



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de la Technologie

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machine Electrique

Présenté par :

DOU ELMOATEZ BELLAH

Intitulé :

**Diagnostic des défauts rotoriques des moteurs asynchrones
par des techniques avancées**

Soutenue le : ...14.../...06... /2026

Devant le jury composé de :

Dr :chennoufi hakim

Président

Dr :serhoud hicham

Examineur

Dr :allal abderrahime

Encadreur

Année académique : 2025/2026

Dédicace

Avec tout amour et respect, nous dédions cet humble travail, fruit de deux années d'apprentissage, de découverte et d'innovation, à l'éminent professeur, le Dr. Ilyes Chaouki. Vous étiez plus qu'un enseignant, vous étiez un guide, un motivateur et un père scientifique.

Nous ne méritons pas tous ces dons de votre part.

Notre honorable docteur,

Ces mots ne vous rendent pas justice, mais ils portent en eux une part de notre gratitude infinie.

Qu'Allah vous récompense en notre nom comme un professeur récompense son élève.

Je dédie également ce travail à:

****Aux cœurs chaleureux qui m'ont porté dans leurs bras,
Aux mains sûres qui m'ont soutenu lorsque mes pas ont faibli.*

***À ma famille**..*

Ma mère qui a éclairé mon chemin par sa patience, mon père qui m'a appris que le succès exige des efforts et de la détermination, et mes frères qui ont été mon soutien et mes compagnons.

***Et à mes amis**..*

Des compagnons qui ont transformé la fatigue en beaux souvenirs, l'échec en leçon et le succès en joie que nous vivons ensemble.

Cette réalisation est le fruit de votre amour et de votre soutien. Je vous suis très reconnaissant et reconnaissant.

Merci de faire partie de mon histoire.

« Et si vous êtes patients et craignez Allah, cela fait partie des choses dignes d'être résolues. »

[Al-Imran: 186]

Écrit par vos étudiants reconnaissants :

Résumé

Ce travail porte sur le diagnostic des défauts rotoriques des moteurs asynchrones par des techniques avancées de traitement du signal. L'étude s'appuie principalement sur l'analyse du courant statorique, considérée comme une méthode non invasive, simple et efficace pour la surveillance des machines électriques. Après une présentation générale de la machine asynchrone, de sa constitution et de ses principaux défauts, l'analyse s'oriente vers les signatures fréquentielles liées aux défauts rotoriques. La méthode NRHA, basée sur la comparaison entre le spectre normalisé d'un moteur sain et celui d'un moteur défectueux, est utilisée afin de mettre en évidence un indicateur résiduel sensible autour de la fréquence fondamentale. Les résultats obtenus pour différents niveaux de charge montrent que cette approche permet de détecter efficacement la présence d'un défaut rotorique et constitue une solution intéressante pour la maintenance prédictive des entraînements électriques industriels.

Mots-clés : moteur asynchrone, défaut rotorique, diagnostic, courant statorique, MCSA, NRHA, FFT, maintenance prédictive.

الملخص:

يتناول هذا العمل تشخيص الأعطال الروتورية في المحركات غير المتزامنة باستعمال تقنيات متقدمة لمعالجة الإشارة. تعتمد الدراسة أساساً على تحليل تيار الجزء الثابت باعتباره طريقة غير تدخلية، بسيطة وفعالة لمراقبة حالة الآلات الكهربائية. بعد عرض عام للمحرك غير المتزامن ومكوناته وأهم الأعطال التي قد تصيبه، تم التركيز على البصمات الترددية الناتجة عن الأعطال الروتورية. وقد تم استعمال طريقة التحليل التوافقي المتبقي المعيار NRHA، القائمة على المقارنة بين الطيف المعيّر لمحرك سليم والطيف المعيّر لمحرك معطوب، من أجل إظهار مؤشر متبقي حساس حول التردد الأساسي. أظهرت النتائج المحصل عليها عند مستويات مختلفة من الحمل أن هذه الطريقة تسمح بالكشف الفعال عن وجود العطل الروتوري، مما يجعلها حلاً واعدًا في مجال الصيانة التنبؤية للمحركات الكهربائية الصناعية.

الكلمات المفتاحية: المحرك غير المتزامن، العطل الروتوري، التشخيص، تيار الجزء الثابت، MCSA، NRHA، FFT، الصيانة التنبؤية.

Table des matières

Dédicace	2
Résumé	3
Table des matières	5
List de Figures	7
List de Tableaux	9
Introduction générale	11
Chapitre I : État de l'art sur la machine asynchrone et le diagnostic de ses défauts	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 La machine asynchrone :	6
I.3 Constitution de la machine asynchrone :	7
I.3.1 Le stator.....	8
I.3.2 Le rotor	9
I.3.3 L'entrefer	9
I.3.4 Les organe mécanique	9
I.4 Principe de fonctionnement.....	10
I.5 Causes des défauts :	12
I.6 Différents défauts dans la machine	13
I.6.1 Défauts statorique.....	14
I.6.2 Défaillances rotoriques	15
I.6.3 Défaillances mécaniques	18
I.7 Conséquences des défauts :	19
I.8 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :	20
I.9 Conclusion	22
Chapitre II :Méthodes avancées de diagnostic des moteurs à induction	23
II.1. Introduction.....	24
II.2. Généralités sur les défauts du moteur à induction.....	26
II.2.1. Le court-circuit entre spires du stator.....	27
II.2.2. Les autres défauts et leur signature.....	27
II.2.3. Les approches de surveillance par le courant	27
II.3. Harmoniques caractéristiques du courant statorique	28
II.4. Outils mathématiques communs	29
II.4.1. La transformée de Park	30
II.4.2. La transformée de Hilbert et l'amplitude instantanée.....	31
II.5. Les six approches de diagnostic	32
II.5.1. MCSA — analyse directe du courant.....	32

II.5.2. MSCSA — analyse du carré du courant.....	33
II.5.3. PVSM — module au carré du vecteur de Park	33
II.5.4. PVPA — produit des composantes de Park.....	34
II.5.5. PVSM _{p-h} — module au carré de Park–Hilbert.....	34
II.5.6. HPVPA — produit vectoriel de Park–Hilbert	34
II.6. Synthèse comparative des approches.....	36
II.7. Étude expérimentale comparative.....	37
II.7.1. Banc d’essai et protocole	37
II.7.2. Indices de sensibilité partielle et globale	38
II.7.3. Résultats et discussion	38
II.8. Vers une nouvelle approche : la méthode NRHA.....	40
II.9. Conclusion	42
Chapitre III :METHODOLOGIE EXPERIMENTALE ET DISCUSSION DES RESULTATS	43
III.1 Introduction.....	44
III.2 Principe général du diagnostic par courant statorique.....	44
III.3 Harmoniques du courant statorique dans la machine asynchrone	45
III.3.1 Harmoniques d’encoches rotoriques.....	45
III.3.2 Harmoniques temporelles.....	45
III.3.3 Harmoniques liées aux défauts rotoriques et à l’excentricité	45
III.4 Formulation de la méthode NRHA	46
III.5 Description des bancs expérimentaux de référence.....	48
III.6 Conditions d’acquisition et traitement numérique.....	50
III.7 Résultats obtenus.....	50
III.7.1 Résultats pour une charge de 100 %.....	50
III.7.2 Résultats pour une charge de 60 %.....	52
III.7.3 Résultats pour une charge de 20 %.....	53
III.8 Synthèse et discussion générale	55
III.8 .1 Discussion	57
III.8.2 Point fort de notre methode NRHA.....	58
III.9 Conclusion	58
Conclusion générale.....	59
Référence	63

List de Figures

Figure I. 1 Machine asynchrone	7
Figure I. 2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	8
Figure I. 3 schéma présente l'enroulement du stator[9].	9
Figure I. 4 rotor a cage [4]	9
Figure I. 5 Rotor bobiné [4]	9
Figure I. 6 Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [5]	10
Figure I. 7 Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [8].	12
Figure I. 8 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [6].	12
Figure I. 9 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.	13
Figure I. 10 Statistiques des pannes	14
Figure I. 11 a) court-circuit entre spires (b) le courant de circulation (c) court-circuit entre deux faisceaux.	15
Figure I. 12 Défaut d'une barre cassée.	16
Figure I. 13 Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux	17
Figure I. 14 Rupture d'une et de deux portions d'anneaux	17
Figure I. 15 Défauts d'excentricité statique, dynamique et mixte.	18
Figure I. 16 Différentes défaillances des roulements à billes [16].	19
Figure II. 1 Schéma synoptique des six approches de diagnostic à partir du courant statorique.	26
Figure II. 2 Répartition statistique typique des défauts d'un moteur à induction	26
Figure II. 3 Représentation schématisée du spectre du courant et localisation des quatre familles d'harmoniques.	28
Figure II. 4 Lieu du vecteur de Park : cercle (machine saine) et ellipse (machine défaillante).	31
Figure II. 5 Extraction de l'enveloppe (amplitude instantanée) du courant par la transformée de Hilbert.	32
Figure II. 6 Chaîne de traitement de l'approche HPVPA, du courant mesuré à la signature spectrale.	35
Figure II. 7 Comparaison schématisée des spectres obtenus par MCSA, PVSM et HPVPA pour un même défaut.	36
Figure II. 8 Évolution de l'indice GRI de la HPVPA selon la charge et le nombre de spires en défaut (d'après [26]).	39
Figure II. 9 Classement des six approches selon l'indice GRI (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [26]).	40
Figure III. 1 Schéma synoptique du diagnostic par la méthode NRHA	47
Figure III. 2 Organigramme des étapes de détection des défauts par la méthode NRHA	47
Figure III.3: rotor du moteur 3kW avec deux barres cassées.	49
Figure III. 4 Courants statoriques triphasés en régime sain — 100 % de charge.	51
Figure III. 5 Analyse spectrale de FFT pour une charge de 100 %.	51
Figure III. 6 Analyse spectrale et NRHA pour une charge de 100 %.	51
Figure III. 7 Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 60 % de charge.	52
Figure III. 8 Courants statoriques triphasés en régime sain — 60 % de charge.	52

Figure III. 9 Analyse spectrale de FFT pour une charge de 60 %.....	53
Figure III. 10 Analyse spectrale de NRHA pour une charge de 60 %.	53
Figure III. 11 Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 20 % de charge.....	54
Figure III. 12 Courants statoriques triphasés en régime sain — 20 % de charge.....	54
Figure III. 13 Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 20 % de charge	54
Figure III. 14 Analyse spectrale et NRHA pour une charge de 20 %.	55
Figure III. 15 Comparaison de l'amplitude de FFT(état sain / état défaut) en fonction de la charge.....	56
Figure III. 16 Évolution de la amplitude NRHA en fonction de la charge (défaut rotor)	57

List de Tableaux

Tableau II. 1 Les quatre familles d'harmoniques exploitées pour le diagnostic.	29
Tableau II. 2 Synthèse des six approches, classées par sensibilité décroissante au court-circuit entre spires.	37
Tableau II. 3 Indices GRI des six approches (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [26]).	39
Tableau III 1 : Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé dans l'expérimentation	49
Tableau III. 2 Synthèse des amplitudes spectrales et des pics NRHA obtenus.....	55
Tableau III. 3 Résultats de la méthode FFT à différentes charges : 20 %, 60 % et 100 %.	57

Liste des abréviations

MAS : Machine Asynchrone

MCSA : Motor Current Signature Analysis

MSCSA : Motor Square Current Signature Analysis

FFT : Transformée de Fourier Rapide

NRHA : Normalized Residual Harmonic Analysis

TH : Harmoniques de temps

RSH : Harmoniques d'encoches rotoriques

RBFH : Harmoniques de défaut de barres rotoriques

EFH : Harmoniques d'excentricité

PVSM : Park's Vector Square Modulus

PVPA : Park's Vector Product Approach

HPVPA : Hilbert–Park's Vector Product Approach

IM : Induction Motor

Introduction générale

The image features a central title 'Introduction générale' in a bold, black, serif font. The title is framed by two horizontal lines, each with a decorative flourish at its end. The flours are symmetrical, featuring a central leaf-like motif with two large, curved, scroll-like elements on either side, all rendered in black.

Les moteurs asynchrones occupent aujourd'hui une place essentielle dans les systèmes industriels modernes. Grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction, leur coût relativement réduit et leur facilité de maintenance, ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que l'entraînement électrique, le pompage, la ventilation, le levage, les chaînes de production, les systèmes de transport et les procédés industriels automatisés. Leur présence massive dans l'industrie s'explique également par leur capacité à fonctionner dans des conditions sévères tout en assurant une conversion électromécanique efficace et fiable.

Cependant, malgré cette réputation de robustesse, la machine asynchrone n'est pas totalement à l'abri des défaillances. Au cours de son fonctionnement, elle peut être soumise à différentes contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales pouvant provoquer une dégradation progressive de ses éléments constitutifs. Ces défauts peuvent toucher le stator, le rotor, les roulements ou encore l'entrefer. Parmi ces défaillances, les défauts rotoriques représentent une catégorie particulièrement importante, car ils peuvent évoluer de manière progressive et rester longtemps difficiles à détecter avant d'entraîner des conséquences graves sur le fonctionnement global de la machine.

Les défauts rotoriques, tels que les cassures ou fissures de barres, les défauts d'anneaux de court-circuit ou les dissymétries de la cage, perturbent l'équilibre électromagnétique de la machine. Cette perturbation modifie la répartition du champ magnétique dans l'entrefer et se traduit par l'apparition de composantes harmoniques caractéristiques dans les grandeurs électriques mesurables, notamment le courant statorique. Lorsque ces défauts ne sont pas détectés à temps, ils peuvent provoquer une augmentation des vibrations, une élévation de la température, une diminution du rendement, une dégradation de la qualité de fonctionnement et, dans les cas les plus sévères, l'arrêt complet de l'installation industrielle.

Dans ce contexte, le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones constitue un axe de recherche majeur dans le domaine de l'électrotechnique et de la maintenance industrielle. Il permet d'évaluer l'état de santé de la machine, de détecter précocement l'apparition d'une anomalie et d'éviter les arrêts imprévus. L'objectif principal du diagnostic est donc d'assurer une meilleure continuité de service, de réduire les coûts de maintenance, d'améliorer la sûreté de fonctionnement et de prolonger la durée de vie des équipements électriques.

Plusieurs approches de diagnostic ont été développées au fil des années. Certaines reposent sur l'analyse des vibrations mécaniques, de la température, du flux de fuite, du couple électromagnétique ou encore des grandeurs acoustiques. Bien que ces méthodes puissent donner des résultats intéressants, elles nécessitent souvent des capteurs spécifiques, parfois coûteux ou difficiles à installer dans un environnement industriel. À l'inverse, l'analyse du courant statorique présente un avantage important : elle est non invasive, simple à mettre en œuvre et économiquement intéressante, car le courant est généralement déjà mesuré dans les systèmes de commande et de protection des entraînements électriques.

L'analyse de la signature du courant statorique, connue sous le nom de MCSA, constitue ainsi l'une des méthodes les plus utilisées pour le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones. Elle repose sur le principe selon lequel toute défaillance modifiant la symétrie électromagnétique de la machine laisse une empreinte fréquentielle dans le spectre du courant absorbé. Dans le cas des défauts rotoriques, cette empreinte apparaît généralement sous forme de bandes latérales ou de composantes harmoniques liées au glissement, à la fréquence d'alimentation et aux caractéristiques géométriques du rotor.

Toutefois, la détection des défauts rotoriques n'est pas toujours évidente, en particulier lorsque le défaut est naissant ou lorsque la machine fonctionne sous des charges variables. Les composantes caractéristiques peuvent être de faible amplitude, proches de la composante fondamentale ou masquées par le bruit et les autres harmoniques naturellement présents dans le spectre. De plus, certaines fréquences de défaut dépendent du glissement, lequel varie avec la charge et la vitesse de rotation. Ces difficultés rendent nécessaire le recours à des techniques avancées de traitement du signal capables d'améliorer la sensibilité du diagnostic et de rendre l'indicateur de défaut plus clair et plus exploitable.

C'est dans cette perspective que s'inscrit cette mémoire intitulée : « **Diagnostic des défauts rotoriques des moteurs asynchrones par des techniques avancées** ». Ce travail vise à étudier le comportement fréquentiel du courant statorique en présence de défauts rotoriques et à exploiter des techniques avancées permettant d'améliorer la détection de ces défauts. L'intérêt principal est de proposer une démarche de diagnostic fiable, simple et adaptée aux conditions de fonctionnement industrielles, en se basant principalement sur l'analyse harmonique du courant statorique.

La problématique centrale de cette étude peut être formulée comme suit : comment détecter efficacement les défauts rotoriques d'un moteur asynchrone à partir du courant

statorique, tout en améliorant la sensibilité du diagnostic et en réduisant la complexité de l'analyse fréquentielle classique ? Cette problématique prend une importance particulière lorsque le défaut est peu marqué ou lorsque la charge varie, car les signatures fréquentielles deviennent difficiles à isoler par les méthodes classiques.

Pour répondre à cette problématique, ce travail s'appuie sur une étude théorique et expérimentale du diagnostic par courant statorique. Elle commence par présenter les bases de la machine asynchrone, sa constitution, son principe de fonctionnement et les principaux défauts pouvant l'affecter. Ensuite, elle expose les méthodes avancées de diagnostic fondées sur le traitement du courant, notamment les approches basées sur la transformée de Fourier, la transformation de Park, la transformation de Hilbert et les méthodes dérivées permettant d'amplifier ou de rendre plus visible la signature du défaut. Enfin, une méthodologie de diagnostic basée sur l'analyse harmonique résiduelle normalisée est étudiée afin de comparer le spectre d'un moteur sain avec celui d'un moteur défectueux et de faire apparaître un indicateur résiduel sensible autour de la fréquence fondamentale.

L'approche adoptée repose donc sur l'exploitation du courant statorique comme grandeur principale de diagnostic. Après acquisition du courant, un traitement fréquentiel est réalisé afin d'identifier les variations spectrales significatives entre l'état sain et l'état défectueux. La méthode étudiée permet de concentrer l'analyse sur une zone fréquentielle réduite, notamment autour de la fréquence fondamentale d'alimentation, ce qui simplifie le processus de détection et permet de mettre en évidence l'existence d'un défaut rotorique à travers un pic résiduel significatif.

Les objectifs de ce présent document peuvent être résumés comme suit : étudier les défauts rotoriques des moteurs asynchrones et leurs effets sur le courant statorique ; présenter les principales méthodes de diagnostic utilisées dans ce domaine ; analyser les limites des approches classiques lorsque les signatures de défaut sont faibles ou proches de la fondamentale ; exploiter des techniques avancées de traitement du signal pour améliorer la sensibilité de détection ; et enfin discuter les résultats obtenus à différents niveaux de charge afin d'évaluer la pertinence de l'approche retenue.

Afin de mener cette étude de manière progressive, le manuscrit est organisée en trois chapitres principaux.

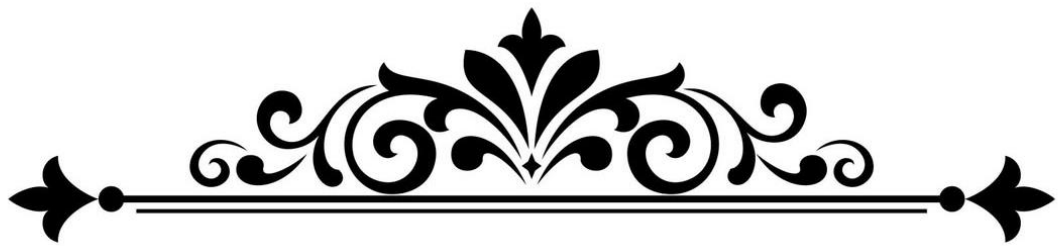
Le premier chapitre est consacré à une présentation générale de la machine asynchrone. Il rappelle sa constitution, son principe de fonctionnement ainsi que les principaux organes qui la composent, notamment le stator, le rotor, l'entrefer et les éléments mécaniques. Il

présente également les différentes familles de défauts pouvant apparaître dans ce type de machine, en mettant l'accent sur les défauts rotoriques et leurs conséquences sur le fonctionnement électromagnétique.

Le deuxième chapitre présente les méthodes avancées de diagnostic des moteurs à induction. Il traite des signatures fréquentielles liées aux défauts, des harmoniques caractéristiques du courant statorique et des outils mathématiques utilisés pour améliorer la détection, tels que la transformée de Fourier, la transformation de Park et la transformation de Hilbert. Ce chapitre met également en évidence l'intérêt des méthodes avancées par rapport à l'analyse classique du courant statorique.

