



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 :

BEN AMARA AHMED AMARA

ATALLAH AHMED

Intitulé :

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

Soutenue le : 14 / 06 / 2026

Devant le jury composé de :

Dr : Zellouma Liad

Président

Dr : Serhoud Hicham

Examineur

Dr : Allal Abderrahim

Encadreur

Année académique : 2025/2026

Résumé

Ce travail porte sur le diagnostic des défauts statoriques des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil par l'analyse spectrale du courant statorique. Plusieurs méthodes avancées ont été étudiées et comparées, telles que la MCSA, la MSCSA, la PVSM, la PVPA et d'autres encore. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la méthode NRHA (Normalized Residual Harmonic Analysis), qui repose sur la comparaison entre le spectre du courant en régime sain et celui en régime défaillant pour en extraire un résidu normalisé servant d'indicateur de diagnostic. Cette méthode a été validée expérimentalement pour différents niveaux de charge, et les résultats montrent sa capacité à détecter le défaut de court-circuit entre spires à une fréquence fixe de 50 Hz, indépendamment du point de fonctionnement.

Mots-clés : *Machine asynchrone, diagnostic, court-circuit entre spires, NRHA, analyse spectrale.*

Abstract

This work addresses the diagnosis of stator faults in three-phase squirrel-cage induction motors through spectral analysis of the stator current. Several advanced methods have been studied and compared, such as MCSA, MSCSA, PVSM, PVPA, and others. In this work, we focus on the NRHA method (Normalized Residual Harmonic Analysis), which relies on comparing the current spectrum in healthy and faulty conditions to extract a normalized residual used as a diagnostic indicator. This method was experimentally validated under different load levels, and the results demonstrate its ability to detect inter-turn short-circuit faults at a fixed frequency of 50 Hz, regardless of the operating point.

Keywords: *Induction motor, fault diagnosis, inter-turn short-circuit, NRHA, spectral analysis.*

المخلص

يتناول هذا العمل تشخيص الأعطال الستاتورية في المحركات غير المتزامنة ثلاثية الأوجه ذات القفص السنجابي، وذلك عبر التحليل الطيفي لتيار الستاتور. تمت دراسة العديد من الطرق المتقدمة ومقارنتها كطريقة MCSA, MSCSA PVSM, PVPA, وغيرها. في هذا العمل، نركز على طريقة NRHA تحليل التوافقيات المتبقية المعيارية التي تعتمد على مقارنة طيف التيار في الحالة السليمة مع الحالة المعطوبة لاستخلاص متبقي معياري يُستخدم كمؤشر للتشخيص. تم التحقق من هذه الطريقة تجريبياً عند مستويات تحميل مختلفة، وأظهرت النتائج قدرتها على كشف عطل دائرة القصر بين اللفات عند تردد ثابت يساوي 50 Hz، بصرف النظر عن نقطة الاشتغال.

الكلمات المفتاحية: محرك غير متزامن، تشخيص، دائرة قصر بين اللفات، NRHA، تحليل طيفي.

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Symbole / Abréviation	Désignation
f_s	Fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [Hz]
f_r	Fréquence de rotation mécanique du rotor [Hz]
p	Nombre de paires de pôles
g	Glissement du moteur asynchrone
Ω_s	Vitesse de synchronisme [tr/min]
Ω	Vitesse de rotation du rotor [tr/min]
ω_s	Pulsation du réseau d'alimentation [rad/s]
N_r	Nombre d'encoches rotoriques (barres de la cage)
n_b	Nombre d'éléments roulants du roulement
β	Angle de contact des billes avec les bagues du roulement
BD	Diamètre d'un élément roulant
PD	Distance entre les centres des billes diamétralement opposées
f_{rot}	Fréquence de rotation du rotor
f_{cc}	Fréquence caractéristique du défaut de court-circuit entre spires [Hz]
h	Ordre de l'harmonique de temps ($h = 1, 3, 5, \dots$)
k	Entier positif ($k = 1, 2, 3, \dots$)
$\hat{I}_F$	Courant de phase maximal de la composante fondamentale [A]
i_{sa}	Courant statorique de la phase a [A]
i_{sd}	Composante directe du vecteur de Park [A]
i_{sq}	Composante en quadrature du vecteur de Park [A]
i_{dP-H}	Composante directe du vecteur de Park–Hilbert [A]
i_{qP-H}	Composante en quadrature du vecteur de Park–Hilbert [A]
$A(f)$	Amplitude du spectre FFT du courant statorique [A]
$A(f)_N$	Amplitude normalisée du spectre FFT
$A(f)_R$	Amplitude résiduelle normalisée (indice NRHA)
S_r	Sensibilité relative d'un harmonique de temps
TH	Harmonique de temps (Time Harmonic)
TH_R	Harmonique de temps résiduelle — indice de diagnostic NRHA
RSH	Harmoniques d'encoches rotoriques (Rotor Slot Harmonics)
RBFH	Harmoniques de barres cassées (Rotor Bar Fault Harmonics)
EFH	Harmoniques d'excentricité (Eccentricity Fault Harmonics)
GRI	Indice de sensibilité globale (Global Relative Index)
PRI	Indice de sensibilité partielle (Partial Relative Index)
MAS	Machine asynchrone
FFT	Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform)

