce test a pour objectif d'évaluer les performances du modèle et sa capacité de généralisation sur des données inédites. La figure III.5 présente les 19 valeurs de l'ensemble de test ainsi que les 19 valeurs estimées par le modèle LS-SVM.

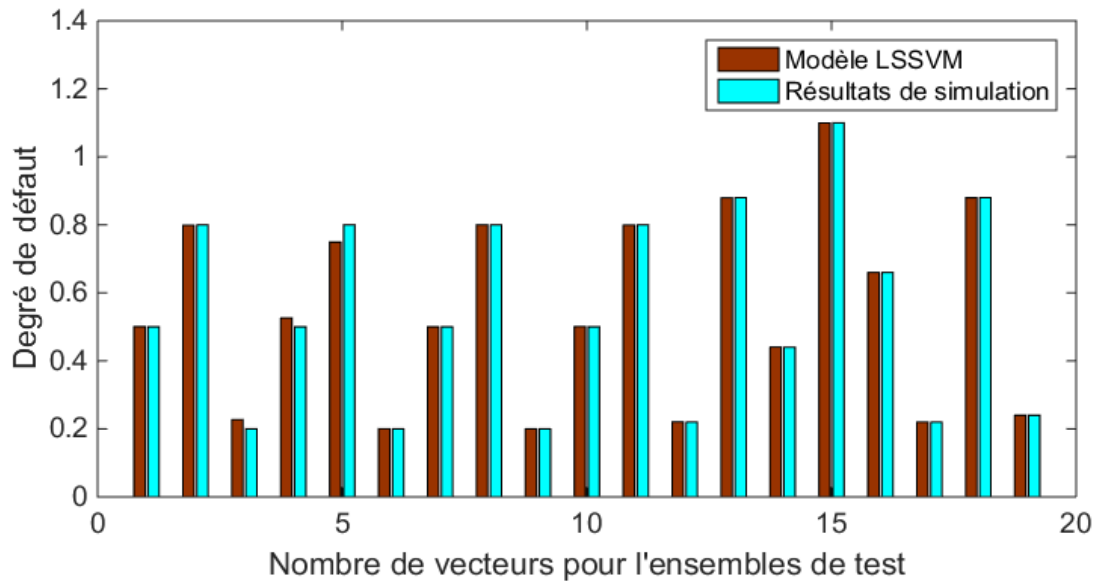


Fig III.5 Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble de teste.

Les figures III.4 et III.5 montrent une très bonne adéquation du modèle LS-SVM avec la base de données utilisée, respectivement pour les phases d'apprentissage et de test. Il est également à noter que le modèle LS-SVM a enregistré une très faible erreur de test de 0.1104. Ce modèle peut donc être considéré comme un outil hautement efficace pour le diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones.

### III.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons utilisé un modèle d'apprentissage automatique basé sur la machine à vecteurs de support aux moindres carrés (LS-SVM) pour le diagnostic des défauts du rotor de la machine asynchrone.

Le modèle LS-SVM a été entraîné à partir des rapports des amplitudes des harmoniques caractéristiques des défauts du rotor par rapport à l'amplitude fondamentale. Ces rapports varient en fonction du degré de sévérité du défaut ainsi que du couple de charge du moteur.

Les résultats obtenus avec le modèle LS-SVM proposé montrent qu'il est capable de prédire avec une grande précision le degré de sévérité du défaut de rupture de barre du rotor, ce qui en fait un outil fiable et efficace pour la surveillance de l'état de la machine et l'analyse de ses défauts.

### **Chapitre III : Machines vectorielles de support des moindres carrés**

.....

Le modèle LS-SVM se révèle être une technique puissante pour la classification et l'analyse des données complexes relatives aux défauts des machines électriques, contribuant ainsi à améliorer les opérations de maintenance et à réduire les arrêts non planifiés.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

## Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur le diagnostic des défauts des machines asynchrones, avec une attention particulière aux défauts du stator, tout en abordant également la rupture partielle ou totale des barres du rotor, en raison de son impact significatif sur les performances de la machine. Il a contribué à une meilleure compréhension de ces défauts et à la proposition de solutions efficaces, ouvrant ainsi la voie au développement de techniques de diagnostic intégrées à l'avenir.

Le premier chapitre a présenté un état de l'art approfondi sur le diagnostic des machines asynchrones. Il a fourni une description détaillée des composants clés des machines asynchrones, ainsi qu'une liste exhaustive des différents défauts auxquels elles peuvent être confrontées. De plus, diverses méthodes de diagnostic ont été examinées, mettant en évidence les approches existantes pour détecter et identifier les défauts dans ces machines.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation de la rupture partielle ou totale des barres du rotor, en analysant les causes et les effets de cette défaillance sur le fonctionnement de la machine, avec une comparaison entre l'état normal et l'état défaillant. Les résultats issus des courbes MATLAB ont montré des variations significatives du courant, de la tension et des vibrations, permettant de distinguer clairement entre la condition saine et celle présentant une rupture, ce qui a facilité l'identification d'indicateurs précis pour la détection précoce et l'analyse de l'évolution de la défaillance ainsi que son impact sur l'efficacité de la machine.