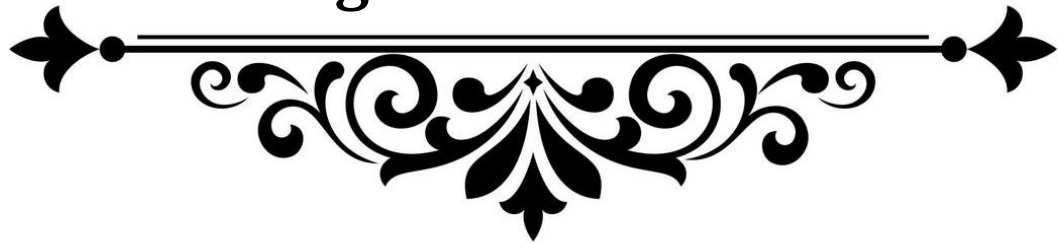
Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie expérimentale et à la discussion des résultats. Il présente le principe général du diagnostic par courant statorique, la formulation de la méthode NRHANormalized residual harmonic analysis method, les conditions d'acquisition, le traitement numérique adopté et l'analyse des résultats obtenus pour différents niveaux de charge. La comparaison entre le régime sain et le régime défectueux permet de montrer l'efficacité de l'indicateur résiduel dans la détection des défauts rotoriques.

Enfin, cette mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus, met en évidence l'apport des techniques avancées dans le diagnostic des défauts rotoriques et propose des perspectives pour l'amélioration future des méthodes de surveillance des moteurs asynchrones.



Chapitre I

État de l'art sur la machine asynchrone et le diagnostic de ses défauts



I.1 Introduction

Le diagnostic revêt une importance capitale au sein d'un système de supervision, permettant d'évaluer en permanence le mode de fonctionnement actuel du système. Cette évaluation s'appuie à la fois sur une connaissance préalable des différents modes de fonctionnement et sur une observation instantanée de l'état présent du système. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour réaliser ce diagnostic, le choix étant déterminé par la manière dont la connaissance est représentée.

La première partie de ce chapitre examine les diverses causes de défaillance (électriques, mécaniques, etc.) susceptibles de survenir sur une machine asynchrone. Elle commence par rappeler la structure des machines électriques, en mettant particulièrement l'accent sur celle des machines asynchrones à cage d'écureuil. Nous aborderons principalement les défauts qui peuvent affecter à la fois le stator et le rotor ainsi que les enroulements de la machine.

I.2 La machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est largement privilégié dans les applications nécessitant des puissances supérieures à quelques kilowatts en raison de ses nombreux avantages, notamment sa densité de puissance, sa robustesse, sa facilité d'installation et son coût modéré. Son développement a été favorisé par l'avènement des variateurs dans les années 1980, permettant une variation de la fréquence de rotation sur une large plage. Cette technologie a trouvé des applications dans divers procédés industriels impliquant des convertisseurs statiques et des machines électriques telles que la traction électrique, les laminoirs, le levage, le pompage, entre autres.

Malgré sa réputation de robustesse, la machine asynchrone est sujette à des défaillances électriques ou mécaniques, comme toute autre machine électrique. Étant donné les conséquences potentiellement importantes et coûteuses qu'une défaillance peut entraîner dans les processus industriels, le diagnostic des défauts suscite un intérêt croissant depuis les deux dernières décennies.[1] et [2].

I.3 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, communément désignée sous le nom de machine à induction, se compose d'une partie fixe appelée stator et d'une partie mobile appelée rotor (Figure I.1). Contrairement aux machines synchrones conventionnelles et aux machines à courant continu, seuls les enroulements du stator sont connectés à une source d'alimentation externe. Les enroulements du rotor sont en court-circuit sur eux-mêmes. Ainsi, la machine asynchrone ne comporte ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Le flux magnétique nécessaire à la production du couple électromagnétique dans le rotor est induit par la variation du flux magnétique dans le stator. Les circuits magnétiques du stator et du rotor sont constitués d'empilements de fines tôles ferromagnétiques découpées (Figure I.1) [3].

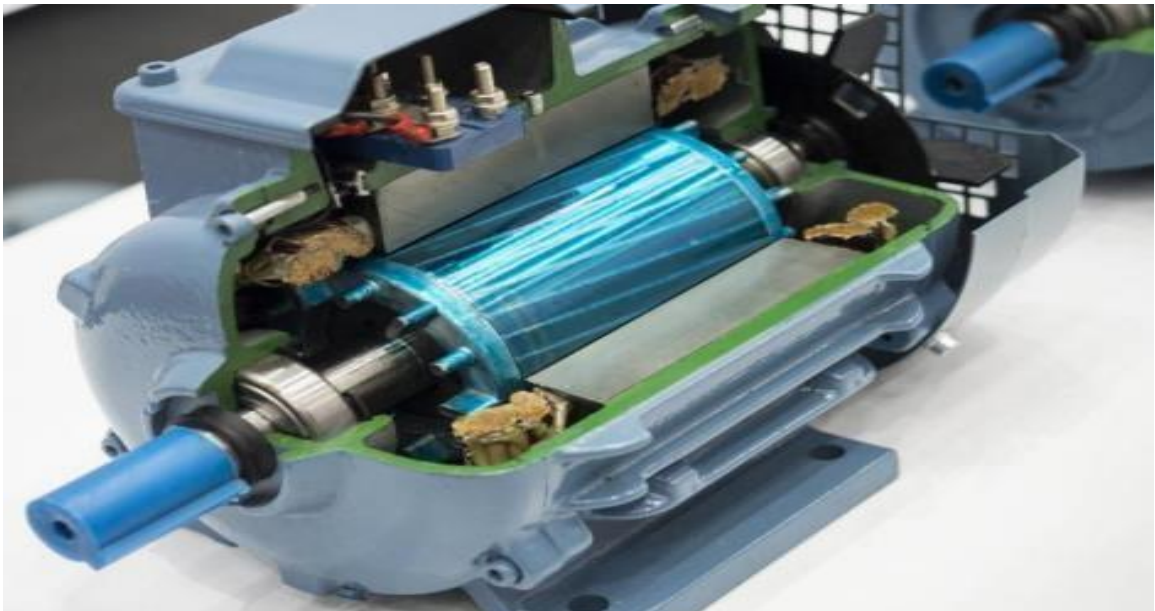


Figure I. 1Machine asynchrone

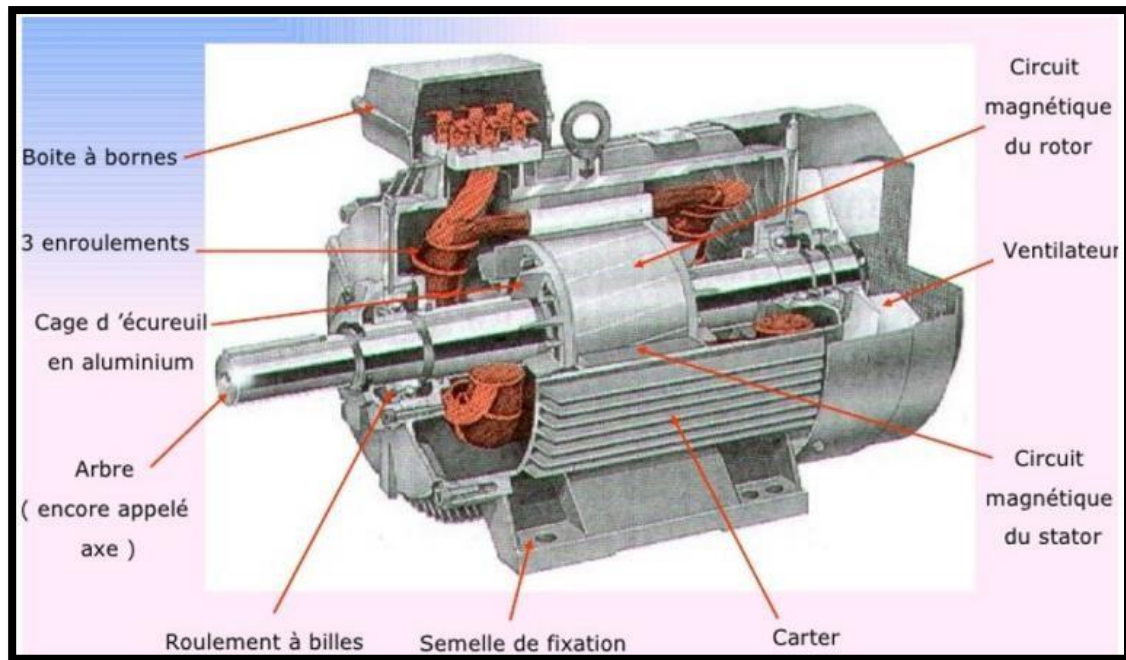


Figure I. 2Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.3.1 Le stator

Le stator, qui constitue la partie fixe du moteur, est généralement abrité dans une carcasse en fonte ou en alliage léger. À l'intérieur de cette carcasse, se trouve une couronne de fines tôles d'acier au silicium, typiquement d'une épaisseur d'environ 0,5 mm. Ces tôles sont isolées les unes des autres par oxydation ou par un vernis isolant afin de réduire les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le circuit magnétique. Les tôles sont également dotées d'encoches destinées à accueillir les enroulements statoriques chargés de générer le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est composé de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines détermine le nombre de paires de pôles du moteur, et donc sa vitesse de rotation. [4]

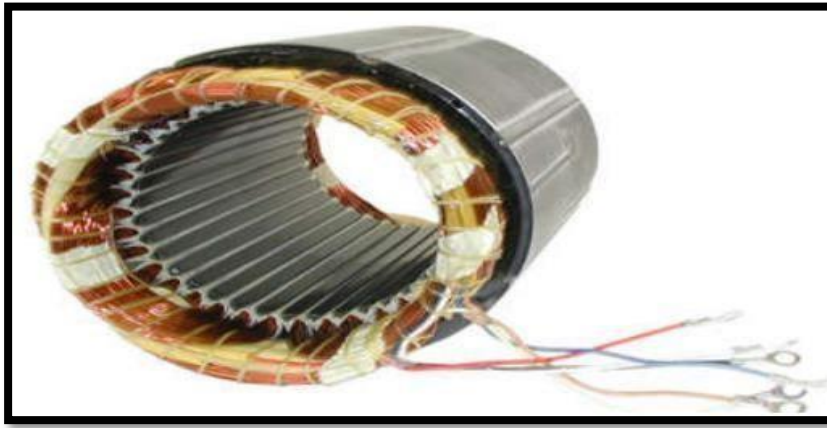


Figure I. 3 schéma présente l'enroulement du stator[9].

I.3.2 Le rotor

qui représente l'élément mobile du moteur, est formé d'un empilement de fines tôles isolées entre elles, configurées en un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Selon la technologie utilisée, on distingue deux principales familles de moteurs asynchrones : ceux équipés d'un rotor "à cage" et ceux dotés d'un rotor bobiné, également appelé rotor "à bagues" [4].



Figure I. 4 rotor a cage [4] Figure I. 5 Rotor bobiné [4]

I.3.3 L'entrefer

La partie amagnétique de l'entrefer, située entre le stator et le rotor, présente une épaisseur relativement mince, de l'ordre du millimètre. Cette faible épaisseur rend l'entrefer sensible aux variations induites par les encoches du stator. Ces variations engendrent ce que l'on appelle des harmoniques d'encoches. Pour atténuer ces harmoniques, les encoches sont comblées par des cales magnétiques qui assurent le maintien du bobinage [5].

I.3.4 Les organe mécaniques

La carcasse remplit une fonction de support et d'enveloppe, assurant la protection contre les éléments extérieurs. L'arbre, quant à lui, constitue un organe de transmission, comprenant une

partie centrale qui supporte le corps du rotor et est soutenu par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et permettent sa rotation libre. Le second palier est conçu pour permettre les dilatations thermiques de l'arbre. L'isolation électrique d'un des paliers permet d'éliminer les courants induits dans l'arbre dus aux asymétries des réluctances du circuit magnétique. En général, ces paliers sont équipés de roulements. Dans le cas des machines de petite et moyenne puissance, on trouve souvent un ventilateur de refroidissement [5].

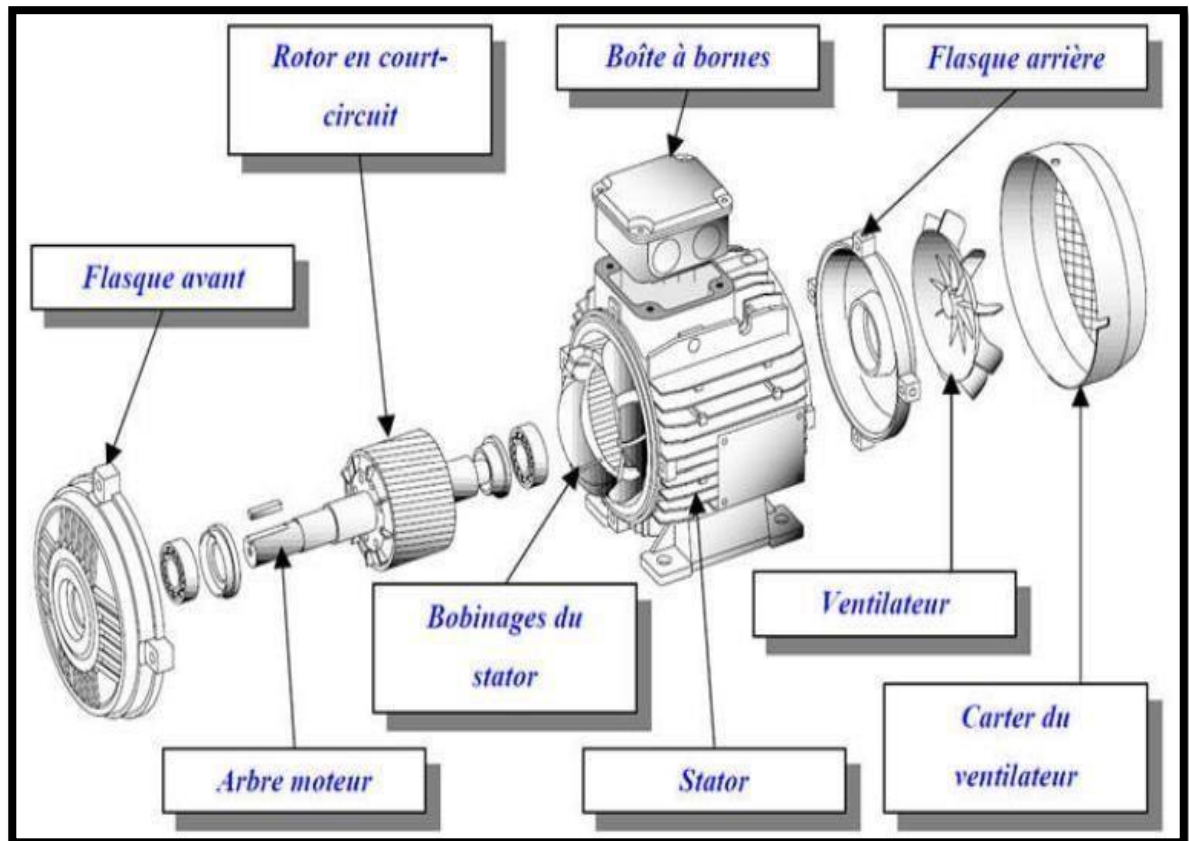


Figure I. 6 Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [5]

I.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone repose sur l'interaction électromagnétique entre le champ tournant, créé par le courant triphasé provenant d'un réseau triphasé équilibré de pulsation ω , agissant sur les enroulements statoriques, et les courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque ses conducteurs sont traversés par le champ magnétique tournant (conformément à la loi de Lenz). Cette interaction électromagnétique entre les deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor [6].

Dans le moteur asynchrone, l'onde du champ tournant se propage dans l'entrefer de la machine à une vitesse de rotation appelée vitesse de synchronisme Ω_s . Cette vitesse est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 \cdot \frac{f_s}{p} \text{ (tr/min)} \quad \text{Ou :}$$

f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

p : Le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, traversé par le champ tournant, génère des courants induits (courants de Foucault), exposant le rotor à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces induit un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor. Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, avec sa vitesse de rotation légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [6], [7].

En effet, il existe toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor, appelée glissement (g), qui est une caractéristique distinctive de la machine asynchrone. Ce glissement (g) est défini comme l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme (Ω_s) et la vitesse de rotation du rotor (Ω). Le glissement (g) est alors exprimé par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

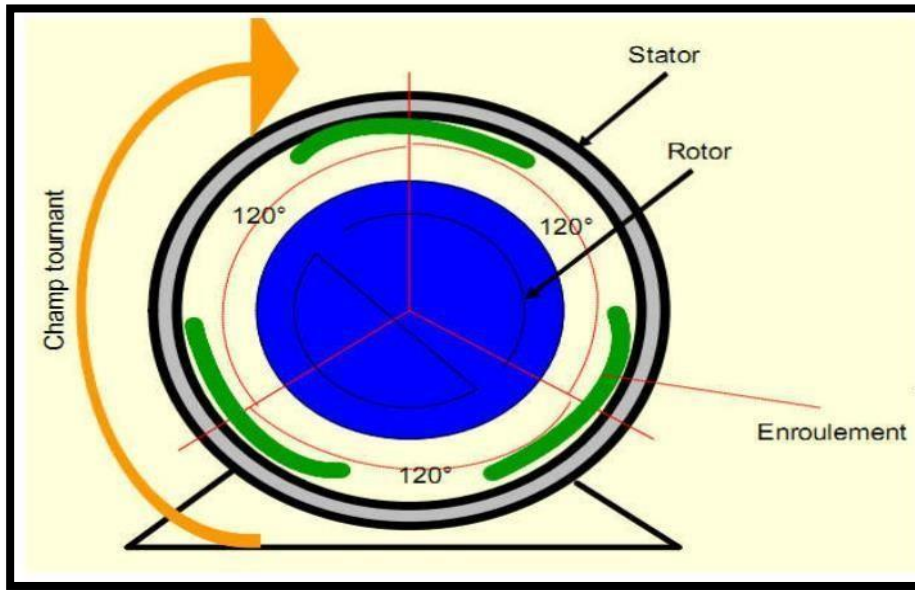


Figure I. 7 Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [8].

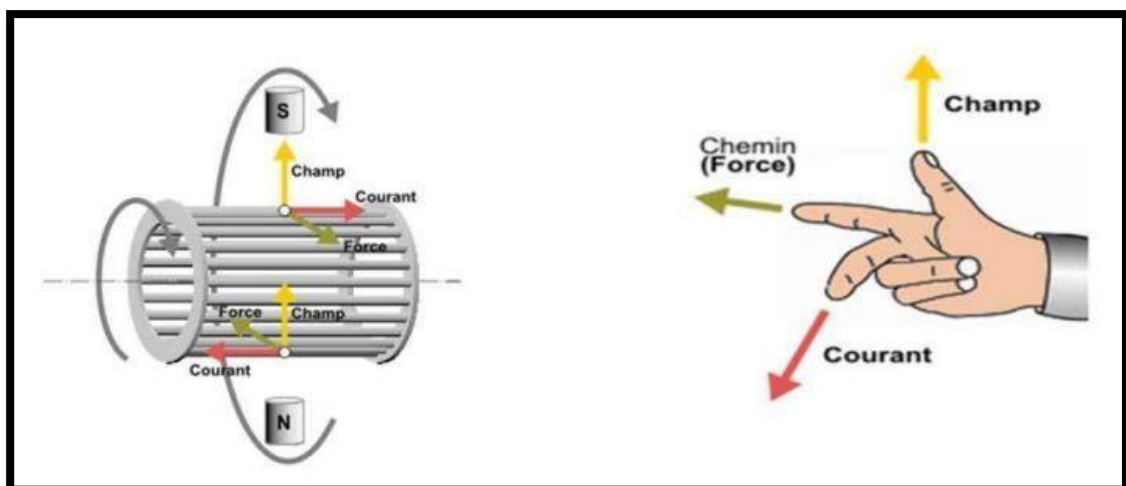


Figure I. 8 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [6].

I.5 Causes des défauts :

Les causes des défauts peuvent être regroupées en trois catégories distinctes :

- Les générateurs de pannes ou les initiateurs de défauts : ils comprennent des facteurs tels que la surchauffe du moteur, les défauts électriques (court-circuit), les problèmes mécaniques, les ruptures de fixations, les problèmes d'isolation, les surtensions d'alimentation, entre autres.
- Les amplificateurs de défauts : ces éléments contribuent à aggraver les défauts existants et incluent des facteurs tels que les surcharges fréquentes, les vibrations mécaniques, les environnements humides, les perturbations de l'alimentation (instabilité de la tension ou de la fréquence), le chauffage permanent, le mauvais graissage, le vieillissement, etc.

c) Les vices de fabrication et les erreurs humaines : cette catégorie englobe les défauts de fabrication, la défectuosité des composants, les protections inadaptées, le mauvais dimensionnement de la machine, et autres [9][10].