Symbole / Abréviation	Désignation
FMM	Force magnétomotrice
MCSA	Analyse de la signature du courant moteur (Motor Current Signature Analysis)
MSCSA	Analyse de la signature du carré du courant moteur (Motor Square Current Signature Analysis)
PVSM	Module au carré du vecteur de Park (Park's Vector Square Modulus)
PVPA	Produit des composantes du vecteur de Park (Park's Vector Product Approach)
PVSM_{PH}	Module au carré du vecteur de Park–Hilbert
HPVPA	Produit vectoriel de Park–Hilbert (Hilbert–Park's Vector Product Approach)
NRHA	Analyse des harmoniques résiduelles normalisées (Normalized Residual Harmonic Analysis)
EPVA	Vecteur de Park étendu (Extended Park's Vector Approach)
DWT	Transformée en ondelettes discrète (Discrete Wavelet Transform)
ANN	Réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks)

TABLE DES MATIÈRES

Titre	Page
Résumé / Abstract / ملخص	i
Liste des Symboles et Abréviations	ii
Table des Matières	iv
Liste des Figures	vii
Liste des Tableaux	ix
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur le diagnostic des moteurs à induction	3
I.1 Introduction	4
I.2 Machine asynchrone (MAS)	4
I.2.1 Éléments de constitution de la machine asynchrone	4
I.2.2 Principe de fonctionnement	7
I.3 Défauts des machines électriques	8
I.4 Causes des défauts	9
I.4.1 Défauts statoriques	9
I.4.2 Défauts rotoriques	10
I.5 Différents défauts dans les machines électriques	11
I.5.1 Défauts statoriques	11
I.5.2 Défauts rotoriques	12
I.6 Diagnostic des machines électriques	14
I.6.1 Conséquences des défauts	14
I.6.2 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques	15
I.6.3 Organisation générale de la procédure de diagnostic	15
I.7 Différentes méthodes de diagnostic	16
I.7.1 Méthodes internes	16
I.7.2 Méthodes externes	17
I.7.3 Méthodes inductives	18
I.7.4 Méthodes déductives	18
I.8 Méthodes de détection des défauts dans les MAS à cage	18
I.8.1 Approche Signal	19
I.8.2 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques	19
I.8.3 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite	19
I.8.4 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	19
I.8.5 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique	19
I.8.6 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée	19