Le troisième chapitre a introduit la méthode des Machines à Vecteurs de Support avec Moindres Carrés (LS-SVM) en tant qu'outil de diagnostic potentiel pour les défauts du rotor des machines asynchrones. Des simulations de ruptures partielles ou totales des barres du rotor ont été réalisées, et les résultats obtenus ont été analysés en comparant l'étude de cas avec les sorties d'apprentissage du modèle

## Conclusion générale

---

LS-SVM. Cette approche a démontré sa capacité à détecter et à diagnostiquer efficacement ces défauts du rotor.

Cette thèse représente une avancée significative dans le diagnostic des ruptures partielles ou totales des barres du rotor des machines asynchrones. Les résultats ont démontré l'efficacité de la méthode des Machines à Vecteurs de Support avec Moindres Carrés (LS-SVM) pour détecter et identifier précisément ces défauts. Cette étude ouvre de nouvelles perspectives pour des recherches et applications futures visant à améliorer la fiabilité, la durabilité et les performances des machines asynchrones dans divers secteurs industriels.



## Annexe

Tableau Def: 01

| Charge<br>% | 1      |        | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     |
| 20%         | 0.7330 | 0.7971 | 0.6775 | 0.6824 | 0.6671 | 0.6568 | 0.6791 | 0.6651 |
| 40%         | 0.7331 | 0.7971 | 0.6773 | 0.6824 | 0.6679 | 0.6576 | 0.6792 | 0.6655 |
| 60%         | 0.7331 | 0.7971 | 0.6773 | 0.6824 | 0.6682 | 0.6578 | 0.6793 | 0.6657 |
| 80%         | 0.7332 | 0.7971 | 0.6774 | 0.6824 | 0.6684 | 0.6579 | 0.6794 | 0.6658 |
| 100%        | 0.7332 | 0.7971 | 0.6775 | 0.6824 | 0.6685 | 0.6580 | 0.6795 | 0.6658 |

Tableau Def: 01 ET 02

| Charge<br>% |      | 1      |        | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             |      | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     |
| 20%         | 20%  | 0.7238 | 0.7973 | 0.7364 | 0.7203 | 0.7317 | 0.7007 | 0.7171 | 0.7583 |
| 40%         | 40%  | 0.7236 | 0.7972 | 0.7368 | 0.7209 | 0.7334 | 0.7000 | 0.7171 | 0.7598 |
| 60%         | 60%  | 0.7236 | 0.7972 | 0.7369 | 0.7211 | 0.7339 | 0.6998 | 0.7171 | 0.7602 |
| 80%         | 80%  | 0.7235 | 0.7972 | 0.7370 | 0.7212 | 0.7342 | 0.6998 | 0.7172 | 0.7604 |
| 100%        | 100% | 0.7235 | 0.7972 | 0.7370 | 0.7213 | 0.7343 | 0.6999 | 0.7172 | 0.7605 |

Tableau Def: 01 ET 02

| Charge<br>% |     | 1      |        | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|-------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             |     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     |
| 10%         | 20% | 0.7697 | 0.7985 | 0.7355 | 0.7117 | 0.7753 | 0.7852 | 0.7586 | 0.7750 |
| 30%         | 60% | 0.7697 | 0.7985 | 0.7372 | 0.7130 | 0.7755 | 0.7859 | 0.7601 | 0.7753 |
| 60%         | 30% | 0.7204 | 0.7328 | 0.7155 | 0.7167 | 0.7397 | 0.7442 | 0.7741 | 0.7812 |
| 40%         | 10% | 0.7463 | 0.7744 | 0.7558 | 0.7831 | 0.7864 | 0.7677 | 0.8285 | 0.8190 |
| 20%         | 40% | 0.7697 | 0.7985 | 0.7368 | 0.7127 | 0.7754 | 0.7857 | 0.7597 | 0.7752 |

Tableau Def: 01

| Charge<br>% | 1      |        | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     |
| 30%         | 0.7331 | 0.7971 | 0.6774 | 0.6824 | 0.6677 | 0.6573 | 0.6792 | 0.6654 |
| 50%         | 0.7331 | 0.7971 | 0.6773 | 0.6824 | 0.6681 | 0.6577 | 0.6793 | 0.6656 |
| 70%         | 0.7332 | 0.7971 | 0.6774 | 0.6824 | 0.6683 | 0.6579 | 0.6794 | 0.6657 |
| 90%         | 0.7332 | 0.7971 | 0.6775 | 0.6824 | 0.6685 | 0.6580 | 0.6794 | 0.6658 |