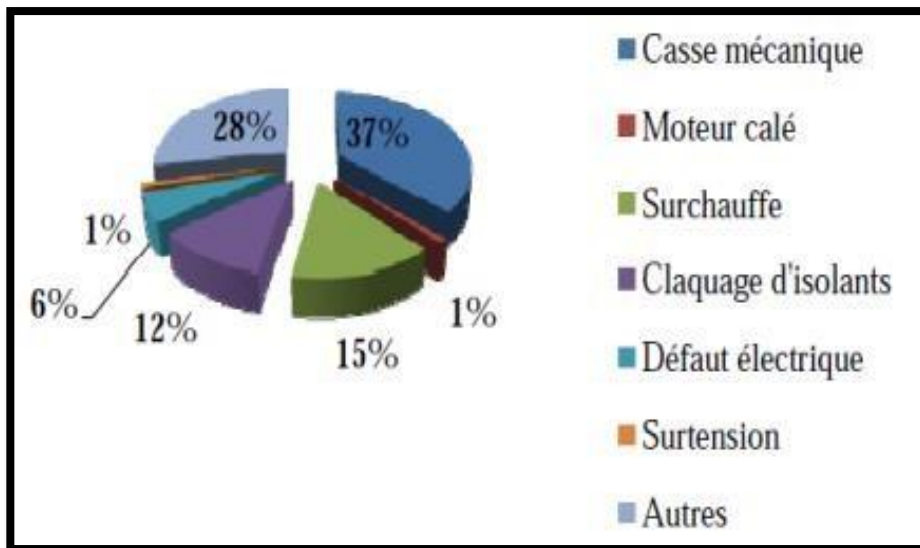


Figure I. 9 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone

I.6 Différents défauts dans la machine:

On peut classer ces défaillances en quatre catégories :

- Défaillances statoriques.
- Défaillances rotoriques.
- Défaillances mécaniques (roulements).
- Autre défaillances.

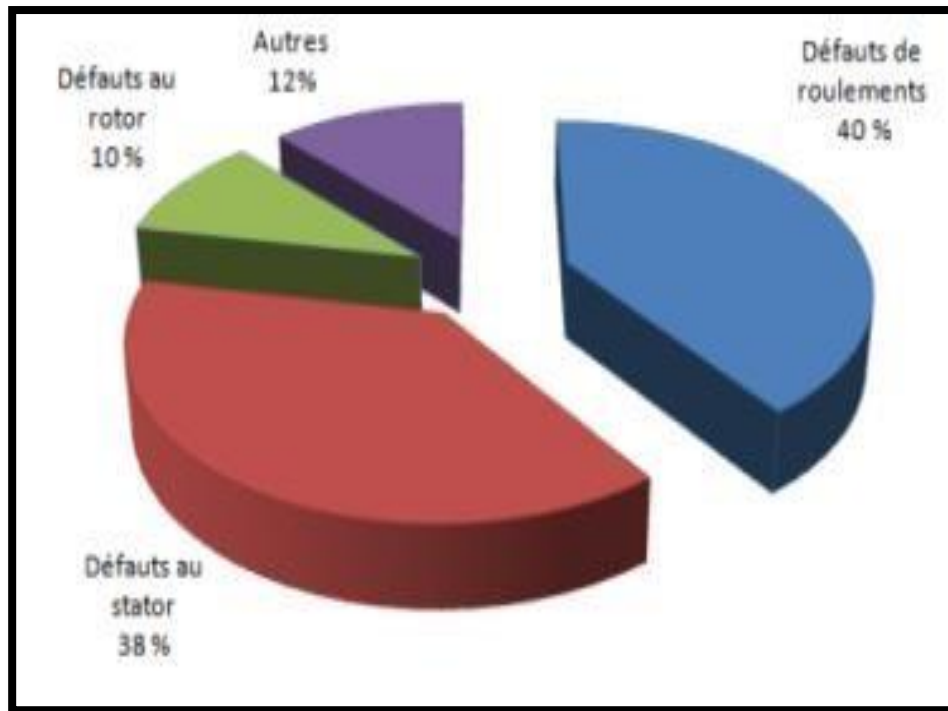


Figure I. 10 Statistiques des pannes

I.6.1 Défauts statorique

I.6.1.1 Court-circuit dans une phase

Les défaillances statoriques, telles qu'un court-circuit dans une phase, posent l'un des défis les plus importants en termes de tolérance [11]. Dans ce scénario, lorsque l'une des phases est affectée, la littérature décrit généralement la phase en question comme étant "perdue" dans le contexte d'une machine triphasée équipée d'un onduleur à trois bras. Cela entraîne l'arrêt de la machine en raison des conséquences physiques sur le moteur si l'alimentation est maintenue. La manifestation la plus significative de cette défaillance est l'apparition de courants de court-circuit, le principal problème étant le risque d'échauffement excessif pouvant aggraver la défaillance. L'ampleur des courants de défaut dépend directement du nombre de spires impliquées dans le court-circuit.

Il est également important de noter que les spires en court-circuit génèrent un couple résistant en raison des courants induits par le flux d'excitation circulant et des interactions magnétiques de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant nécessite une caractérisation afin d'anticiper ses effets sur le fonctionnement de la machine suite à la défaillance [12].

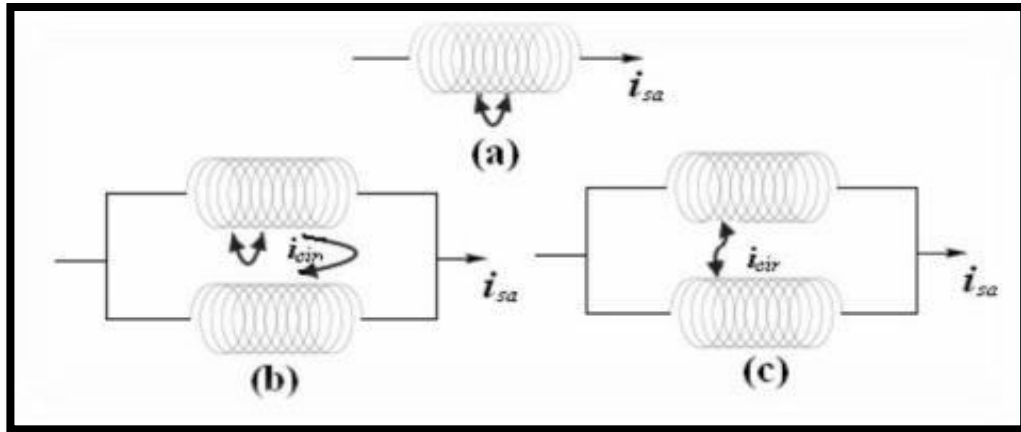


Figure I. 11 a) court-circuit entre spires (b) le courant de circulation (c) court-circuit entre deux faisceaux

I.6.1.2 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre les spires de la même phase est une défaillance assez courante. Cette défaillance est généralement due à un ou plusieurs défauts d'isolation dans l'enroulement concerné. Elle se traduit par une augmentation des courants dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, une modification du facteur de puissance et une amplification des courants dans le circuit rotorique. En conséquence, la température du bobinage augmente, ce qui entraîne une dégradation accélérée des isolants et peut éventuellement conduire à un défaut en cascade (apparition d'un deuxième court-circuit).

Cependant, le couple électromagnétique moyen fourni par la machine reste généralement inchangé, à l'exception d'une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [13].

I.6.2 Défaillances rotoriques

I.6.2.1 Les cassures de barres

La rupture des barres d'une machine asynchrone est l'un des défauts les plus fréquemment étudiés en laboratoire en raison de sa facilité de reproduction.

Lorsqu'une barre se rompt, elle entraîne une dissymétrie du rotor. Cette dissymétrie se traduit par la création d'un champ tournant orienté dans le sens opposé à celui généré par le stator, et ce à la fréquence de glissement. Par conséquent, cela induit la génération d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique [14].

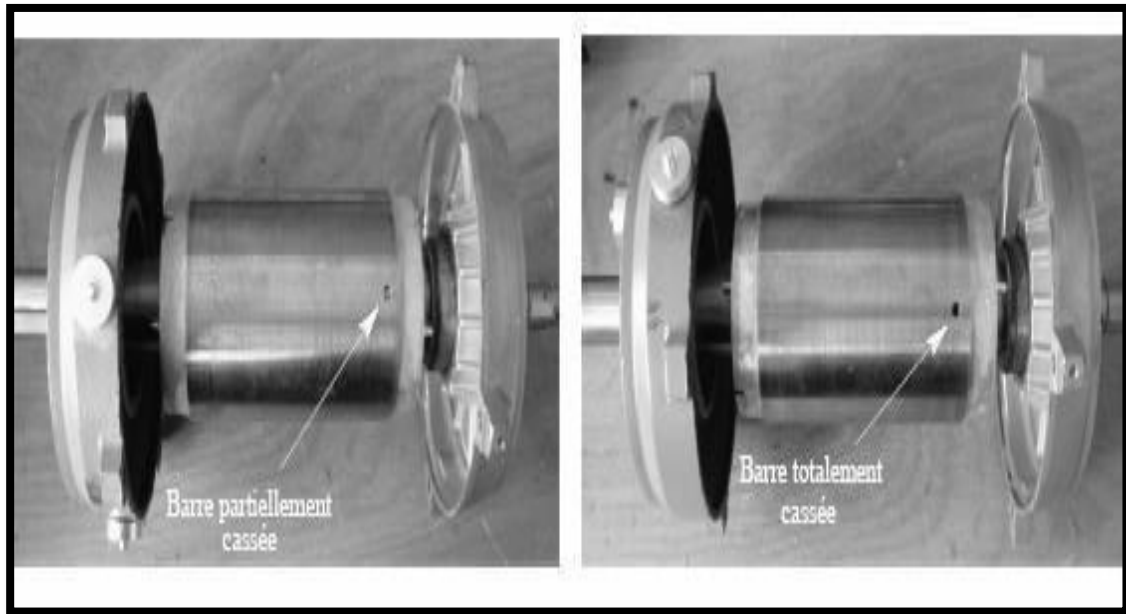


Figure I.12 Défaut d'une barre cassée

I.6.2.2 Les ruptures de portions d'anneaux des cages

Ces défauts se manifestent au niveau du bobinage rotorique et sont parmi les plus courants. Ils surviennent sous forme de ruptures totales ou partielles d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil, ou de ruptures d'une portion de l'anneau. Ces défaillances se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique.

Les pannes rotoriques entraînent malheureusement des fluctuations dans le couple électromagnétique, ce qui provoque des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Cela peut également générer des défauts mécaniques supplémentaires dans la machine.

Après l'apparition de ce type de défauts, la machine continue de fonctionner, ce qui rend très difficile leur détection lorsque la machine est en état de défaut. Le courant qui circule dans une barre cassée se répartit sur les autres barres, les surchargeant, ce qui peut entraîner leur rupture. Par la suite, un plus grand nombre de barres peut se rompre dans la machine.

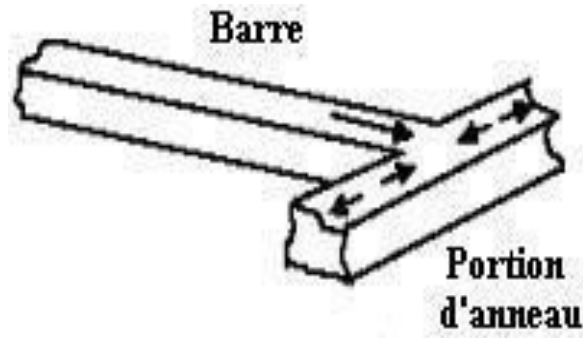


Figure I. 13 Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux

Les cassures de portions d'anneaux peuvent être causées soit par des bulles de coulée, soit par des dilatations entre les barres et les anneaux. Les portions d'anneaux en court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un dimensionnement inadéquat des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc du courant peuvent conduire à leur rupture. La rupture d'une portion d'anneau entraîne un comportement similaire à celui de la rupture de barres [15].

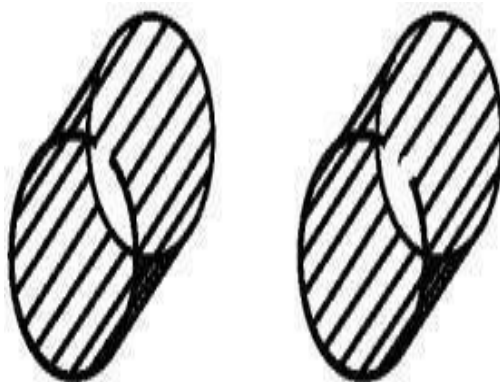


Figure I. 14 Rupture d'une et de deux portions d'anneaux

I.6.2.3 Excentricité statique et dynamique

Parfois, une machine électrique peut être confrontée à un décentrement du rotor, se manifestant par des oscillations de couple, c'est-à-dire un décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor. Ce phénomène est appelé excentricité, pouvant être de nature statique ou dynamique, et son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à une défaillance des roulements (usure), à un déséquilibre de charge, ou à des défauts de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [16]:

L'excentricité statique : le rotor est déplacé par rapport au centre de l'alésage stator, mais il tourne toujours autour de son axe.

L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage, mais il ne tourne plus autour de son axe.

L'excentricité mixte : elle associe les deux cas précédemment mentionnés.

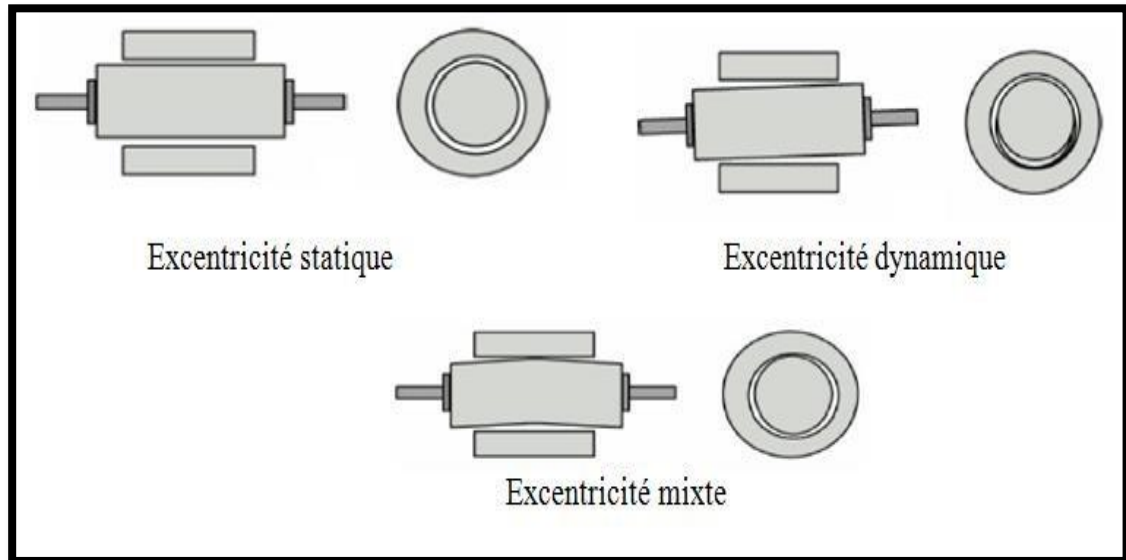


Figure I. 15 Défauts d'excentricité statique, dynamique et mixte

I.6.3 Défaillances mécaniques

I.6.3.1 Défauts roulements

Les roulements à billes jouent un rôle crucial en tant qu'interface électromécanique entre le stator et le rotor pour assurer une rotation efficace du rotor. Dans l'article [16], l'auteur examine en détail la plupart des défauts rencontrés dans les roulements des moteurs à induction, ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme précédemment exposé, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de forte puissance. Il est généralement attribuable à l'usure du roulement, notamment la dégradation des billes ou de la bande de roulement. Les causes possibles de cette usure comprennent :

- ✦ Le vieillissement naturel du roulement.
- ✦ Des températures de fonctionnement élevées.
- ✦ La perte de lubrification et la contamination de l'huile par des particules métalliques provenant de la dégradation des billes ou de la bande de roulement.
- ✦ Des défauts de montage.
- ✦ Des courants d'arbres (court-circuit).

- ✦ Les conséquences directes de ces défaillances sur les roulements incluent :
- ✦ Des creux dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- ✦ L'usure des billes.
- ✦ La corrosion causée par l'eau.
- ✦ Des problèmes de graissage, souvent liés à des variations de température.
- ✦ décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

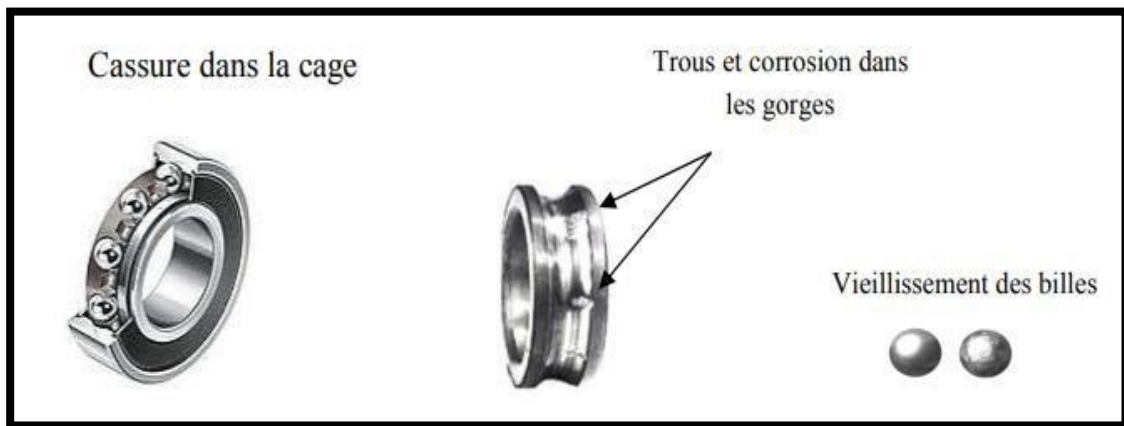


Figure I. 16 Différentes défaillances des roulements à billes [16]

Dans le système, ce type de défaut se manifeste par des oscillations du couple de charge, une augmentation des pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement, entraînant des vibrations dues aux déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut conduire au blocage complet du moteur.

➤ autres défaillances mécanique

au niveau du stator où il n'y a pas de pièces mobiles, a priori, les défaillances mécaniques ne devraient pas se produire. Cependant, des phénomènes d'oxydation peuvent se produire dans l'environnement de la machine, en particulier en fonction du taux de salinité, ce qui peut influencer sur l'étanchéité et les contacts électriques.

I.7 Conséquences des défauts :

Les courants circulant dans les barres rotoriques entraînent des surchauffes et des contraintes mécaniques, conduisant éventuellement à des fissures et à la rupture des barres. Lorsqu'une barre se casse, elle peut accélérer la rupture des barres adjacentes par effet d'avalanche, pouvant

même conduire à la destruction totale du rotor. Parallèlement, les efforts électrodynamiques sur les conducteurs des phases induisent des vibrations mécaniques qui détériorent l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles, réduisant ainsi la durée de vie de l'isolant. Du point de vue environnemental, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les facteurs les plus courants [17].

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent sous forme d'excentricité statique, dynamique ou mixte. L'excentricité statique est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. L'excentricité dynamique peut résulter aussi bien d'une déformation du cylindre rotorique que d'une déformation du cylindre statorique [18]. L'excentricité mixte combine les deux premiers types.

Dans la cage, les défauts se traduisent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, souvent causée par une surcharge mécanique, un échauffement excessif local ou un défaut de fabrication, telles que des bulles d'air ou des soudures défectueuses [17].

Au niveau des paliers, le décentrage des flasques peut entraîner une excentricité statique, tandis que la détérioration des roulements à billes conduit généralement à une excentricité dynamique. Il convient de noter que plusieurs études statistiques ont été menées pour évaluer l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine, avec des pourcentages de prévalence cités dans diverses publications [19] - [20]. Bien que les résultats puissent varier d'une étude à l'autre, elles convergent toutes pour classer les défauts de paliers comme les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier lieu, les défauts de la cage rotorique [17].

I.8 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant : [2]

Avantages	Inconvénients
Structure simple. Robuste et facile à construire. Coût réduit. Absence d'un système bagues balais.	Non découplage naturel. Non linéarités.

I.9 Conclusion

En conclusion de ce premier chapitre, nous avons examiné en détail l'état actuel des techniques de diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Nous avons exploré la constitution de la machine asynchrone à cage ainsi que les différentes causes de défauts, qu'ils soient statoriques ou rotoriques. Nous avons également identifié les conséquences potentielles de ces défauts sur le fonctionnement de la machine. En outre, nous avons passé en revue les différentes méthodes de diagnostic disponibles, en nous concentrant sur les approches externes, internes, inductives et déductives. Enfin, nous avons examiné en détail les différentes techniques de diagnostic, notamment les techniques mécaniques, chimiques et magnétiques, ainsi que les méthodes basées sur l'analyse des grandeurs électriques telles que les tensions, les courants et les flux magnétiques. Ces éléments fournissent une base solide pour la poursuite de notre étude sur le diagnostic de la machine asynchrone .