Titre	Page
I.8.7 Diagnostic par l'analyse du courant statorique	20
I.8.8 Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park	20
I.9 Conclusion	20
CHAPITRE II : Méthodes avancées de diagnostic des moteurs à induction	21
II.1 Introduction	22
II.2 Généralités sur les défauts du moteur à induction	24
II.2.1 Le court-circuit entre spires du stator	25
II.2.2 Les autres défauts et leur signature	25
II.2.3 Les approches de surveillance par le courant	25
II.3 Harmoniques caractéristiques du courant statorique	26
II.4 Outils mathématiques communs	28
II.4.1 La transformée de Park	28
II.4.2 La transformée de Hilbert et l'amplitude instantanée	29
II.5 Les six approches de diagnostic	30
II.5.1 MCSA — analyse directe du courant	30
II.5.2 MSCSA — analyse du carré du courant	31
II.5.3 PVSM — module au carré du vecteur de Park	31
II.5.4 PVPA — produit des composantes de Park	32
II.5.5 PVSMP-H — module au carré de Park–Hilbert	32
II.5.6 HPVPA — produit vectoriel de Park–Hilbert	32
II.6 Synthèse comparative des approches	34
II.7 Étude expérimentale comparative	35
II.7.1 Banc d'essai et protocole	35
II.7.2 Indices de sensibilité partielle et globale (PRI / GRI)	36
II.7.3 Résultats et discussion	36
II.8 Vers une nouvelle approche : la méthode NRHA	38
II.9 Conclusion	39
CHAPITRE III : Diagnostic par la méthode NRHA	40
III.1 Introduction	41
III.2 Méthode et formulation théorique	42
III.2.1 Harmoniques du courant statorique de la machine asynchrone	42
III.2.2 Étude du courant statorique et de ses harmoniques	43
III.2.3 Principe de la méthode NRHA	44
III.2.4 Schéma synoptique et organigramme	44
III.3 Résultats expérimentaux et discussion	46
III.3.1 Description du banc d'essai	46

Titre	Page
III.3.2 Résultats sous 20 % de la charge nominale	48
III.3.3 Résultats sous 60 % de la charge nominale	50
III.3.4 Résultats sous 100 % de la charge nominale	52
III.3.5 Synthèse quantitative des résultats	54
III.3.6 Discussion	57
III.4 Points forts de la méthode NRHA	57
III.5 Conclusion	57
Conclusion Générale	59
Références Bibliographiques	61

LISTE DES FIGURES

N°	Intitulé de la figure	Page
Figure I.1	Éléments de constitution d'une machine électrique	5
Figure I.2	Stator d'une machine électrique	5
Figure I.3	Rotor d'une machine électrique	6
Figure I.4	Principe de fonctionnement d'une machine électrique	8
Figure I.6	La répartition des pannes	10
Figure I.7	Représentation des différents défauts statoriques possibles	11
Figure I.8	Représentation du défaut rupture de barre et d'anneau	12
Figure I.9	Défauts d'excentricité	13
Figure I.10	Roulement à bille	14
Figure I.11	Différentes phases de diagnostic	16
Figure II.1	Schéma synoptique des six approches de diagnostic à partir du courant statorique	24
Figure II.2	Répartition statistique typique des défauts d'un moteur à induction	24
Figure II.3	Représentation schématique du spectre du courant et localisation des quatre familles d'harmoniques	26
Figure II.4	Lieu du vecteur de Park : cercle (machine saine) et ellipse (machine défaillante)	29
Figure II.5	Extraction de l'enveloppe (amplitude instantanée) du courant par la transformée de Hilbert	30
Figure II.6	Chaîne de traitement de l'approche HPVPA, du courant mesuré à la signature spectrale	33
Figure II.7	Comparaison schématique des spectres obtenus par MCSA, PVSM et HPVPA pour un même défaut	34
Figure II.8	Évolution de l'indice GRI de la HPVPA selon la charge et le nombre de spires en défaut	37
Figure II.9	Classement des six approches selon l'indice GRI (défaut de 10 spires, faible charge)	38
Figure III.1	Diagramme bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA	45
Figure III.2	Organigramme des différentes étapes de détection des défauts par la méthode NRHA	46
Figure III.3	Moteur 3kW rebobiné spécialement pour faire les essais de court-circuit entre Spires	47
Figure III.4	Courants statoriques triphasés en régime sain — 20 % de charge	48
Figure III.5	Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 20 % de charge	48
Figure III.6	Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 20 % de charge	49
Figure III.7	Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 20 % de charge (défaut stator)	50
Figure III.8	Courants statoriques triphasés en régime sain — 60 % de charge	50
Figure III.9	Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 60 % de charge	51