Tableau Def: 01 ET 02

| <i>Charge</i><br>% |     | 1      |        | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|--------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    |     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     | A1     | A2     |
| 30%                | 50% | 0.7609 | 0.7982 | 0.7410 | 0.7065 | 0.7604 | 0.7737 | 0.7546 | 0.7551 |
| 50%                | 70% | 0.7506 | 0.7978 | 0.7426 | 0.7080 | 0.7378 | 0.7556 | 0.7417 | 0.7387 |
| 70%                | 30% | 0.7278 | 0.7343 | 0.7202 | 0.7161 | 0.7279 | 0.7542 | 0.7627 | 0.7893 |
| 90%                | 70% | 0.6949 | 0.7969 | 0.7267 | 0.7267 | 0.7539 | 0.7227 | 0.7039 | 0.7608 |

Base de données

## Références bibliographies

- [1] : Kouidri Mehdi et Hammani Islam, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défauts statoriques et rotoriques », Mémoire de Master département Electromécanique, option Électromécanique Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2020 / 2021.
- [2] : TCHOKETCH Afaf et BELBRAHIM Walid, « Diagnostic des défauts statoriques dans une machine asynchrone triphasé », Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Automatique Option Automatique et systèmes Université Yahia Farés De Médéa, Année 2017 – 2018.
- [3] : Kouidri Mehdi et Hammani Islam, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défauts statoriques et rotoriques », Mémoire de Master département Electromécanique, option Électromécanique Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2020 / 2021.
- [4] : HEMKA Abdenour, « Diagnostique des défauts statorique des machines asynchrone par l'approche LS-SVM », MEMOIRE DE MASTER Département d'électrotechnique Option Electrotechnique Industrielle Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2022/2023.
- [5] : Bouchareb Khaled et Chelghoum Abdelmouiz, « Etude, modélisation et simulation d'une Machine asynchrone », Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique OPTION Master en maintenance industrielle Université KASDI Merbah Ouargla Soutenu le : 20 / 09 / 2020.
- [6] : Kouidri Mehdi et Hammani Islam, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défauts statoriques et rotoriques », Mémoire de Master département Electromécanique, option Électromécanique Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2020 / 2021.
- [7] : TCHOKETCH Afaf et BELBRAHIM Walid, « Diagnostic des défauts statoriques dans une machine asynchrone triphasé », Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Automatique Option Automatique et systèmes Université Yahia Farés De Médéa, Année 2017 – 2018.
- [8] : BELACEL Mohammed et BOUDINA Seid, « Modélisation et simulation les défauts rotoriques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Mémoire de Master département Electromécanique, Université Akli mohand Oulhadj – Bouira Année Universitaire: 2017/2018.
- [9] : HAMADA Mouslim et MABEDI Mohammed Aimen et MEDJOUDJ Mohammed Seddike, « Modélisation de la machine Asynchrone en présence des défauts », Mémoire MASTER ACADEMIQUE/PROFESSIONNLE Spécialité Instrumentation industrielle Faculté des nouvelles

technologies de l'information et de télécommunications Année Universitaire : 2019/2020.

[10] : HEMKA Abdenour, « Diagnostique des défauts statorique des machines asynchrone par l'approche LS-SVM », MEMOIRE DE MASTER Département d'électrotechnique Option Electrotechnique Industrielle Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2022/2023.

[11] : Kouidri Mehdi et Hammani Islam, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défauts statoriques et rotoriques », Mémoire de Master département Electromécanique, option Électromécanique Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2020 / 2021.

[12] : HEMKA Abdenour, « Diagnostique des défauts statorique des machines asynchrone par l'approche LS-SVM », MEMOIRE DE MASTER Département d'électrotechnique Option Electrotechnique Industrielle Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2022/2023.

[13] : [file:///C:/Users/pc%20oraneag/Downloads/Chapitre II Modelisation de la machine a.pdf](file:///C:/Users/pc%20oraneag/Downloads/Chapitre_II_Modelisation_de_la_machine_a.pdf). 22/04/2025.

[14] : NAIM Oussama et BENMIA Mohammed, « Diagnostic Des Défaillances Des Moteurs asynchrones », Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Domaine SCIENCES ET TECHNOLOGIE, Filière Electrotechnique, Spécialité Commandes Electriques Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib Année universitaire 2023/2024.

[15] : GILLES HOUDOUIN « Contribution à la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts rotoriques », Thèse de doctorat université de havre mai 2004.

[16] : HARIR Miloud : « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée », Mémoire de magister université d'Oran, 2009.

[17] : ABBAS Rachid, et BOUABOUD Hassiba : «Modélisation de la machine à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d'anneaux de court-circuit », Mémoire de master université de Bouira, 2016.

[18] : HEMKA Abdenour, « Diagnostique des défauts statorique des machines asynchrone par l'approche LS-SVM », MEMOIRE DE MASTER Département d'électrotechnique Option Electrotechnique Industrielle Université Amar Telidji Laghouat, Année Universitaire 2022/2023.