Chapitre II

**Méthodes avancées de diagnostic des
moteurs à induction**



II.1. Introduction

Pierre angulaire de l'industrie contemporaine, le moteur asynchrone à cage d'écureuil s'est imposé comme la machine de conversion électromécanique par excellence. Sa fiabilité mécanique, son prix abordable, son bon rendement et la facilité de son entretien expliquent sa prédominance : à lui seul, il absorbe une part importante de l'électricité consommée par l'industrie[23]. Cette généralisation a toutefois une contrepartie, la nécessité d'une surveillance étroite : une défaillance passée inaperçue peut immobiliser une ligne de fabrication entière et entraîner des frais de maintenance et des pertes d'exploitation considérables.

D'après les relevés industriels, les avaries de la machine asynchrone proviennent essentiellement de quatre sources : les roulements, le stator (au premier rang desquels les courts-circuits entre spires), le rotor (barres ou anneaux rompus) et l'excentricité de l'entrefer[24]. La répartition typique présentée à la Figure II.2 montre que les roulements et le stator totalisent à eux seuls près de quatre défaillances sur cinq. Dans cet ensemble, le *court-circuit entre spires* de l'enroulement statorique est particulièrement redouté. Né d'une altération localisée de l'isolant — sous l'effet conjugué de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et environnementales — il progresse d'abord sans bruit, ne touchant que quelques spires, puis dégénère brutalement en un court-circuit franc phase-phase ou phase-masse capable de détruire la machine. Comme la phase pendant laquelle il demeure bénin est brève, le détecter tôt, tant que peu de spires sont concernées, constitue l'un des défis les plus exigeants du diagnostic des machines électriques.

Pendant longtemps, le suivi de l'état des machines a reposé sur des grandeurs telles que les vibrations, le flux de fuite, la température ou le couple. Quoique efficaces, ces techniques exigent le plus souvent des capteurs spécifiques, parfois intrusifs et coûteux. L'examen des signatures du courant statorique (MCSA, de l'anglais *Motor Current Signature Analysis*) a bouleversé cette pratique pour devenir la méthode de référence[3] : non invasive et économique, elle se prête naturellement à une surveillance permanente, un simple capteur de courant — souvent déjà présent pour la commande — suffisant à la mettre en œuvre. Elle repose sur une observation physique fondamentale : tout défaut brise une symétrie de la machine et perturbe la distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer, ce qui se traduit par l'apparition ou le renforcement d'harmoniques caractéristiques dans le spectre du courant absorbé.

La MCSA souffre cependant d'une faiblesse de fond dès que le défaut est naissant : l'empreinte qu'il laisse dans le spectre est de très faible niveau, fréquemment enfouie sous le bruit et éclipsée par la composante fondamentale à 50 Hz, dont l'énergie la dépasse de plusieurs ordres

de grandeur. Pour lever cet obstacle, on a développé une famille de méthodes dites *avancées*. Toutes obéissent à la même stratégie : faire subir au courant, en amont de la transformée de Fourier, un prétraitement mathématique (mise au carré, transformation de Park, transformation de Hilbert, ou une combinaison de celles-ci) destiné à amplifier la signature du défaut et à améliorer le rapport signal sur bruit.

Ce chapitre se propose d'exposer, de détailler et de comparer six de ces approches, rangées par sensibilité croissante au court-circuit entre spires : la MCSA, la MSCSA (*Motor Square Current Signature Analysis*), la PVSM (*Park's Vector Square Modulus*), la PVPA (*Park's Vector Product Approach*), la méthode de Park–Hilbert PVSMP-H, et enfin la HPVPA (*Hilbert–Park's Vector Product Approach*)[4]. Elles visent toutes le même but — révéler dans le spectre les harmoniques propres au défaut — mais se distinguent par la grandeur qu'elles soumettent réellement à l'analyse fréquentielle, donc par la sensibilité qu'elles confèrent à la signature. La Figure II.1 en offre une vue d'ensemble : à partir des trois courants de ligne, trois chaînes de prétraitement (voie directe, voie de Park, voie de Hilbert) alimentent six signatures distinctes, toutes analysées par FFT.

L'organisation du chapitre suit cette progression. La section II.2 rappelle la nature des principaux défauts de la machine et la manière dont ils marquent le courant. La section II.3 revient sur l'origine physique des harmoniques exploités et les regroupe en quatre familles. La section II.4 présente les deux outils mathématiques communs — les transformées de Park et de Hilbert. La section II.5 détaille tour à tour les six approches et leurs fondements théoriques. La section II.6 en dresse la synthèse comparative, prolongée par une étude expérimentale quantitative (section II.7) appuyée sur des indices de sensibilité partielle et globale. La section II.8, enfin, introduit la méthode NRHA, dont découle l'approche développée au chapitre III.

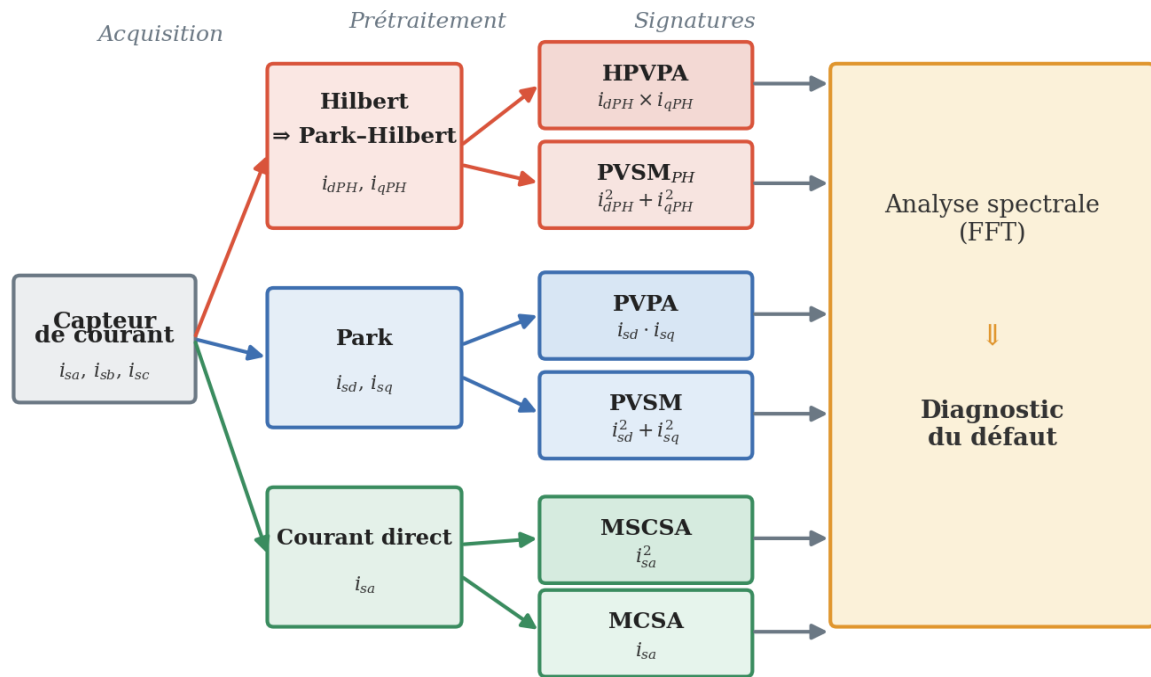


Figure II. 1 Schéma synoptique des six approches de diagnostic à partir du courant statorique.

II.2. Généralités sur les défauts du moteur à induction

Avant d'examiner les méthodes de diagnostic, il est utile de rappeler brièvement quels sont les principaux défauts et de quelle manière ils s'inscrivent dans le courant statorique. Ce détour éclaire le choix des signatures retenues par les différentes approches. La Figure II.2 en rappelle la répartition statistique.

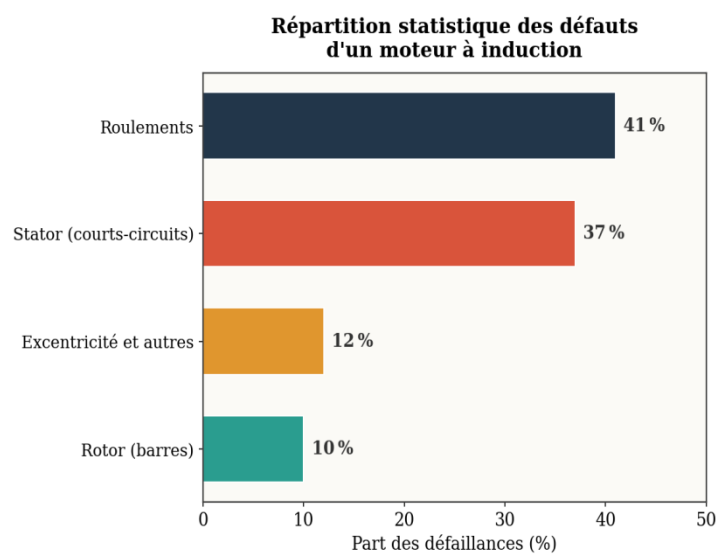


Figure II. 2 Répartition statistique typique des défauts d'un moteur à induction

II.2.1. Le court-circuit entre spires du stator

L'enroulement statorique d'une machine asynchrone se compose de spires que sépare un isolant — vernis ou résine. Lorsque cet isolant se détériore entre deux spires voisines d'une même phase, un passage conducteur de faible impédance s'installe : c'est le court-circuit entre spires. Le courant qui parcourt la boucle ainsi créée peut représenter plusieurs fois le courant nominal et provoque un fort échauffement local, lequel précipite la dégradation de l'isolant des spires adjacentes. Le défaut se propage alors de proche en proche, d'où tout l'intérêt d'une détection dès le stade naissant.

Sur le plan électromagnétique, ce défaut rend asymétrique la distribution des enroulements. Le champ magnétique tournant, jusqu'alors équilibré, se scinde désormais en une composante directe et une composante inverse. C'est cette dernière qui fait naître, dans le courant statorique, des harmoniques additionnels dont les fréquences et les amplitudes forment la signature recherchée par les méthodes de diagnostic.

II.2.2. Les autres défauts et leur signature

Bien que ce chapitre privilégie le court-circuit entre spires, il faut noter que les méthodes exposées répondent aussi aux trois autres familles de défauts. Les **ruptures de barres rotoriques** introduisent une asymétrie de la cage qui module l'amplitude du courant et fait apparaître des bandes latérales autour du fondamental, aux fréquences $(1 \pm 2ks)f_s$. L'**excentricité d'entrefer** — statique, dynamique ou mixte — modifie périodiquement la réluctance du circuit magnétique et engendre des raies liées à la vitesse de rotation f_r . Les **défauts de roulements**, enfin, se manifestent par des vibrations mécaniques qui, via les variations d'entrefer qu'elles provoquent, se reportent sous forme de modulations sur le courant statorique. Le caractère partiellement recouvrant de ces signatures justifie le recours à plusieurs familles d'harmoniques, détaillées à la section II.3.

II.2.3. Les approches de surveillance par le courant

Au fil du temps, diverses grandeurs physiques ont servi à surveiller l'état de santé d'une machine : vibrations mécaniques, flux de fuite axial, température des enroulements, couple électromagnétique, ou encore analyse chimique des huiles et des gaz dissous. Chacune a ses mérites, mais la plupart imposent des capteurs dédiés, souvent coûteux et parfois intrusifs, ce qui en réserve l'usage aux machines de forte puissance ou critiques.

L'analyse du courant statorique offre de ce point de vue un atout déterminant : le courant est une grandeur déjà mesurée dans la plupart des entraînements modernes, pour la commande ou

la protection. L'exploiter à des fins de diagnostic ne réclame donc aucun capteur additionnel. De plus, le courant garde la trace de presque tous les défauts, électriques comme mécaniques, puisque tous finissent par troubler le champ d'entrefer et, de ce fait, les courants induits. C'est cette universalité, alliée à son caractère non invasif, qui a érigé l'analyse du courant en socle des méthodes étudiées dans ce chapitre.

II.3. Harmoniques caractéristiques du courant statorique

Le principe physique partagé par toutes les méthodes de diagnostic par le courant tient à un constat simple mais essentiel : une machine parfaitement saine et symétrique absorbe un courant dont le spectre se réduit pratiquement au seul fondamental, tandis qu'un défaut, en rompant une symétrie, fait apparaître ou renforce des raies à des fréquences bien déterminées. Il faut cependant nuancer : même saine, une machine réelle présente déjà un spectre riche, car la répartition discrète des enroulements, la denture du rotor et du stator ainsi que la saturation du circuit magnétique créent naturellement des harmoniques d'espace. De même, une alimentation imparfaite ajoute des harmoniques de temps. Diagnostiquer revient donc, le plus souvent, non pas à déceler des fréquences entièrement nouvelles, mais à mesurer le *renforcement* de raies préexistantes. On répartit ces raies en quatre familles, illustrées à la Figure II.3 et résumées au Tableau II.1.

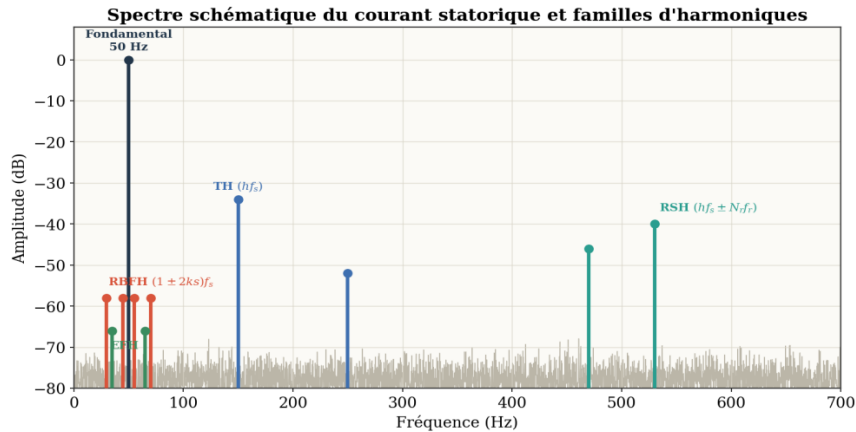


Figure II. 3 Représentation schématique du spectre du courant et localisation des quatre familles d'harmoniques.

La fréquence de rotation mécanique du rotor, notée f_r , intervient dans la définition de plusieurs de ces familles. Elle se déduit de la fréquence d'alimentation f_s , du glissement s et du nombre de paires de pôles p par la relation :

$$f_r = \frac{(1-s)f_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

Ces quatre familles d'harmoniques se différencient par leur origine physique comme par leur expression en fréquence. Les **harmoniques de temps** (TH) correspondent aux multiples impairs du fondamental ; ils rendent compte de la distorsion globale de l'onde de courant et réagissent à toute asymétrie d'alimentation ou d'enroulement. Les **harmoniques d'encoches rotoriques** (RSH, *Rotor Slot Harmonics*) dépendent du nombre de barres N_r et sont très sensibles à l'état du circuit magnétique. Les **harmoniques de barres cassées** (RBFH, *Rotor Bar Fault Harmonics*) se présentent comme des bandes latérales du fondamental, distantes de $2ksf_s$. Les **harmoniques d'excentricité** (EFH, *Eccentricity Fault Harmonics*) se rattachent enfin aux défauts d'entrefer. Le Tableau II.1 en réunit les expressions.

Tableau II. 1 Les quatre familles d'harmoniques exploitées pour le diagnostic.

Famille	Expression fréquentielle	Origine physique du défaut
TH	$f_{TH} = h \cdot f_s$	Distorsion de l'harmonique ; asymétrie d'alimentation et d'enroulement
RSH	$ h \cdot f_s \pm N_r \cdot f_r $	fente rotorique et état du circuit magnétique
RBFH	$(1 \pm 2ks) \cdot f_s$	Asymétrie de la cage rotorique (barres ou anneaux rompus)
EFH	$ h \cdot f_s \pm k \cdot f_r $	Excentricité d'entrefer (statique, dynamique, mixte)

où $h = 1, 3, 5, \dots$ désigne le rang de l'harmonique de temps et $k = 1, 2, 3, \dots$ un entier. Parce qu'il perturbe à la fois le champ et les courants induits, un court-circuit entre spires laisse une empreinte sur ces quatre familles à la fois. C'est pourquoi les méthodes les plus efficaces apprécient leur sensibilité non sur une seule famille, mais sur les quatre simultanément — principe que formaliseront les indices de sensibilité introduits à la section II.7.

II.4. Outils mathématiques communs

Les six approches étudiées ne se distinguent que par la grandeur qu'elles présentent à la transformée de Fourier. Or les plus performantes s'appuient sur deux transformations mathématiques fondamentales, qu'il convient d'introduire au préalable : la transformée de Park, qui ramène les trois courants de phase à un vecteur dans le plan, et la transformée de Hilbert, qui en dégage l'enveloppe instantanée. L'une et l'autre poursuivent le même but : concentrer l'information utile et réduire la composante fondamentale qui masque la signature du défaut.

Rappelons que l'analyse spectrale s'appuie sur la transformée de Fourier rapide (FFT), qui décompose un signal temporel en ses constituants fréquentiels. Sa résolution en fréquence varie en raison inverse de la durée d'acquisition : séparer deux raies très proches — par exemple une signature de défaut située à quelques hertz du fondamental — impose donc une acquisition

longue et une fréquence d'échantillonnage adéquate. Voilà l'une des raisons pour lesquelles le simple examen du spectre brut (MCSA) montre vite ses limites : non seulement le fondamental masque les raies voisines par fuite spectrale, mais leur séparation exige des conditions expérimentales sévères. Les prétraitements présentés ci-après atténuent en partie cette difficulté en déplaçant et en amplifiant les signatures avant l'analyse.

II.4.1. La transformée de Park

La transformée de Park projette le système triphasé des courants statoriques (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) sur un repère biphasé orthogonal (d , q). L'idée d'employer le vecteur de Park pour diagnostiquer les courts-circuits statoriques remonte aux travaux fondateurs de Cardoso *et al.*[27]. Cette projection n'est pas un simple artifice de calcul : en supprimant la redondance propre à un système triphasé équilibré, elle rassemble toute l'information de déséquilibre dans deux composantes scalaires, ce qui rend le défaut immédiatement lisible. Dans la convention conservant la puissance, ces composantes s'écrivent :

$$i_{sd}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sc}(t) \quad (\text{II.2})$$

$$i_{sq}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sc}(t) \quad (\text{II.3})$$

L'intérêt diagnostique de cette transformation se révèle de façon frappante dans le *plan de Park*. En régime sain et équilibré, le lieu décrit par l'extrémité du vecteur (i_{sd} , i_{sq}) au fil du temps est un cercle parfait, centré sur l'origine, de rayon proportionnel à l'amplitude du courant. Lorsqu'un court-circuit entre spires survient, l'asymétrie qu'il introduit transforme ce cercle en une ellipse, dont l'aplatissement et l'orientation renseignent directement sur la sévérité et la localisation du défaut (Figure II.4). C'est cette perte de circularité que les approches PVSM et PVPA convertissent en grandeurs scalaires propices à l'analyse spectrale.

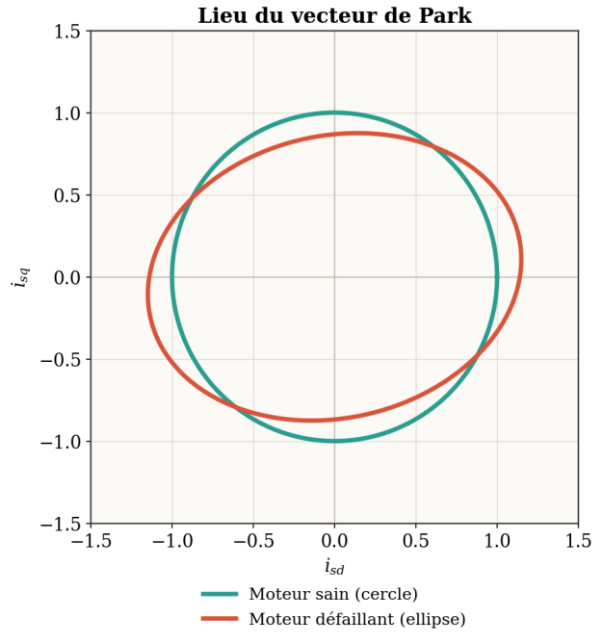


Figure II. 4 Lieu du vecteur de Park : cercle (machine saine) et ellipse (machine défaillante).

II.4.2. La transformée de Hilbert et l'amplitude instantanée

La transformée de Hilbert associe à un signal réel $i_{sa}(t)$ un signal analytique complexe dont la partie imaginaire est ce même signal déphasé de 90° . En désignant par $\hat{i}_{sa}$ la transformée de Hilbert de i_{sa} , le signal analytique correspondant s'écrit :

$$\tilde{i}_{sa}(t) = i_{sa}(t) + j \cdot \hat{i}_{sa}(t) \quad (\text{II.4})$$

L'intérêt décisif de cette construction est qu'elle donne un accès direct à l'*amplitude instantanée* — l'enveloppe — du courant, égale au module du signal analytique :

$$|\tilde{i}_{sa}(t)| = \sqrt{i_{sa}^2(t) + \hat{i}_{sa}^2(t)} \quad (\text{II.5})$$

Cette opération se comporte comme un démodulateur d'enveloppe : elle isole la modulation d'amplitude portée par les bandes latérales du défaut, tout en s'affranchissant d'une large part de l'oscillation à la fréquence fondamentale (Figure II.5). Or c'est justement cette oscillation fondamentale qui dissimule les signatures naissantes dans la MCSA classique. La transformée de Hilbert constitue ainsi un prétraitement particulièrement efficace en vue d'un diagnostic précoce.