N°	Intitulé de la figure	Page
Figure III.10	Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 60 % de charge	51
Figure III.11	Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 60 % de charge (défaut stator)	52
Figure III.12	Courants statoriques triphasés en régime sain — 100 % de charge	52
Figure III.13	Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 100 % de charge	53
Figure III.14	Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 100 % de charge	53
Figure III.15	Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 100 % de charge (défaut stator)	54
Figure III.16	Comparaison de l'amplitude FFT (état sain / état défaut) en fonction de la charge	55
Figure III.17	Évolution de l'amplitude NRHA en fonction de la charge (défaut stator)	56

LISTE DES TABLEAUX

N°	Intitulé du tableau	Page
Tableau I.1	Les défauts des machines électriques	9
Tableau II.1	Les quatre familles d'harmoniques exploitées pour le diagnostic	27
Tableau II.2	Synthèse des six approches, classées par sensibilité décroissante au court-circuit entre spires	35
Tableau II.3	Indices GRI des six approches (défaut de 10 spires, faible charge)	37
Tableau III.1	<i>Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé dans l'expérimentation</i>	47
Tableau III.2	Amplitude de l'harmonique de temps (TH) du courant statorique — états sain et défaillant — en fonction de la charge	54
Tableau III.3	Sensibilité de la méthode NRHA (harmonique de temps résiduelle THR) pour le défaut statorique en fonction de la charge	56

Introduction Générale

La machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil occupe une place prépondérante dans l'industrie moderne. Robuste, économique et facile à mettre en œuvre, elle équipe une grande majorité des entraînements électriques dans des secteurs aussi variés que la pétrochimie, la sidérurgie, le traitement des eaux ou encore le transport. Son omniprésence en fait un maillon critique des chaînes de production : toute défaillance non anticipée se traduit inévitablement par des arrêts non programmés, des pertes de production et des coûts de maintenance élevés, sans oublier les risques pour la sécurité du personnel et la sûreté des installations.

Malgré sa grande robustesse, la machine asynchrone reste soumise à diverses contraintes d'ordre électrique, mécanique, thermique et environnemental qui, cumulées dans le temps, conduisent à l'apparition de défauts. Parmi ceux-ci, les défauts statoriques — et plus particulièrement le court-circuit entre spires du bobinage statorique — constituent l'une des formes de dégradation les plus redoutées. Ce type de défaut évolue de manière insidieuse : il débute par une détérioration locale et silencieuse de l'isolation, n'affectant dans un premier temps qu'un nombre restreint de spires, avant de dégénérer rapidement en un défaut franc susceptible de détruire la machine entière. La fenêtre temporelle pendant laquelle une intervention corrective est encore possible est donc particulièrement étroite, ce qui confère à la détection précoce de ce défaut une importance capitale.

Face à ces enjeux, la communauté scientifique s'est attachée, depuis plusieurs décennies, à développer des techniques de diagnostic non invasives, capables de surveiller l'état de santé de la machine en service et sans interruption de la production. Parmi les grandeurs exploitables, le courant statorique s'est imposé comme le signal de prédilection : il est accessible sans capteur additionnel, riche en informations sur l'état interne de la machine, et se prête naturellement à une surveillance continue. Cette approche, connue sous le nom de Motor Current Signature Analysis (MCSA), a donné naissance à une famille de méthodes avancées — MSCSA, PVSM, PVPA, PVSMP-H, HPVPA, entre autres — qui cherchent toutes à amplifier, par des prétraitements mathématiques appropriés, les signatures spectrales caractéristiques des défauts afin d'en améliorer la détectabilité, notamment en conditions de faible charge où les méthodes classiques montrent leurs limites.

Toutefois, l'un des verrous récurrents des méthodes basées sur l'analyse spectrale classique réside dans la variabilité de la fréquence caractéristique du défaut, qui dépend du glissement et donc du point de fonctionnement de la machine. Cette dépendance complique l'automatisation du diagnostic et impose, à chaque essai, un balayage spectral étendu. Pour lever cet obstacle, ce travail s'intéresse à la méthode d'Analyse des Harmoniques Résiduelles Normalisées du courant moteur (NRHA — Normalized Residual Harmonic Analysis). Cette approche originale repose sur la comparaison entre le spectre linéaire normalisé du courant en régime sain, stocké en mémoire comme référence, et celui acquis en temps réel lors du fonctionnement. Le résidu ainsi calculé constitue un indicateur de diagnostic à fréquence fixe de 50 Hz, identique quel que soit le type ou la sévérité du défaut, ce qui simplifie considérablement la procédure de détection et ouvre la voie à une mise en œuvre embarquée à faible coût de calcul.