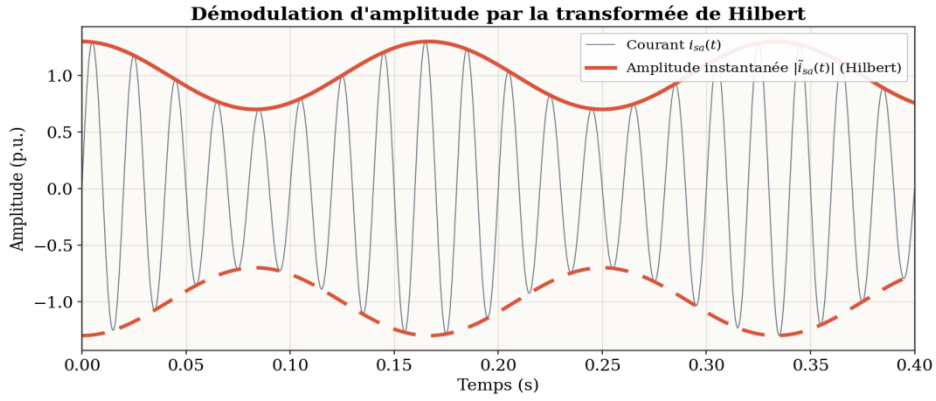


Figure II. 5Extraction de l'enveloppe (amplitude instantanée) du courant par la transformée de Hilbert.

En appliquant la transformée de Hilbert aux trois courants de phase pour en tirer les amplitudes instantanées, puis la transformée de Park à ces enveloppes au lieu des courants eux-mêmes, on définit les *composantes de Park–Hilbert*, notées i_{dP-H} et i_{qP-H} . Elles cumulent les atouts des deux transformations — la concentration de l'information par Park et la suppression de la porteuse par Hilbert — et s'expriment par :

$$i_{dP-H} = \sqrt{\frac{2}{3}} |\tilde{i}_{sa}| - \frac{1}{\sqrt{6}} |\tilde{i}_{sb}| - \frac{1}{\sqrt{6}} |\tilde{i}_{sc}| \quad (\text{II.6})$$

$$i_{qP-H} = \frac{1}{\sqrt{2}} |\tilde{i}_{sb}| - \frac{1}{\sqrt{2}} |\tilde{i}_{sc}| \quad (\text{II.7})$$

Ces deux composantes forment le socle des deux approches les plus performantes de l'étude, la PVSMP-H et la HPVPA, examinées plus loin.

II.5. Les six approches de diagnostic

Les six méthodes découlent des grandeurs précédentes au moyen d'opérations élémentaires — prise directe du courant, mise au carré, somme des carrés ou produit. Chacune aboutit à un signal réel dont on calcule le spectre par FFT. Ce qui les sépare, c'est la façon dont elles font émerger les harmoniques du défaut au-dessus du plancher de bruit. Nous les présentons par ordre de complexité — et, on le verra, de sensibilité — croissante.

II.5.1. MCSA — analyse directe du courant

L'approche historique, et la plus élémentaire, applique la transformée de Fourier directement au courant d'une seule phase statorique, sans aucun prétraitement[25] :

$$MCSA = i_{sa}(t) \quad (\text{II.8})$$

Sa simplicité fait tout à la fois sa force et sa faiblesse. Sa force : un seul capteur, une seule FFT, une lecture directe du spectre, ce qui en a fait l'outil industriel de référence depuis les années 1980. Sa faiblesse : la raie fondamentale à 50 Hz, d'amplitude bien supérieure à celle des harmoniques de défaut, sature la dynamique du spectre et, par fuite spectrale, masque les signatures de son voisinage immédiat. Qui plus est, la position de ces signatures dépend du glissement, donc de la charge, ce qui gêne leur identification automatique. La MCSA constitue ici le niveau de référence inférieur auquel les autres approches sont comparées.

II.5.2. MSCSA — analyse du carré du courant

La MSCSA examine le spectre du carré du courant de phase :

$$MSCSA = i_{sa}^2(t) \quad (\text{II.9})$$

La mise au carré est une opération non linéaire qui crée des produits d'intermodulation entre le fondamental et les composantes harmoniques. En développant le carré d'une somme de sinusoides, on voit surgir une composante continue, une raie au double de la fréquence ($2f_s$), et surtout des raies latérales translatées — par exemple en $(1 \pm 2ks) \cdot 2f_s$. Ce repliage déporte les signatures du défaut vers une zone spectrale moins encombrée que le voisinage du fondamental et accroît leur amplitude relative. Il en découle une sensibilité supérieure à celle de la MCSA, obtenue sans matériel supplémentaire ni transformation vectorielle — ce qui explique l'attrait pratique de cette approche.

II.5.3. PVSM — module au carré du vecteur de Park

La PVSM exploite le module au carré du vecteur de Park, c'est-à-dire la somme des carrés de ses deux composantes :

$$PVSM = |i_{sd} + ji_{sq}|^2 = i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \quad (\text{II.10})$$

En ramenant le déséquilibre triphasé à une unique grandeur scalaire, la PVSM diminue fortement la contribution du fondamental — qui se reporte sur un niveau quasi continu — et met ainsi en évidence les composantes dues au défaut. Le spectre de cette grandeur comporte un terme continu et des composantes additionnelles aux fréquences $2sf_s, 4sf_s, \dots$, soit, de façon générale, $2ksf_s$. La prise en compte simultanée des trois phases amplifie la signature de l'asymétrie : la PVSM dépasse donc nettement la MCSA pour le court-circuit entre spires. Elle reste néanmoins en retrait par rapport aux approches recourant à la transformée de Hilbert, car le module carré conserve une part notable de l'énergie du fondamental.

II.5.4. PVPA — produit des composantes de Park

La PVPA, proposée par Allal *et al.*[2], ne se fonde plus sur le module carré mais sur le *produit* des deux composantes de Park :

$$PVPA = i_{sd}(t) \cdot i_{sq}(t) \quad (\text{II.11})$$

Le produit $i_{sd} \cdot i_{sq}$ donne un spectre comportant une composante à $2f_s$, des bandes latérales en ($2f_s \pm f_r$) ainsi que des composantes à f_r et $2f_r$. Cette approche se montre très sensible aux déformations croisées du lieu de Park, donc aux harmoniques d'excentricité, dont la signature est précisément liée à f_r . En revanche, pour le court-circuit entre spires — défaut essentiellement statorique — elle est la moins efficace des approches vectorielles : la symétrie particulière de l'ellipse créée par ce défaut atténue l'effet du produit. Cet exemple illustre une idée centrale du diagnostic : aucune signature n'est universellement optimale, le choix dépend du défaut visé.

II.5.5. PVSM_{p-h} — module au carré de Park–Hilbert

La méthode de Park–Hilbert, due à Sahraoui *et al.*[28], transpose la PVSM aux composantes de Park–Hilbert définies plus haut (équations II.6 et II.7). Elle calcule le module carré de ces composantes et profite ainsi de la démodulation déjà réalisée par la transformée de Hilbert :

$$PVSM_{P-H} = i_{dP-H}^2 + i_{qP-H}^2 \quad (\text{II.12})$$

L'étape de Hilbert, en isolant l'enveloppe, élimine l'essentiel de l'oscillation fondamentale avant la projection de Park. Le module carré obtenu est donc beaucoup plus pauvre en composante fondamentale et, en proportion, beaucoup plus riche en signatures de défaut. Les harmoniques du défaut y ressortent avec un contraste renforcé. La PVSM_{P-H} surclasse nettement la PVSM, la MSCSA et la MCSA, et se hisse au deuxième rang de l'étude comparative, juste derrière la HPVPA.

II.5.6. HPVPA — produit vectoriel de Park–Hilbert

L'approche HPVPA, due à Allal et Chetate[26], couronne cette démarche. Elle reprend les composantes de Park–Hilbert mais, à la façon de la PVPA, en calcule le *produit* plutôt que la somme des carrés :

$$HPVPA = i_{dP-H} \times i_{qP-H} \quad (\text{II.13})$$

Le traitement enchaîne donc trois étapes, résumées à la Figure II.6 : (II.1) transformée de Hilbert des trois courants et extraction de leurs amplitudes instantanées ; (II.2) calcul des composantes de Park–Hilbert i_{dP-H} et i_{qP-H} ; (II.3) produit de ces deux composantes, dont le spectre est ensuite analysé par FFT.



Figure II. 6 Chaîne de traitement de l'approche HPVPA, du courant mesuré à la signature spectrale.

Sa supériorité provient d'un double mécanisme. D'une part, la transformée de Hilbert ôte la majeure partie du fondamental et place au premier plan les modulations du défaut, comme dans la PVSMP-H. D'autre part, le produit — opération multiplicative — agit en mélangeur et amplifie les bandes latérales du défaut davantage que la somme des carrés, en générant des termes croisés proportionnels au produit des amplitudes des composantes saine et défectueuse. Il en résulte la signature la plus marquée des six méthodes : comme le confirmera l'étude expérimentale, la HPVPA offre la sensibilité la plus élevée au court-circuit entre spires, et ce pour tous les régimes de charge, à la seule exception d'un cas isolé à pleine charge et faible sévérité.

La Figure II.7 illustre schématiquement l'effet du prétraitement sur la lisibilité des signatures. Dans le spectre de la MCSA, le fondamental à 50 Hz domine et les raies de défaut, de très faible amplitude, demeurent noyées dans le bruit. La PVSMP rabat le fondamental sur une composante quasi continue et fait ressortir les bandes latérales. La HPVPA, enfin, concentre l'énergie du défaut sur quelques raies nettes et bien séparées, ce qui explique sa supériorité pour la détection précoce.

Effet du prétraitement sur la lisibilité des signatures

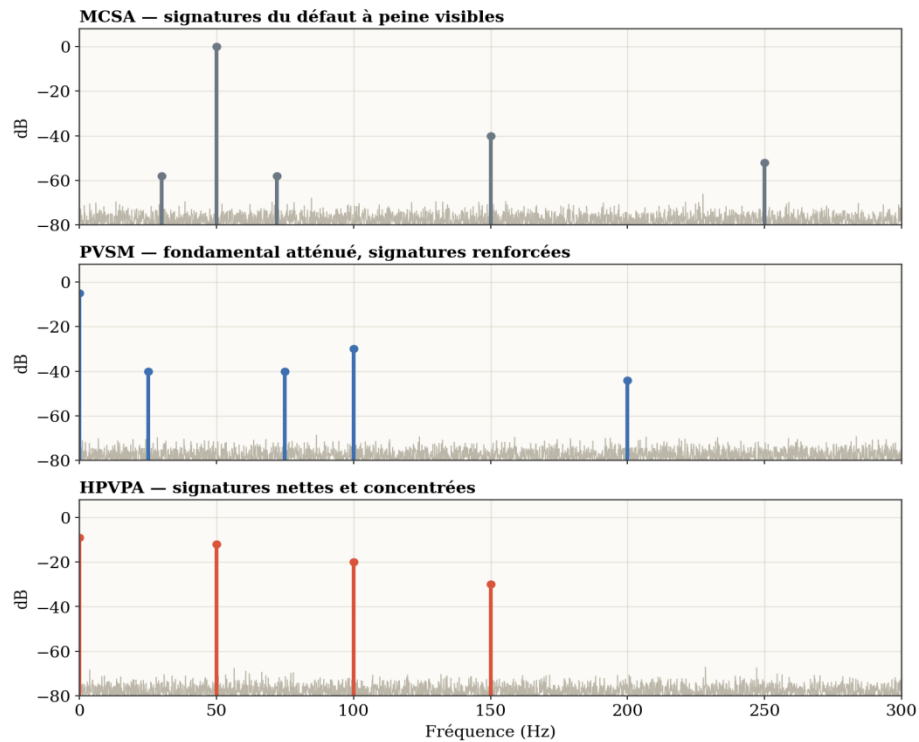


Figure II. 7 Comparaison schématique des spectres obtenus par MCSA, PVSM et HPVPA pour un même défaut.

II.6. Synthèse comparative des approches

Le Tableau II.2 récapitule, pour chacune des six approches, la grandeur analysée, le prétraitement appliqué et le rang de sensibilité obtenu expérimentalement vis-à-vis du court-circuit entre spires. La logique d'ensemble s'y lit clairement : passer du courant brut (MCSA) à des grandeurs de plus en plus prétraitées améliore la sensibilité, le gain le plus net venant de la transformée de Hilbert et le meilleur résultat de son association avec un produit de composantes (HPVPA).

Tableau II. 2 Synthèse des six approches, classées par sensibilité décroissante au court-circuit entre spires.

Rang	Approche	Signal analysé	Traitement appliqué
1	HPVPA	$i_{dP-H} \times i_{qP-H}$	Hilbert, Park–Hilbert, puis produit
2	PVSM_{P-H}	$i_{dP-H}^2 + i_{qP-H}^2$	Hilbert, Park–Hilbert, puis module au carré
3	MSCSA	$i_{sa}^2(t)$	Mise au carré du courant
4	PVSM	$i_{sd}^2 + i_{sq}^2$	Park, puis module au carré
5	MCSA	$i_{sa}(t)$	Aucun (méthode de référence)
6	PVPA	$i_{sd} \cdot i_{sq}$	Park, puis produit des composantes

Il faut souligner que ces six approches révèlent les *mêmes* familles d’harmoniques (TH, RSH, RBFH, EFH) : elles ne diffèrent pas par la nature des signatures, mais par l’amplitude relative qu’elles leur attribuent. Choisir une méthode résulte donc d’un compromis entre sensibilité et coût de calcul, ce dernier augmentant avec le nombre d’opérations de prétraitement. Pour une détection précoce du court-circuit entre spires, où la sensibilité prime, la HPVPA s’impose ; pour une surveillance embarquée aux ressources limitées, la MSCSA offre un excellent compromis.

Sur le plan du coût de calcul, la hiérarchie s’inverse en partie. La MCSA ne demande qu’une seule FFT. La MSCSA y ajoute une mise au carré, opération négligeable. Les approches de Park (PVSM, PVPA) imposent le calcul des deux composantes i_{sd} et i_{sq} , soit quelques multiplications et additions par échantillon. Les approches de Park–Hilbert (PVSM_{P-H}, HPVPA) sont les plus lourdes, car la transformée de Hilbert réclame une convolution — réalisée en pratique par une FFT, un produit fréquentiel et une FFT inverse — appliquée à chacune des trois phases. Dans les faits, ce surcoût reste largement à la portée des processeurs de traitement du signal actuels, de sorte que la sensibilité demeure le critère décisif pour la détection précoce.

II.7. Étude expérimentale comparative

II.7.1. Banc d’essai et protocole

Les approches ont été testées sur un banc d’essai articulé autour d’un moteur asynchrone triphasé à cage de 3 kW, 4 pôles, alimenté à 50 Hz et couplé en étoile, dont l’enroulement compte 200 spires par phase et le rotor 28 barres[26]. Le court-circuit entre spires a été reproduit

physiquement en court-circuitant successivement 4 puis 10 spires d'une phase, soit deux niveaux de sévérité. Pour apprécier l'influence du point de fonctionnement, chaque essai a été reconduit sous trois niveaux de charge : faible (20 %), moyenne (60 %) et pleine charge (100 % de la charge nominale). Les spectres sont calculés par FFT en échelle logarithmique (décibels), qui rehausse les harmoniques de faible amplitude et facilite la lecture des signatures.

II.7.2. Indices de sensibilité partielle et globale

Afin de comparer les méthodes de manière objective, on définit deux indicateurs quantitatifs[26]. L'indice de sensibilité partielle (PRI, *Partial Relative Index*), calculé pour chaque famille d'harmoniques H et chaque approche A , rapporte la moyenne des amplitudes en régime de défaut à celle du régime sain. Un décalage de 120 dB est ajouté à chaque amplitude pour rendre toutes les valeurs positives :

$$PRI_{A,H} = \frac{\frac{1}{N_H} \sum_{i=1}^N (A_{i,déf} + 120)}{\frac{1}{N_H} \sum_{i=1}^N (A_{i,sain} + 120)} \quad (II.14)$$

où N_H est le nombre d'harmoniques de la famille H , et $A_{i,déf}$ et $A_{i,sain}$ les amplitudes du i -ième harmonique en régime défaillant et sain. L'indice de sensibilité globale (GRI, *Global Relative Index*) se définit ensuite comme la moyenne arithmétique des quatre PRI, résumant en un seul nombre la réponse de la méthode à l'ensemble des familles :

$$GRI_A = \frac{PRI_{A,TH} + PRI_{A,RSH} + PRI_{A,RBFH} + PRI_{A,EFH}}{4} \quad (II.15)$$

Par construction, un GRI égal à l'unité correspond à une machine saine ; plus il s'en écarte, plus la méthode est sensible au défaut considéré. Cet indicateur unique autorise un classement sans ambiguïté des approches.

II.7.3. Résultats et discussion

La Figure II.8 montre l'évolution du GRI de la HPVPA en fonction de la charge, pour les deux niveaux de sévérité. Deux tendances se dégagent. D'abord, la sensibilité croît fortement avec la gravité du défaut : le GRI passe d'environ 1,07 pour 4 spires court-circuitées à des valeurs comprises entre 1,24 et 1,26 pour 10 spires. Ensuite, cette sensibilité reste élevée à faible et moyenne charge — précisément là où les méthodes classiques perdent de leur efficacité, le défaut étant alors le plus difficile à repérer.

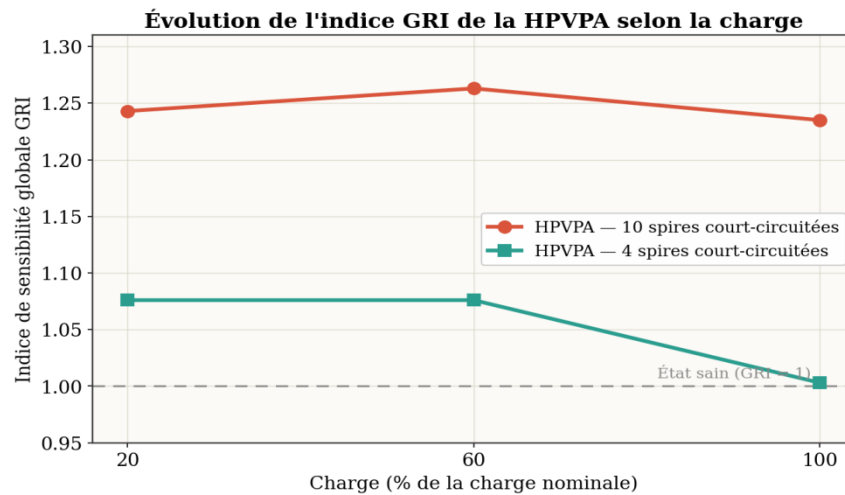


Figure II. 8Évolution de l'indice GRI de la HPVPA selon la charge et le nombre de spires en défaut (d'après [26]).

Le Tableau II.3 réunit les valeurs de l'indice GRI relevées pour les six approches, dans le cas d'un défaut de 10 spires sous faible charge. Ces valeurs chiffrées confirment quantitativement l'écart de sensibilité entre les méthodes.

Tableau II. 3Indices GRI des six approches (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [26]).

Approche	Indice GRI	Rang
HPVPA	1,2437	1
PVSM _{P-H}	1,2042	2
MSCSA	1,0936	3
PVSM	1,0964	4
MCSA	1,0596	5
PVPA	1,0759	6

La Figure II.9 traduit graphiquement ce classement. La hiérarchie y est sans équivoque : la HPVPA domine avec un GRI proche de 1,24, suivie de la PVSMP-H, puis des méthodes fondées sur la seule transformée de Park et de la MCSA, la PVPA fermant la marche pour ce type de défaut statorique.

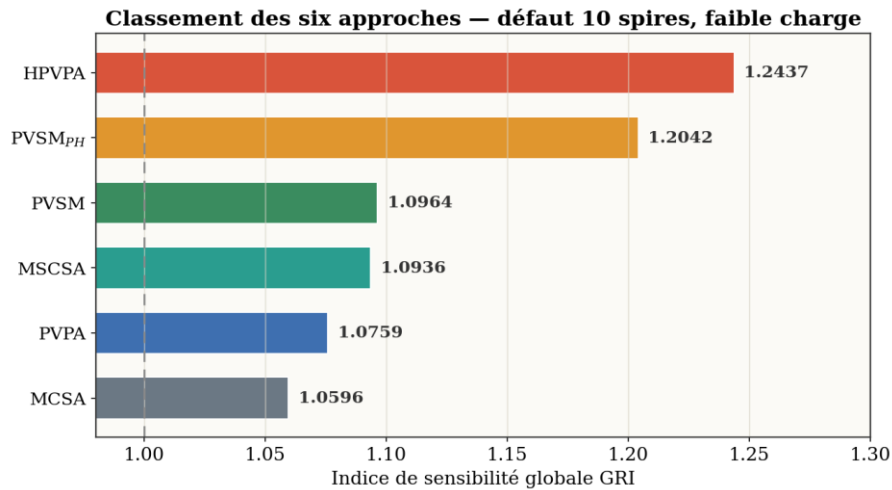


Figure II. 9 Classement des six approches selon l'indice GRI (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [26]).