L'objectif principal de ce travail est donc double : d'une part, présenter et comparer de manière rigoureuse les principales méthodes avancées de diagnostic par le courant statorique, en évaluant leur sensibilité respective au court-circuit entre spires à l'aide d'un indice de sensibilité globale (GRI) ; d'autre part, appliquer et valider expérimentalement la méthode NRHA sur un moteur asynchrone de 3 kW présentant un défaut statorique réel, pour trois niveaux de charge différents, afin de démontrer sa robustesse et son aptitude à la détection précoce.

Pour atteindre ces objectifs, le présent mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre dresse un état de l'art sur les machines asynchrones et leurs défauts : constitution, principe de fonctionnement, classification et causes des défaillances, ainsi qu'une présentation des principales techniques de diagnostic existantes. Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes avancées de diagnostic par le courant statorique ; après avoir rappelé les fondements théoriques communs, les six approches — MCSA, MSCSA, PVSM, PVPA, PVSMP-H et HPVPA — sont présentées, analysées et comparées expérimentalement à l'aide de l'indice GRI. Le troisième chapitre est dédié à la méthode NRHA : son principe est détaillé, sa mise en œuvre décrite, puis ses performances sont évaluées expérimentalement sur le défaut de court-circuit entre spires pour différents régimes de charge. Le mémoire se clôt par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus et proposant des perspectives pour de futurs travaux.

CHAPITER I : GÉNÉRALITÉ SUR LA DIAGONASTOC DES MOTEURS A INDUCTION

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude consacrée aux machines électriques en mettant l'accent sur la répartition des différentes défaillances pouvant affecter leurs principaux éléments. Nous abordons ensuite les divers types de défauts susceptibles d'apparaître dans chacun de ces composants, tout en précisant leurs causes ainsi que leurs impacts sur le fonctionnement et les performances de la machine. Enfin, nous rappelons brièvement les principales techniques de base couramment utilisées pour la détection et le diagnostic des différents défauts.

I.2 Machine asynchrone (MAS)

La machine asynchrone (MAS) est l'une des machines électriques les plus utilisées dans le domaine industriel. Cet engouement s'explique par plusieurs avantages importants, notamment sa puissance massique élevée, sa robustesse, sa simplicité de mise en œuvre ainsi que son coût relativement faible. Par ailleurs, le développement des convertisseurs de fréquence, permettant de faire varier la vitesse de rotation sur une large plage, a largement contribué à l'extension de son utilisation. En effet, la machine asynchrone est intégrée dans de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques, tels que la traction électrique, les laminoirs, les systèmes de levage ou encore les installations de pompage [2].

Malgré sa grande robustesse, la machine asynchrone peut, comme toute autre machine électrique, être sujette à différents types de défaillances, qu'elles soient d'origine électrique ou mécanique. Étant donné les conséquences parfois importantes et coûteuses que peut entraîner l'apparition d'un défaut dans les systèmes industriels, le diagnostic des défauts a suscité un intérêt croissant au cours des deux dernières décennies [2].

I.2.1 Éléments de constitution de la machine asynchrone

La connaissance des différents éléments constituant la machine asynchrone est essentielle pour comprendre la manière dont ce système est réalisé sur le plan physique. Du point de vue mécanique, les machines asynchrones triphasées sont généralement composées de trois parties principales :

- Le stator : partie fixe de la machine dans laquelle est appliquée l'alimentation électrique.

- Le rotor : partie mobile ou tournante de la machine, responsable de la mise en rotation de la charge mécanique.
- Les paliers : éléments mécaniques qui assurent le support et la rotation de l'arbre du moteur [3].