L'ensemble des essais aboutit au classement global suivant, par sensibilité décroissante : **HPVPA > PVSMP-H > MSCSA > PVSM > MCSA > PVPA**. La HPVPA se confirme donc comme la technique la mieux adaptée à la détection précoce d'un court-circuit entre spires du stator, quel que soit le régime de fonctionnement de la machine. Ces résultats valident la hiérarchie attendue sur le plan théorique et établissent que l'association d'une démodulation par Hilbert et d'un produit des composantes de Park représente la stratégie la plus efficace pour ce défaut.

II.8. Vers une nouvelle approche : la méthode NRHA

Aussi performantes soient-elles, les six approches précédentes reposent sur une même logique : amplifier la signature du défaut par un prétraitement non linéaire, puis l'analyser dans un spectre exprimé en décibels. Leurs signatures restent toutefois dispersées sur de nombreuses fréquences qui dépendent du glissement, de la charge et du type de défaut, ce qui complique l'automatisation du diagnostic. Une démarche plus récente, l'analyse des harmoniques résiduels normalisés du courant moteur — **NRHA** (*Normalized Residual Harmonic Analysis*) —, propose de surmonter cette difficulté[29].

Son principe consiste à confronter, harmonique par harmonique, le spectre FFT linéaire *normalisé* du courant sain à celui du courant défaillant, puis à exploiter le *résidu* entre les deux. La normalisation ramène toutes les acquisitions à une même référence, si bien que la signature du défaut se concentre sur un harmonique résiduel situé à une fréquence fixe (50 Hz), indépendamment de la nature du défaut. Ne réclamant qu'un simple capteur de courant, la méthode a été validée expérimentalement à la fois sur des ruptures de barres rotoriques et sur

des courts-circuits entre spires ; les résultats laissent d'ailleurs entrevoir une réponse sensiblement plus marquée pour le défaut rotorique de barres cassées que pour le défaut statorique de court-circuit entre spires, ce qui en fait un outil tout indiqué pour la surveillance du rotor.

Cette notion de résidu normalisé prolonge naturellement celle de *sensibilité relative*, qui sera l'outil central du chapitre suivant. Définie comme le rapport de l'amplitude d'un harmonique de temps en régime de défaut à celle du même harmonique en régime sain :

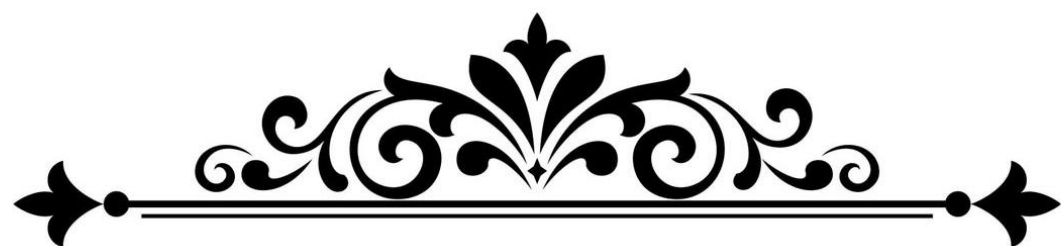
$$S_r = \frac{A_{THd}}{A_{THs}} \quad (\text{II.16})$$

elle exprime directement, pour chaque rang harmonique, l'écart entre l'état sain et l'état défaillant. Plus simple et moins gourmande en calcul que les approches vectorielles, cette formulation ouvre la voie à un diagnostic en ligne particulièrement bien adapté aux défauts d'excentricité. Le chapitre III mettra en œuvre cette approche, dérivée de la NRHA et centrée sur les harmoniques de temps, pour diagnostiquer expérimentalement un défaut d'excentricité et identifier le rang harmonique le plus sensible à ce défaut.

II.9. Conclusion

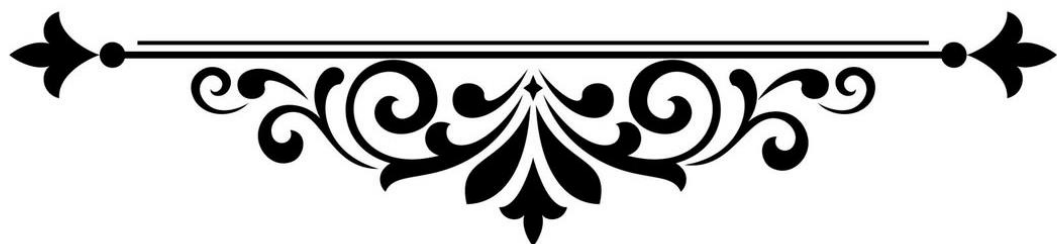
Ce chapitre a présenté et comparé six approches avancées de diagnostic du moteur à induction fondées sur l'analyse du courant statorique. En partant de la méthode de référence (MCSA), nous avons montré comment l'introduction de prétraitements successifs — mise au carré (MSCSA), transformation de Park (PVSM, PVPA), puis transformation de Hilbert (PVSMP-H, HPVPA) — amplifie progressivement la signature du court-circuit entre spires.

L'étude théorique, étayée par une comparaison expérimentale quantitative reposant sur les indices PRI et GRI, a établi le classement de sensibilité suivant : $HPVPA > PVSMP-H > MSCSA > PVSM > MCSA > PVPA$. La HPVPA, qui réunit la démodulation de Hilbert et le produit des composantes de Park, se révèle la plus performante pour la détection précoce, sur toute la plage de charge. Enfin, l'introduction de la méthode NRHA et de la notion de sensibilité relative ouvre la voie à l'approche développée au chapitre suivant, consacré au diagnostic expérimental du défaut d'excentricité.



Chapitre III

METHODOLOGIE EXPERIMENTALE ET DISCUSSION DES RESULTATS



III.1 Introduction

Le diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones constitue une étape essentielle pour assurer la continuité de service, limiter les arrêts imprévus et améliorer la sûreté des entraînements électriques. Dans les environnements industriels, les défauts de barres rotoriques, les défauts d'anneaux de court-circuit et les défauts associés à une dissymétrie électromagnétique peuvent évoluer progressivement avant d'atteindre un état critique. Pour cette raison, l'analyse du courant statorique représente une solution pratique, car elle exploite une grandeur électrique facilement mesurable sans intervention mécanique directe sur la machine.

Ce chapitre présente la méthodologie de diagnostic adoptée à partir de l'article de référence consacré à l'analyse harmonique résiduelle normalisée du courant moteur. Le contenu théorique et expérimental est reformulé afin de l'intégrer dans le cadre de cette thèse. Les figures relatives aux bancs expérimentaux et aux dispositifs de mesure sont conservées avant la présentation des résultats obtenus dans notre travail. Ensuite, les résultats fournis sont analysés et discutés en fonction de trois niveaux de charge : 100 %, 60 % et 20 %.

L'objectif principal est de montrer que la comparaison entre le spectre du courant statorique sain et celui du courant statorique en régime défectueux permet de faire apparaître un indicateur résiduel sensible autour de la fréquence fondamentale d'alimentation. Cet indicateur facilite la détection du défaut sans procéder à un balayage fréquentiel large et complexe.

III.2 Principe général du diagnostic par courant statorique

Dans une machine asynchrone alimentée par un réseau triphasé, le courant statorique contient des informations importantes sur l'état électromagnétique de la machine. En régime sain, son spectre est dominé par la composante fondamentale liée à la fréquence d'alimentation, tandis que les harmoniques secondaires sont généralement faibles. Lorsqu'un défaut rotorique apparaît, l'équilibre du champ magnétique dans l'entrefer est perturbé. Cette perturbation modifie la distribution des courants induits dans la cage et se répercute sur le courant absorbé par le stator.

La méthode classique d'analyse de signature du courant moteur repose généralement sur la recherche des composantes latérales caractéristiques du défaut. Cependant, ces fréquences peuvent varier avec le glissement, la charge et la vitesse de rotation. La méthode NRHA, ou analyse harmonique résiduelle normalisée, cherche à simplifier cette démarche en comparant

directement le spectre normalisé d'un moteur sain avec celui d'un moteur défectueux. Le résidu obtenu met en évidence les variations les plus sensibles liées au défaut.

III.3 Harmoniques du courant statorique dans la machine asynchrone

Le champ d'entrefer d'un moteur asynchrone alimenté par une tension sinusoïdale n'est pas constitué uniquement de la composante fondamentale. Il comprend également plusieurs familles d'harmoniques dues aux encoches rotoriques, aux harmoniques temporelles, aux asymétries de la cage et aux défauts d'excentricité. Ces composantes constituent la base du diagnostic fréquentiel.

III.3.1 Harmoniques d'encoches rotoriques

Les harmoniques d'encoches rotoriques apparaissent à cause de l'interaction entre la perméance variable de l'entrefer et les ondes de force magnétomotrice. Pour une machine saine, ces fréquences peuvent être exprimées sous la forme suivante :

$$f_{RSH}(k, s) = \left| \left(1 \pm \frac{kN_r}{p} (1 - s) \right) f_s \right|, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.1})$$

où k est un entier positif, N_r le nombre de barres ou d'encoches rotoriques, p le nombre de paires de pôles, s le glissement et f_s la fréquence fondamentale d'alimentation. En pratique, toutes les composantes théoriques ne sont pas nécessairement visibles, car leur apparition dépend de la structure de la machine et de l'état d'équilibre de l'alimentation.

III.3.2 Harmoniques temporelles

Les harmoniques temporelles sont liées à la fréquence fondamentale du réseau et à ses multiples. Elles sont données par :

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s \quad (\text{III.2})$$

avec $h = 1, 3, 5, \dots$. La composante $h = 1$ correspond à la fréquence fondamentale de 50

Hz dans le cas étudié. Cette composante est particulièrement importante dans l'approche NRHA, car les variations résiduelles observées autour de cette fréquence se sont révélées très sensibles à la présence du défaut.

III.3.3 Harmoniques liées aux défauts rotoriques et à l'excentricité

Lorsque la cage rotorique présente une asymétrie, comme une barre fissurée ou cassée, des harmoniques de défaut de barre peuvent apparaître autour de la fréquence fondamentale. Ces composantes peuvent être représentées par :

$$f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2ks)f_s| \quad ou R_{\pm} = |(h \pm 2ks)f_s| \quad (III.3)$$

Les défauts d'excentricité, quant à eux, provoquent une modulation supplémentaire du champ d'entrefer. Les fréquences correspondantes peuvent être écrites sous la forme :

$$f_{EFH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{k}{p}(1-s) \right) f_s \right| \quad ou E_{\pm} = |(hf_s \pm kf_r)| \quad (III.4)$$

Ces relations montrent que certaines fréquences caractéristiques dépendent du glissement. Par conséquent, une méthode de diagnostic robuste doit tenir compte de la variation de charge et de vitesse, surtout lorsque le moteur fonctionne dans des conditions industrielles variables.

III.4 Formulation de la méthode NRHA

La méthode NRHA repose sur une comparaison entre deux spectres : le spectre du courant statorique en régime sain (stocker dans la RAM) et le spectre du courant statorique en temps réel, où nous trouvons deux cas voir Fig.III. 1:

1^{er} cas un signal nul c'est-à-dire une ligne horizontale (régime de fonctionnement sain)

2^{ème} cas un signal n'est pas nul avec c'est-à-dire un signal d'impulsion (régime de fonctionnement avec défaut)

Avant la comparaison, les amplitudes sont normalisées afin de réduire l'effet du niveau absolu du courant et de mieux faire ressortir les différences relatives entre les deux états.

$$A(f)_{sain_N} = \frac{A(f)_{sain}}{A(f)_{sain,max}} \quad (III.5)$$

Pour le régime défectueux, on écrit de la même manière :

$$A(f)_{défaut_N} = \frac{A(f)_{défaut}}{A(f)_{défaut,max}} \quad (III.6)$$

Le résidu harmonique normalisé est ensuite calculé par différence entre les deux grandeurs normalisées. Dans l'article de référence, le résidu est présenté sous la forme suivante :

$$A(f)_R = 10 \lambda (A(f)_{défaut_N} - A(f)_{sain_N}) \quad (III.7)$$

Le principe de décision consiste à observer l'existence d'un pic résiduel dans une bande fréquentielle réduite autour de la fréquence fondamentale. Dans le cas d'une alimentation à 50 Hz, l'intervalle d'observation le plus pertinent se situe autour de 49,9 Hz - 50,1 Hz lorsque la résolution fréquentielle est de 0,1 Hz. L'apparition d'un pic marqué dans cette zone est considérée comme un indicateur de défaut.

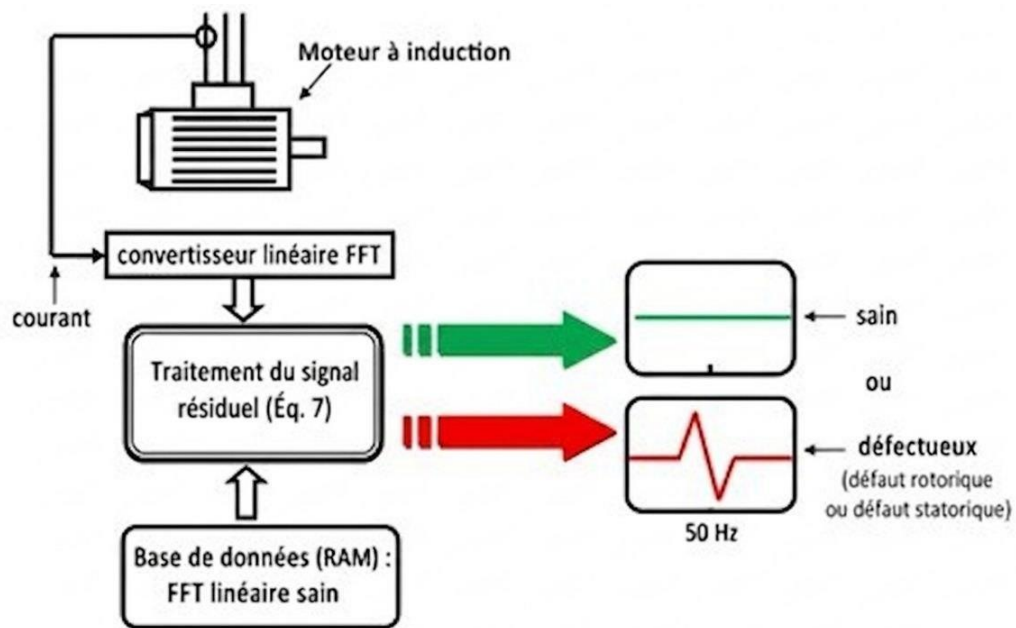


Figure III. 1 Schéma synoptique du diagnostic par la méthode NRHA

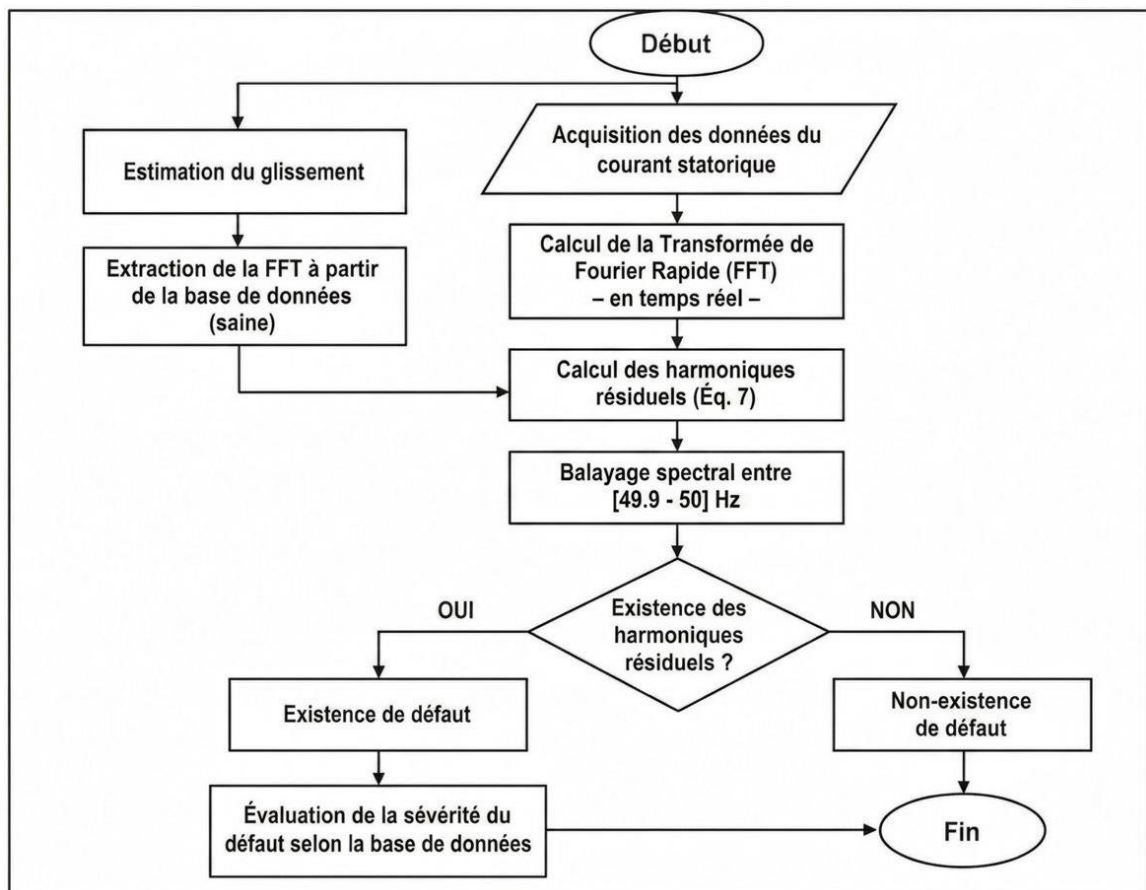


Figure III.2 Organigramme des étapes de détection des défauts par la méthode NRHA

Ce logigramme décrit une méthode de détection des défauts d'un moteur asynchrone basée sur l'analyse du courant statorique. Les données du courant sont d'abord acquises puis transformées dans le domaine fréquentiel à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Après l'estimation du glissement, le spectre obtenu est comparé à un spectre de référence provenant d'une base de données représentant l'état sain du moteur. Les harmoniques résiduels sont ensuite calculés et recherchés dans une bande fréquentielle spécifique. Si aucune composante anormale n'est détectée, le moteur est considéré comme sain. Dans le cas contraire, la présence d'un défaut est confirmée et sa sévérité est évaluée par comparaison avec les données de référence enregistrées dans la base de données.. Voir III. 2

Remarque:

D'après les études expérimentales, nous avons remarqué que l'harmonique de temps TH est plus grand, claire et plus sensible par rapport aux autres harmoniques (RSH, EFH, RBFH)

Pour cela et afin de ne pas alourdir notre mémoire nous limitons notre étude uniquement les harmoniques de temps

III.5 Description des bancs expérimentaux de référence

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans le laboratoire de l'université de Biskra sur un moteur asynchrone. Le moteur, noté IM, est un moteur de 3 kW utilisé notamment pour l'étude de cassure de deux barres rotoriques. Le moteur sont alimentés à 380 V et à 50 Hz, avec quatre pôles.

Caractéristique	Valeur
Fabricant	Leroy Somer
Puissance nominale	3 kW
Vitesse nominale	1430 tr/min
Tension nominale	380 V
Courant nominal	6.40 A
Nombre de pôles	4 (tétrapolaire)
Nombre d'encoches statoriques	48
Nombre de barres rotoriques	28
Type de rotor	À cage d'écureuil en aluminium
Couplage	Étoile sans neutre

Tableau III 1 : Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé dans l'expérimentation[30]



Figure III.3: rotor du moteur 3kW avec deux barres cassées[30]

Les éléments de mesure, utilisés dans pour avoir les résultats expérimentaux, seront exposés dans le passage suivant afin de clarifier l'environnement d'acquisition et les moyens matériels associés à la méthode NRHA.

III.6 Conditions d'acquisition et traitement numérique

Le traitement du signal est effectué à partir du courant statorique mesuré par des capteurs à effet Hall. Dans l'article de référence, le temps d'acquisition est de 10 s et la fréquence d'échantillonnage est de 10 000 Hz. La résolution fréquentielle de la FFT est donc :

$$\Delta f = \frac{f_e}{f_e \cdot t_a} = 0.1 \text{ Hz} \quad (\text{III.8})$$

Cette résolution permet de distinguer les composantes situées à 49,9 Hz, 50 Hz et 50,1 Hz. Dans notre étude, les résultats fournis ont été organisés selon trois niveaux de charge. Pour chaque charge, deux régimes sont comparés : un régime sain et un régime avec défaut. La phase de mesure utilisée est la phase A du courant statorique, ce qui permet d'exploiter le courant statorique comme indicateur indirect de l'état rotorique de la machine.