Figure I.1: Eléments de constitution d'une machines électriques [3].

i. Stator

Le stator d'une machine asynchrone est constitué d'un empilement de tôles en acier dans lesquelles sont logés les enroulements statoriques. Pour les machines de faible puissance, ces tôles sont généralement découpées en une seule pièce, tandis que pour les machines de puissance plus élevée, elles sont fabriquées sous forme de sections distinctes. Afin de réduire les pertes dues aux courants de Foucault, ces tôles sont habituellement isolées par un revêtement de vernis. Elles sont ensuite assemblées entre elles, par boulonnage ou par soudure, afin de former le circuit magnétique du stator [4].

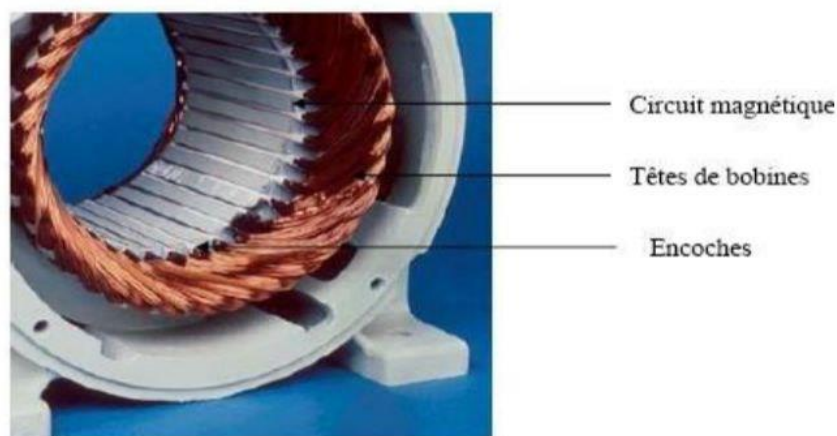


Figure I.2 : Stator d'une machines électrique [4].

ii. Rotor

Le circuit rotorique est constitué de barres conductrices disposées régulièrement et reliées entre elles par deux anneaux métalliques situés aux extrémités, formant ainsi une structure appelée cage d'écureuil.

Cette cage est intégrée à l'intérieur d'un circuit magnétique similaire à celui utilisé dans les machines à rotor bobiné. Les conducteurs du rotor sont généralement réalisés soit par coulée d'un alliage d'aluminium, soit à l'aide de barres massives en cuivre préformées et insérées dans les encoches des tôles du rotor. La figure (1.3) présente un exemple de rotor à cage. Le moteur à cage d'écureuil se distingue par une conception plus simple que celle du moteur à rotor bobiné. Par conséquent, son coût de fabrication est plus faible et sa robustesse est naturellement plus élevée. Pour ces raisons, il représente aujourd'hui la grande majorité des moteurs asynchrones utilisés dans les applications industrielles [5].

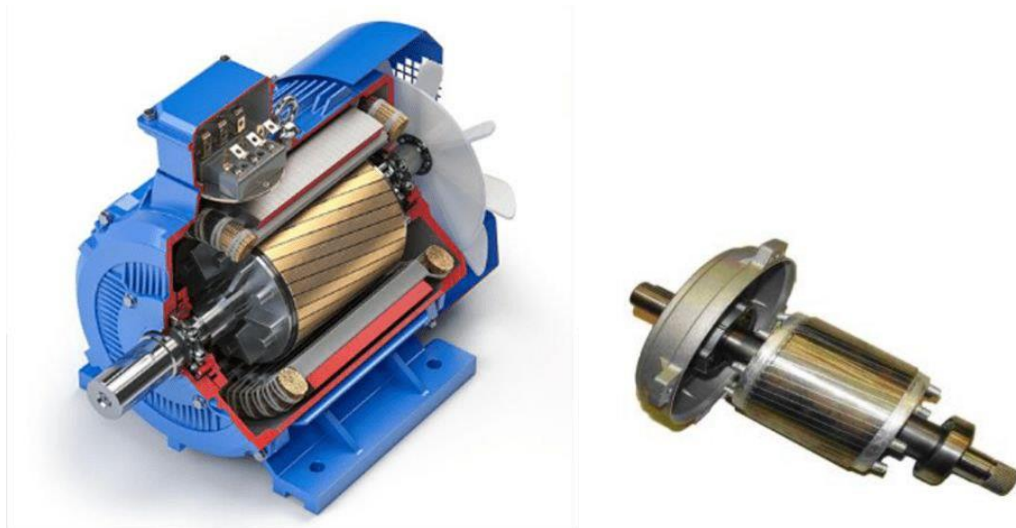


Figure 1.3: Rotor d'une machines électriques [5].

iii. Organes mécaniques

La carcasse constitue le support principal de la machine. Elle joue le rôle d'enveloppe de protection et assure la protection des différents composants contre les influences de l'environnement extérieur.