La démarche suivie est la suivante : acquisition des courants statoriques, calcul du spectre FFT, extraction de la composante fondamentale et calcul du résidu NRHA entre le spectre sain et le spectre défectueux. Les résultats sont ensuite interprétés à partir de l'amplitude du pic résiduel et de sa fréquence d'apparition.

III.7 Résultats obtenus

Les résultats expérimentaux fournis montrent l'évolution des courants statoriques et de leurs spectres pour trois niveaux de charge. La discussion se concentre principalement sur la zone voisine de 50 Hz, car c'est dans cette zone que le résidu harmonique devient le plus significatif.

III.7.1 Résultats pour une charge de 100 %

Pour une charge de 100 %, le spectre du courant sain présente une composante fondamentale dominante à 50 Hz avec une amplitude de 7,87945 A. En régime défectueux, cette composante atteint 8,61611 A. La différence observée se traduit par un pic NRHA de 0,736662 A à 50 Hz. Cette valeur confirme que le défaut modifie directement l'amplitude de la composante fondamentale et produit un résidu clairement détectable.

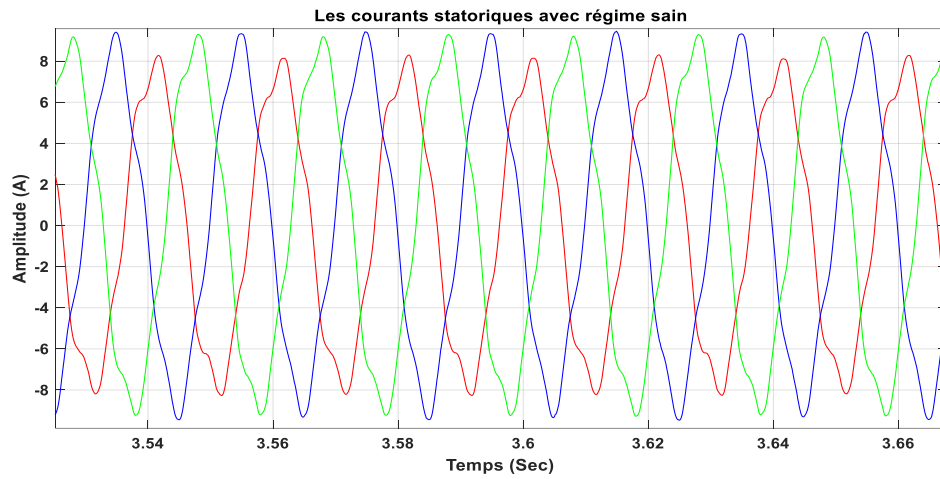


Figure III. 4 Courants statoriques triphasés en régime sain — 100 % de charge

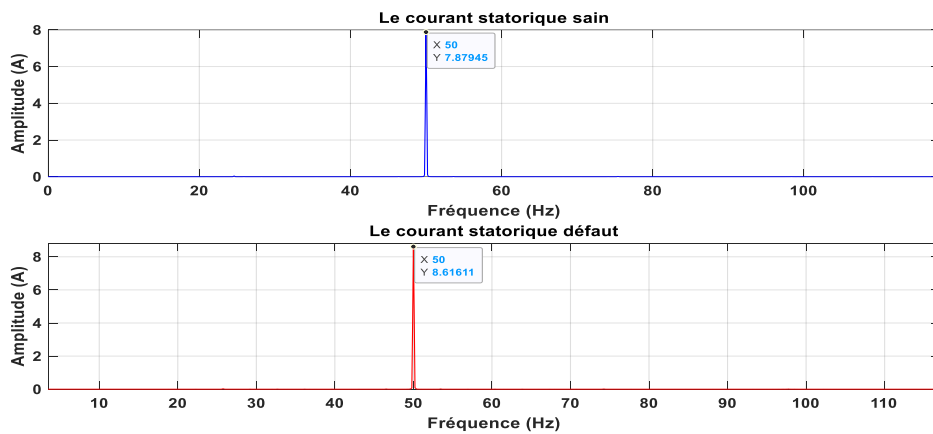


Figure III. 5Analyse spectrale de FFT pour une charge de 100 %.

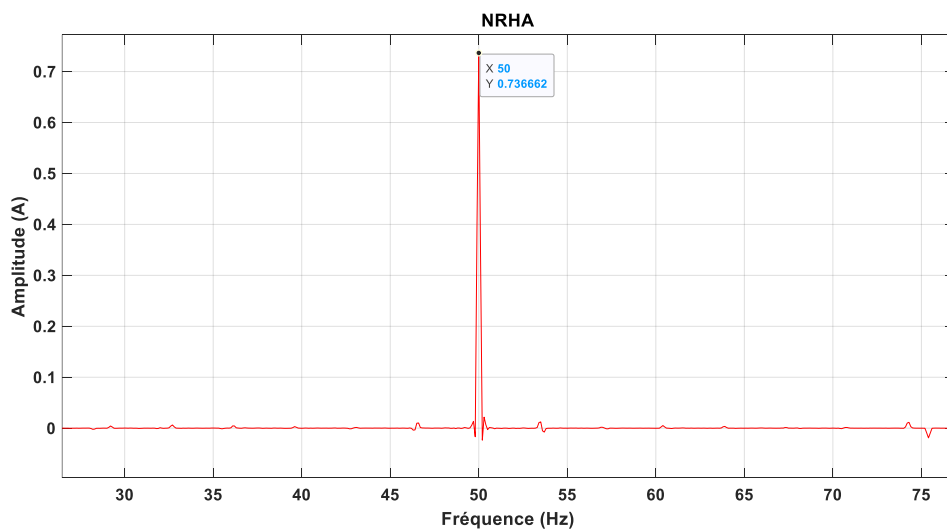


Figure III.6 Analyse spectrale et NRHA pour une charge de 100 %.

Les formes temporelles des courants restent globalement périodiques, mais la comparaison avec l'analyse spectrale montre que le domaine fréquentiel est plus adapté pour distinguer la différence entre l'état sain et l'état défectueux. La méthode NRHA met en évidence l'information de défaut sous forme d'un pic isolé, ce qui facilite la lecture du résultat.

III.7.2 Résultats pour une charge de 60 %

À 60 % de charge, le spectre du courant sain présente une amplitude de 5,55636 A à 50 Hz, tandis que le spectre en régime défectueux atteint 6,42442 A. Le pic NRHA apparaît à 49,9 Hz avec une amplitude de 0,971863 A. Ce résultat est le plus élevé parmi les trois charges étudiées, ce qui montre que la sensibilité du résidu peut varier avec le point de fonctionnement.

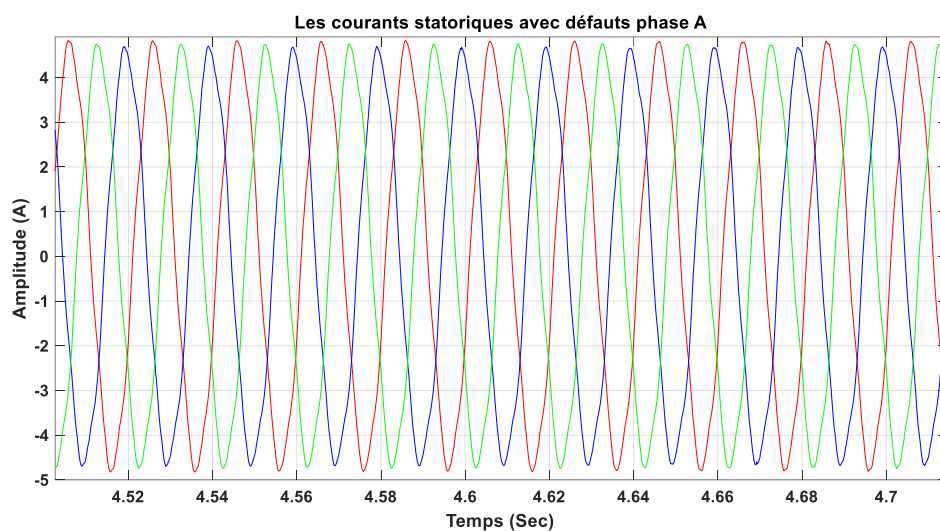


Figure III. 7 Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 60 % de charge

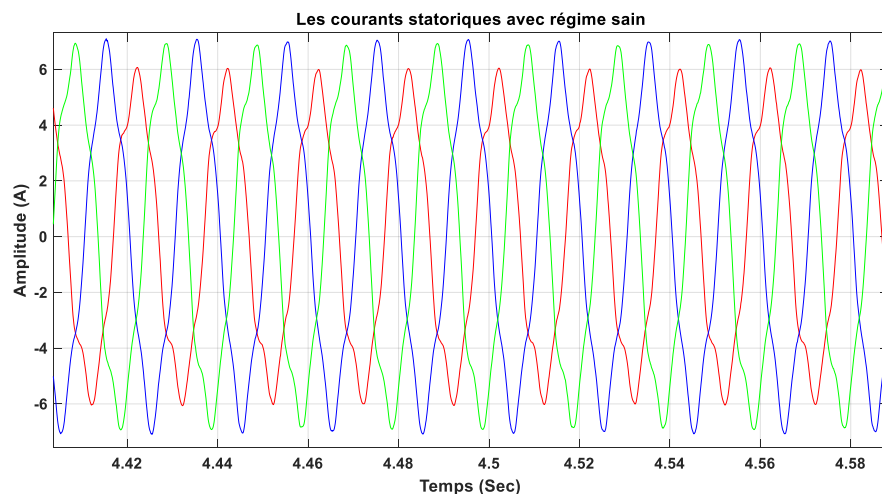


Figure III. 8 Courants statoriques triphasés en régime sain — 60 % de charge

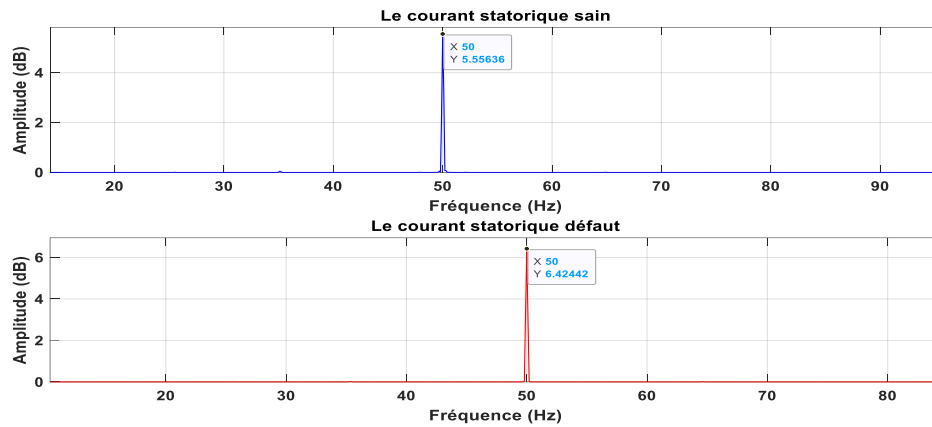


Figure III. 9 Analyse spectrale de FFT pour une charge de 60 %.

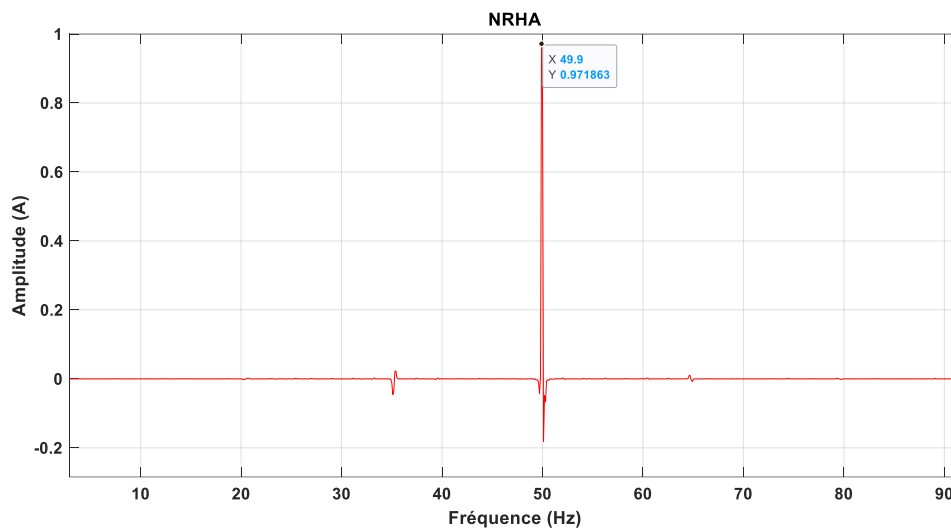


Figure III. 10 Analyse spectrale de NRHA pour une charge de 60 %.

Les courants temporels correspondant à cette charge montrent également une augmentation de l’amplitude en régime défectueux. Toutefois, cette variation reste plus difficile à quantifier directement dans le domaine temporel. L’approche par FFT et NRHA permet donc de transformer cette modification en un indicateur numérique plus exploitable pour le diagnostic.

III.7.3 Résultats pour une charge de 20 %

Pour une charge de 20 %, l’amplitude fondamentale du courant sain est de 4,01128 A à 50 Hz. En régime défectueux, elle devient 4,63315 A. Le pic NRHA est observé à 49,9 Hz avec une amplitude de 0,700146 A. Malgré la diminution du niveau de charge, l’indicateur résiduel reste visible, ce qui confirme la capacité de la méthode à détecter le défaut même lorsque le courant absorbé est plus faible

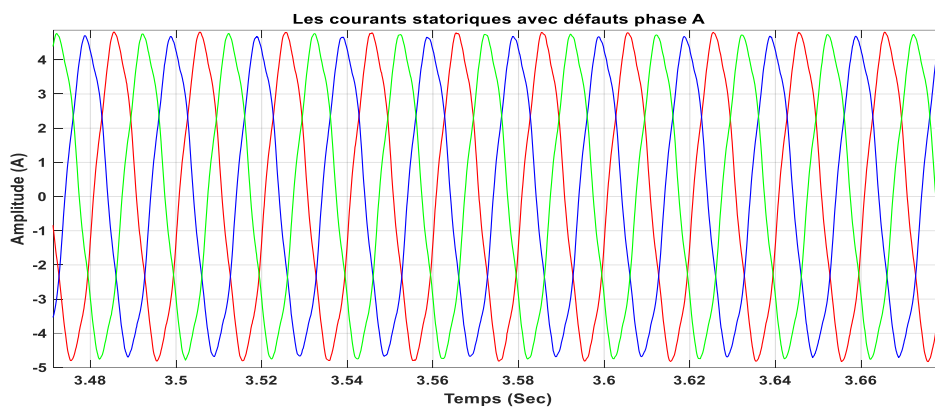


Figure III. 11 Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 20 % de charge

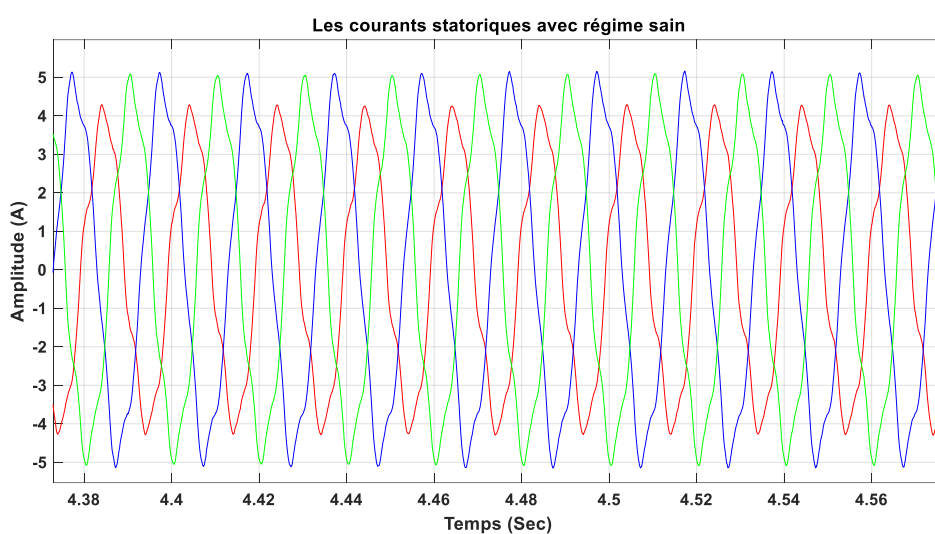


Figure III. 12 Courants statoriques triphasés en régime sain — 20 % de charge

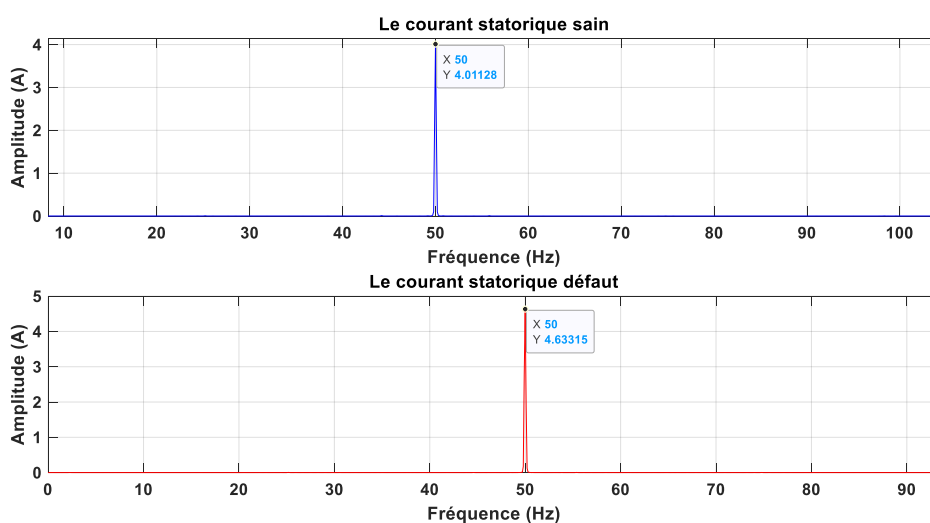


Figure III. 13 Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 20 % de charge

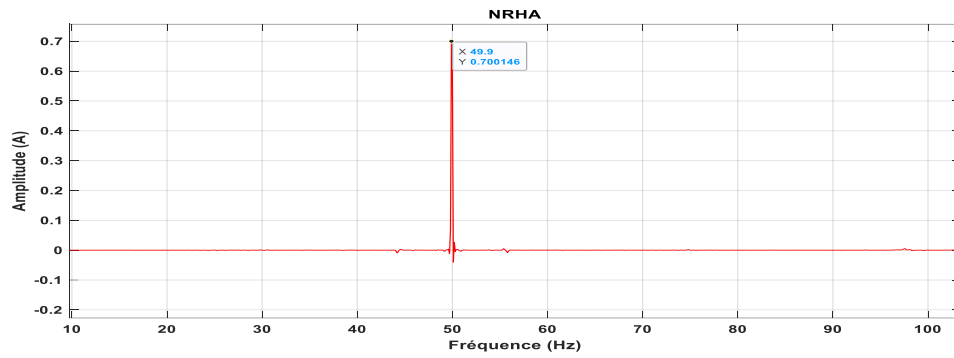


Figure III. 14 Analyse spectrale et NRHA pour une charge de 20 %.

Les formes temporelles montrent que le régime sain et le régime défectueux conservent une structure triphasée périodique. Cependant, la différence d'amplitude observée dans les spectres confirme que la signature du défaut est mieux exploitée dans le domaine fréquentiel.

III.8 Synthèse et discussion générale

Les valeurs extraites des résultats sont regroupées dans le tableau suivant afin de comparer l'effet du défaut pour les trois niveaux de charge étudiés.

Tableau III. 2 Synthèse des amplitudes spectrales et des pics NRHA obtenus

TH	Amplitude	Amplitude	Ecart (A)	Amplitude	Fréquence
Charge	Rotor sain (A)	Rotor avec défaut (A)		NRHA (A)	NRHA (Hz)
100 %	7,87945	8,61611	0,73666	0,736662	50 Hz
60 %	5,55636	6,42442	0,86806	0,971863	49,9 Hz
20 %	4,01128	4,63315	0,62187	0,700146	49,9 Hz

L'analyse du tableau montre que la composante fondamentale augmente dans tous les cas lorsque le défaut apparaît. L'écart entre le régime sain et le régime défectueux est de 0,73666 A pour la charge de 100 %, de 0,86806 A pour la charge de 60 % et de 0,62187 A pour la charge de 20 %. Cette évolution confirme que le défaut provoque une modification mesurable du courant statorique.

Le pic NRHA apparaît toujours dans la zone de la fréquence fondamentale, soit à 50 Hz ou à 49,9 Hz selon la résolution fréquentielle. Ce résultat est cohérent avec le principe de la méthode NRHA, qui vise à éviter la recherche de multiples fréquences caractéristiques dépendantes du glissement. Au lieu de cela, l'attention est concentrée sur une zone étroite autour de la fréquence d'alimentation.

La charge de 60 % donne le résidu le plus élevé, avec 0,971863 A. Ce comportement peut s'expliquer par une combinaison entre le niveau de courant, l'état électromagnétique de la machine et la sensibilité du spectre à ce point de fonctionnement. La charge de 20 % donne un résidu plus faible, mais encore nettement détectable. La charge de 100 % présente également un pic clair, ce qui montre que la méthode reste efficace en fonctionnement nominal.

Il est important de noter que l'amplitude du résidu ne doit pas être interprétée isolément sans tenir compte de la charge. Pour une application industrielle, il est préférable d'établir des seuils de décision adaptés à chaque point de fonctionnement. Ainsi, une base de données de référence peut être construite à partir du moteur sain pour plusieurs niveaux de charge, puis utilisée pour comparer les nouveaux spectres acquis en ligne.

D'un point de vue pratique, les résultats confirment trois avantages principaux. Premièrement, le courant statorique est une grandeur simple à mesurer. Deuxièmement, l'indicateur NRHA fait ressortir le défaut sous forme d'un pic facilement identifiable. Troisièmement, la zone fréquentielle utile est très réduite, ce qui diminue le temps de calcul et facilite l'implantation de l'algorithme dans un système de surveillance en temps réel.

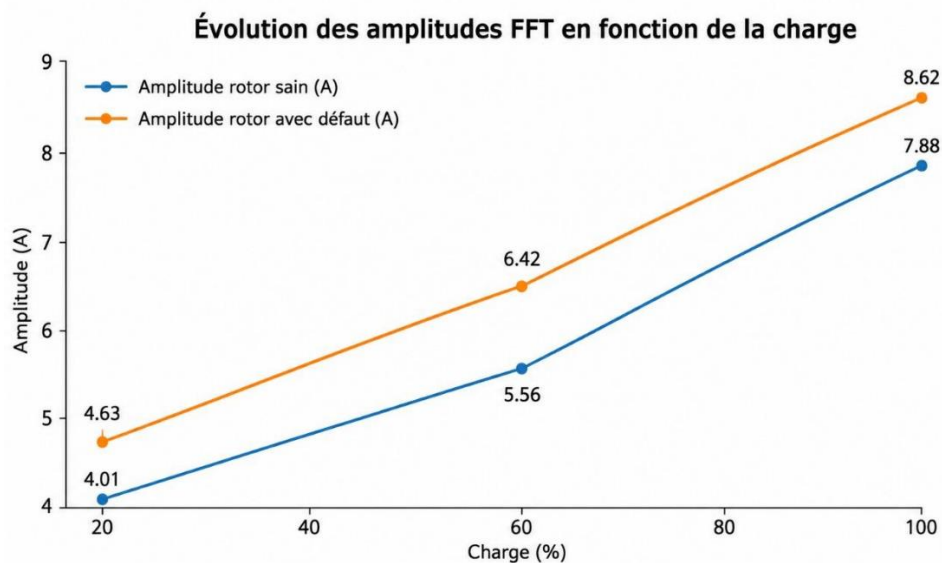


Figure III. 15 Comparaison de l'amplitude de FFT(état sain / état défaut) en fonction de la charge

Tableau III. 3 Résultats de la méthode FFT à différentes charges : 20 %, 60 % et 100 %.

Frequence(Hz)	Amplitude de la compasant de défaut (dB)	Harmonique de temps résiduel	Charge
49,9	3,74383	TH _R	100 %
50	2,0772	TH _R	60 %
50	2,08336	TH _R	20 %

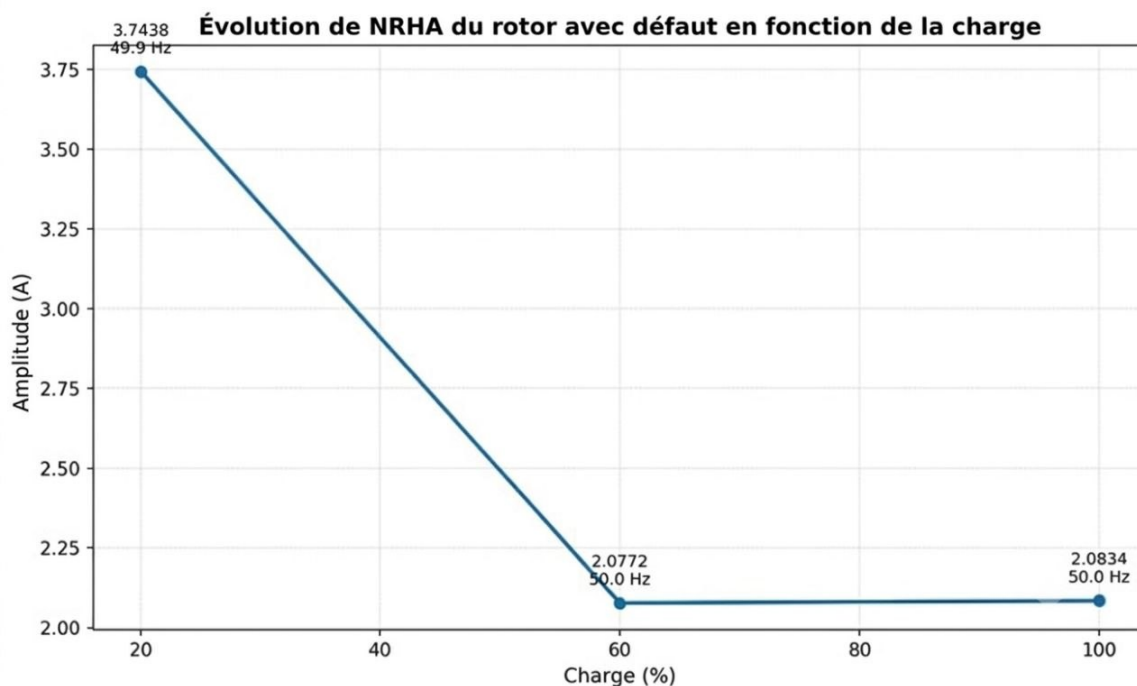


Figure III.16 Évolution de la amplitude NRHA en fonction de la charge (défaut rotor)

III.8.1 Discussion

L'ensemble des résultats obtenus démontre que l'harmonique de temps résiduelle (THR) constitue un indicateur de diagnostic particulièrement pertinent pour le défaut statorique. En effet, cet indicateur présente l'avantage d'être sensible, isolé, et surtout localisé à une fréquence fixe et invariante de 50 Hz, quel que soit le niveau de charge. Cette caractéristique représente l'apport majeur de la méthode NRHA par rapport aux approches classiques.

Grâce à cette propriété, il n'est plus nécessaire d'effectuer un large balayage spectral à la recherche de fréquences variables. Il suffit désormais de surveiller l'apparition d'une raie résiduelle dans une bande étroite, comprise entre 49,9 et 50 Hz.

La comparaison entre les trois niveaux de charge met également en évidence un atout décisif de la méthode : celle-ci reste pleinement opérationnelle dès 20 % de charge, contrairement à la

plupart des techniques traditionnelles qui perdent en sensibilité et peinent à distinguer le défaut du bruit de fond dans ces conditions. Ainsi, la méthode NRHA conserve son efficacité aussi bien à faible charge qu'en pleine charge, ce qui la distingue nettement des approches conventionnelles.

III.8.2 Point fort de notre méthode NRHA

Facilité d'application, elle ne nécessite qu'un capteur de courant. Une mémoire avec un traitement simple, et une comparaison du courant en calculant la différence. La facilité de contrôle et la détection précoce des pannes, basées sur le mécanisme industriel, constituent la base de toutes les méthodes. Son signal s'intensifie lors de l'augmentation de la charge ; à l'inverse, notre méthode permet la détection à faible charge ou en fonctionnement à vide.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode d'analyse harmonique résiduelle normalisée appliquée au diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones. La méthodologie a été reformulée à partir de l'article de référence, puis intégrée avec les résultats obtenus dans ce travail. Les figures expérimentales de référence ont permis de décrire les bancs d'essai et les dispositifs de mesure utilisés pour l'acquisition du courant statorique.

Les résultats obtenus pour les charges de 100 %, 60 % et 20 % montrent que le régime défectueux entraîne une augmentation de l'amplitude de la composante fondamentale du courant statorique et l'apparition d'un pic NRHA autour de 50 Hz. Cet indicateur reste visible pour les trois niveaux de charge, ce qui confirme la pertinence de la méthode pour la détection des défauts rotoriques à partir du courant statorique.

Cette méthode est simple à mettre en œuvre, nécessitant uniquement un capteur de courant, une mémoire et un traitement basé sur la comparaison des courants. Elle permet un contrôle facile et une détection précoce des pannes. Contrairement aux méthodes classiques dont l'efficacité augmente avec la charge, cette méthode reste performante même à faible charge ou à vide.

La discussion a également montré que la valeur du résidu dépend du point de fonctionnement. Par conséquent, l'utilisation industrielle de cette méthode doit être accompagnée d'une base de référence construite pour différentes charges. Cette approche permettra d'améliorer la fiabilité du diagnostic et d'ouvrir la voie à une surveillance automatique du moteur asynchrone.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le moteur asynchrone occupe une place fondamentale dans les systèmes industriels modernes en raison de sa robustesse, de sa simplicité de construction, de son coût réduit et de sa facilité d'exploitation. Malgré ces avantages, il reste exposé à plusieurs types de défauts pouvant affecter ses performances, sa fiabilité et sa durée de vie. Parmi ces défauts, les défauts rotoriques, tels que les cassures ou fissures de barres, les défauts d'anneaux de court-circuit et les dissymétries de la cage rotorique, représentent une catégorie importante en raison de leur évolution progressive et de leur influence directe sur l'équilibre électromagnétique de la machine.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au diagnostic des défauts rotoriques des moteurs asynchrones par des techniques avancées, en mettant particulièrement l'accent sur l'analyse du courant statorique. Ce choix se justifie par le caractère non invasif, économique et pratique de cette grandeur, qui est généralement disponible dans les systèmes de commande et de protection des entraînements électriques. L'analyse du courant permet, en effet, de suivre l'état de la machine sans ajouter de capteurs mécaniques complexes ni interrompre son fonctionnement.

Le premier chapitre a permis de présenter les notions générales relatives à la machine asynchrone. Nous avons rappelé sa constitution, notamment le stator, le rotor, l'entrefer et les organes mécaniques, ainsi que son principe de fonctionnement basé sur l'interaction entre le champ tournant statorique et les courants induits dans le rotor. Ce chapitre a également mis en évidence les principales familles de défauts pouvant affecter la machine, en particulier les défauts rotoriques, qui modifient la distribution du champ magnétique dans l'entrefer et provoquent l'apparition de composantes fréquentielles caractéristiques dans le courant statorique.

Le deuxième chapitre a été consacré aux méthodes avancées de diagnostic des moteurs à induction. L'étude a montré que la méthode classique d'analyse de la signature du courant moteur, connue sous le nom de MCSA, constitue une approche de référence pour la surveillance des machines électriques. Toutefois, cette méthode peut présenter certaines limites lorsque les signatures du défaut sont faibles, proches de la fréquence fondamentale ou masquées par le bruit et les harmoniques naturelles de la machine. Pour dépasser ces limites, plusieurs techniques avancées de traitement du signal ont été présentées, telles que l'analyse du courant statorique, la transformation de Park, la transformation de Hilbert et les approches combinées. Ces méthodes permettent d'améliorer la visibilité des composantes liées au défaut et d'augmenter la sensibilité du diagnostic.

Conclusion générale

Le troisième chapitre a porté sur la méthodologie expérimentale et la discussion des résultats obtenus à partir de la méthode NRHA, ou analyse harmonique résiduelle normalisée. Cette approche repose sur la comparaison entre le spectre normalisé du courant statorique d'un moteur sain et celui d'un moteur présentant un défaut rotorique. Le résidu obtenu permet de mettre en évidence les variations spectrales liées à la présence du défaut, notamment autour de la fréquence fondamentale d'alimentation. Cette méthode présente l'avantage de réduire la complexité de l'analyse fréquentielle en concentrant l'observation sur une bande de fréquence restreinte, tout en conservant une bonne sensibilité de détection.

Les résultats analysés pour différents niveaux de charge ont montré que la présence d'un défaut rotorique entraîne une variation significative de l'amplitude spectrale du courant statorique. La comparaison entre l'état sain et l'état défectueux a permis de faire apparaître un pic résiduel clair autour de la fréquence fondamentale. Ce pic constitue un indicateur pertinent de l'existence du défaut. Les observations effectuées à 100 %, 60 % et 20 % de charge confirment que la méthode NRHA peut détecter les défauts rotoriques même lorsque les conditions de fonctionnement de la machine varient. Ainsi, l'approche adoptée permet d'améliorer la fiabilité du diagnostic tout en simplifiant le processus d'identification des défauts.

D'une manière générale, cette étude confirme l'intérêt des techniques avancées de traitement du signal dans le diagnostic des moteurs asynchrones. Elle montre que l'exploitation du courant statorique, associée à une méthode de comparaison spectrale normalisée, peut constituer une solution efficace pour la surveillance des défauts rotoriques. L'approche étudiée offre une alternative intéressante aux méthodes classiques, car elle permet de détecter le défaut à partir d'un indicateur résiduel simple, clair et exploitable.

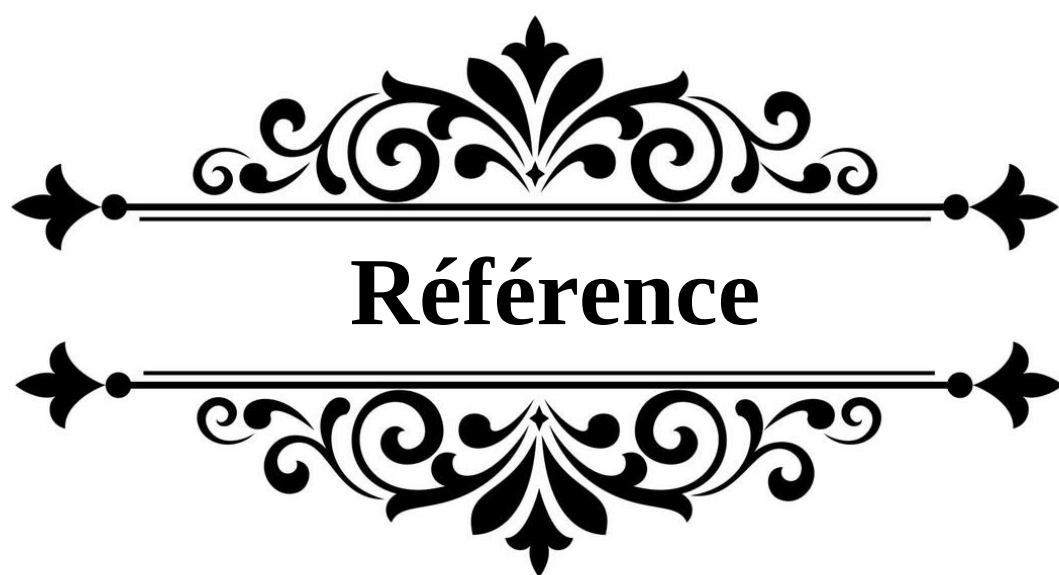
Néanmoins, certaines limites peuvent être soulignées. La performance du diagnostic dépend de la qualité de l'acquisition du courant, de la résolution fréquentielle de la FFT, du niveau de bruit et des conditions de fonctionnement de la machine. De plus, l'étude a été principalement orientée vers l'analyse des harmoniques de temps autour de la fréquence fondamentale. Il serait donc intéressant, dans des travaux futurs, d'élargir l'analyse à d'autres familles d'harmoniques, telles que les harmoniques d'encoches rotoriques, les harmoniques liées aux barres cassées et les harmoniques d'excentricité.

Comme perspectives, il serait également utile d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support ou les méthodes d'apprentissage profond, afin d'automatiser la classification des défauts et d'estimer

Conclusion générale

leur degré de sévérité. L'association entre les méthodes avancées de traitement du signal et les algorithmes intelligents pourrait améliorer davantage la précision, la rapidité et la robustesse du diagnostic, notamment dans les environnements industriels complexes où les conditions de charge et d'alimentation sont variables.

En conclusion, le diagnostic des défauts rotoriques des moteurs asynchrones demeure un domaine essentiel pour garantir la continuité de service, réduire les coûts de maintenance et améliorer la sûreté des systèmes industriels. Les résultats obtenus dans ce travail montrent que les techniques avancées basées sur l'analyse du courant statorique, et en particulier la méthode NRHA, constituent une approche prometteuse pour la détection fiable des défauts rotoriques. Cette contribution s'inscrit ainsi dans une démarche de maintenance prédictive visant à améliorer la disponibilité et la fiabilité des entraînements électriques industriels.



Référence

- [1] Didier G " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances " Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [2] Ondel O "Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [3] : Mabrouk Abd Elhamid « Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Variation De Charge » Thèse de doctorat, Doctorat en Science En Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra Soutenue publiquement le 25 / 05 /2017
- [4] : MOHAMED EL KAMEL OUMAAR« Surveillance et diagnostic des défauts rotorique et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine, Mars 2012
- [5] : HAKIMA CHERIF « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magistère, Université de Biskra, sep 2014.
- [6] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [7] B.Yacine ,B.Samir, "Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis" Thèse de master, Université Mohamed Boudiaf –M’sila , 2018.
- [8] H.MOUFIDA, «Modélisation Des Défaillances Et Leur Diagnostic Par La Méthode De Reconnaissance Des Formes Floue» Thèse De Magister », université Badji Mokhtar-Annaba, 2013.
- [9] KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D’El-oued soutenu en Mai 2017.
- [10] GHOGGAL ADEL « dignostic de la machine Asynchrone triphase :dédié à la détection des défauts »Thèse de Magister , Université de Batna , Soutenue 2005.
- [11] KHATIR ABDEL FATAH «Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts»Thèse de Magister , Université ferhat abbas –setif UFAS(Algérie) , Soutenue 11 / 04 / 2009.
- [12] G.DIDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de doctorat. Université Henri poincaré ,Nancy I,2004.

- [13] BENHAMED ABDELGHANI,BRIK ABDESSATTAR «Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multienroulements», Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued ,soutenu en Mai 2017.
- [14] E.SCHAEFFER «diagnostic des machines asynchrones :modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défaut » Thèse de doctorat. Université de Nates 1999.
- [15] MOHAMED EL KAMEL OUMAAMAR «surveillance et diagnostic des défaut rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée» Thèse de doctorat,Université de Lorraine, Soutenue publiquement le 19 Mars 2012 devant la commission d'examen.
- [16] TIDJANI ABD EL JAOUAD, AI AMOUDI BADREDDINE «Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique «optimisation d'essaim de particules»» Mémoire Master Académique université kasdi merbah ouargla Soutenu publiquement Le :02/06/2016.
- [17] BELHAMDI SAAD « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005.
- [18] BELHAMDI SAAD «Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande», Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue publiquement le 08/05/2014.
- [19] M. ETIENNE FOURNIER «protocole de diagnostic des entraînements asynchrones par références: application a la détection des déséquilibres mécaniques et des défauts de courroie», these doctorat de l'université de Toulouse jeudi 26 novembre 2015.
- [20] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat universite badji mokhtar annaba, Année : 2015/2016
- [21] T.ALIANE, «Introduction Au Diagnostic Des Défaillances», laboratoire A2SIESIEE-Paris, 2006.
- [22] : RIDHA ZAITER « Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut », Mémoire de Magister, Université de Biskra juin 2013.

- [23] W. T. Thomson and M. Fenger, « Current signature analysis to detect induction motor faults », IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, n° 4, pp. 26–34, 2001.
- [24] A. Allal, B. Chetate and D. Benattous, « A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads », Frontiers in Energy, vol. 10, n° 2, pp. 176–191, 2016.
- [25] S. Nandi, H. A. Toliyat and X. Li, « Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors — A review », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, n° 4, pp. 719–729, 2005.
- [26] A. Allal and B. Chetate, « High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's Vector Product », Journal of Fundamental and Applied Sciences, vol. 11, n° 1, pp. 173–196, 2019.
- [27] A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz and D. S. B. Fonseca, « Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, n° 3, pp. 595–598, 1999.
- [28] M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. Guedidi and S. E. Zouzou, « Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method », International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 5, n° 3, pp. 337–351, 2014.
- [29] A. Allal and A. Khechekhouche, « Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method », International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 141, art. 108219, 2022.
- [50] SAHRAOUI Mohamed, « Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de Doctorat en Sciences en Électrotechnique, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, Année universitaire 2009/2010.

نسمح للأستاذ المشرف علال عبد الرحيم باستعمال نتائج الدراسة