L'arbre, quant à lui, est un élément essentiel de transmission mécanique. Il comporte une partie centrale servant de support au rotor ainsi qu'une extrémité sur laquelle est généralement fixé un demi-accouplement permettant la liaison avec la charge mécanique. L'arbre est le plus souvent fabriqué en acier moulé ou forgé afin de garantir une bonne résistance mécanique. Son dimensionnement est déterminé en fonction des différentes contraintes mécaniques auxquelles

il est soumis, notamment les efforts de flexion (dus aux forces centrifuges et à l'attraction magnétique radiale), les efforts radiaux et tangentiels, ainsi que les efforts de torsion liés au couple électromagnétique transmis aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire [6].

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique entre le champ magnétique tournant, créé par un courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω_s dans les enroulements statoriques, et les courants induits dans les conducteurs du rotor lorsque ces derniers sont traversés par le champ magnétique tournant, conformément à la loi de Lenz. Cette interaction électromagnétique entre le stator et le rotor n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant est différente de celle du rotor [7].

Dans la machine asynchrone (MAS), l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer avec une vitesse appelée vitesse de synchronisme Ω_s . Cette vitesse est liée à la fréquence d'alimentation f_s et s'exprime par la relation suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 \cdot \frac{f_s}{p} \text{ (tr/min)} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

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

P : nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, soumis à ce champ tournant, est parcouru par des courants induits (courants de Foucault). Ces courants, placés dans le champ magnétique, sont soumis aux forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces engendre un couple moteur qui met le rotor en rotation (voir figure 1.4). Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, mais avec une vitesse légèrement inférieure à celle-ci ($\Omega < \Omega_s$) [7].

Par conséquent, il existe toujours une différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor. Cette différence est appelée glissement g , qui constitue une caractéristique fondamentale de la machine asynchrone. Le glissement représente l'écart relatif entre la vitesse de synchronisme Ω_s et la vitesse de rotation du rotor Ω . Il est défini par la relation suivante :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{I-2})$$

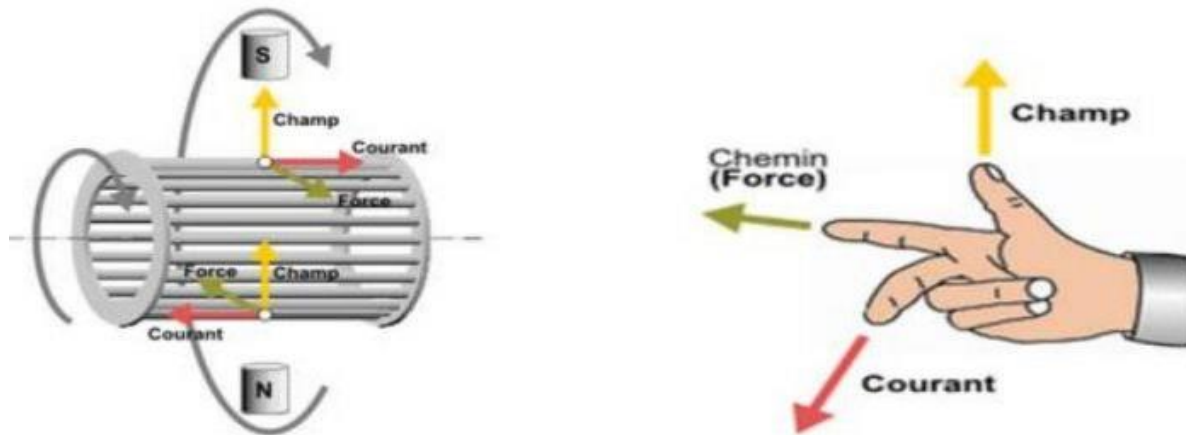


Figure. I.4 : Principe de fonctionnement d'un machines électriques [7].

I.3 Défaits des machines électriques

De manière générale, les différents défauts pouvant apparaître dans les machines électriques peuvent avoir plusieurs origines, notamment liées à la conception, aux tolérances de fabrication, aux conditions d'assemblage et d'installation, ainsi qu'à la nature de la charge et au programme de maintenance appliqué [9].

Les défauts des machines électriques peuvent être classés, selon leur origine, en deux grandes catégories :

- Défauts internes : et les défauts externes. Défauts internes : Ces défauts sont liés directement aux composants internes de la machine tels que les enroulements du stator et du rotor, le circuit magnétique, la cage rotorique ou encore l'entrefer mécanique [10].
- Défauts externes : Ces défauts sont généralement provoqués par des facteurs extérieurs à la machine, tels que le type d'alimentation électrique, la charge mécanique appliquée ou encore les conditions environnementales dans lesquelles la machine fonctionne. Ainsi, les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines électriques peuvent être classés selon leur origine comme illustré dans la classification suivante [11].

Defaults	Interne	MECANIQUE	Contact entre stator et rotor
			Défaut de roulements
			excentricité
			Mouvement de l'enroulement et des tôles
		ELECTRIQUE	Défaillances au niveau de l'isolation
			Rupture des barres
	Externe	MECANIQUE	Défaillances au niveau de circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		ENVIRONNEMENTALE	Défaut de montage
			Humidité
			température
		ELECTRIQUE	Propriété
			Fluctuation de la tension
			Sources de tension déséquilibre
			Réseau bruite

Tableau I.1: Les défauts des machines électriques [8].

I.4 Causes des défauts

Les défauts pouvant apparaître au niveau du stator et du rotor des machines asynchrones ont des origines diverses [12]. Parmi les causes les plus fréquentes, on peut citer celles présentées ci-dessous.

I.4.1 Défauts statoriques [13]

Les principaux défauts pouvant affecter le stator sont les suivants :

- Court-circuit entre spires : peut-être provoqué par des surtensions, une température excessive, des vibrations ou encore la présence d'humidité.
- Court-circuit entre phases : généralement dû à une température élevée, un déséquilibre de l'alimentation ou un défaut d'installation.
- Défaut d'isolation : peut résulter de démarrages fréquents, de décharges partielles ou encore de conditions environnementales sévères telles que des températures ou une humidité extrême.
- Défaut entre le stator et la carcasse : peut-être causé par des cycles thermiques, l'abrasion de l'isolant, l'encrassement des spires par la carcasse, la présence d'arêtes anguleuses dans les encoches ou encore par des chocs mécaniques.
- Déplacement des conducteurs : souvent lié aux démarrages fréquents ou aux vibrations des têtes de bobines.
- Défaillance des connecteurs : généralement due à des vibrations excessives.

- Vibration de la carcasse : peut-être provoquée par une mauvaise installation, un déséquilibre magnétique, un déséquilibre de l'alimentation, une surcharge, un mouvement des enroulements ou encore un contact avec le rotor.

I.4.2 Défauts rotoriques [13]

Les défauts les plus courants au niveau du rotor sont :

- **Défaut de roulements** : peut-être dû à une mauvaise installation, un déséquilibre magnétique, une température élevée, une perte de lubrification, une charge déséquilibrée ou la corrosion.
- **Rupture de barres** : généralement causée par des cycles thermiques, des régimes transitoires prolongés ou un déséquilibre magnétique.
- **Rupture d'une portion d'anneau** : souvent liée aux cycles thermiques.
- **Excentricité** : peut résulter d'une mauvaise installation, d'un déséquilibre magnétique ou de défauts au niveau des roulements.
- **Désalignement des roulements** : peut-être causé par un défaut de couplage, une mauvaise installation ou une surcharge.
- **Défaut du circuit magnétique** : généralement dû à un défaut de fabrication, une surcharge ou des cycles thermiques répétés.
- **Déséquilibre mécanique** : souvent provoqué par un mauvais alignement ou le mouvement des anneaux de court-circuit.

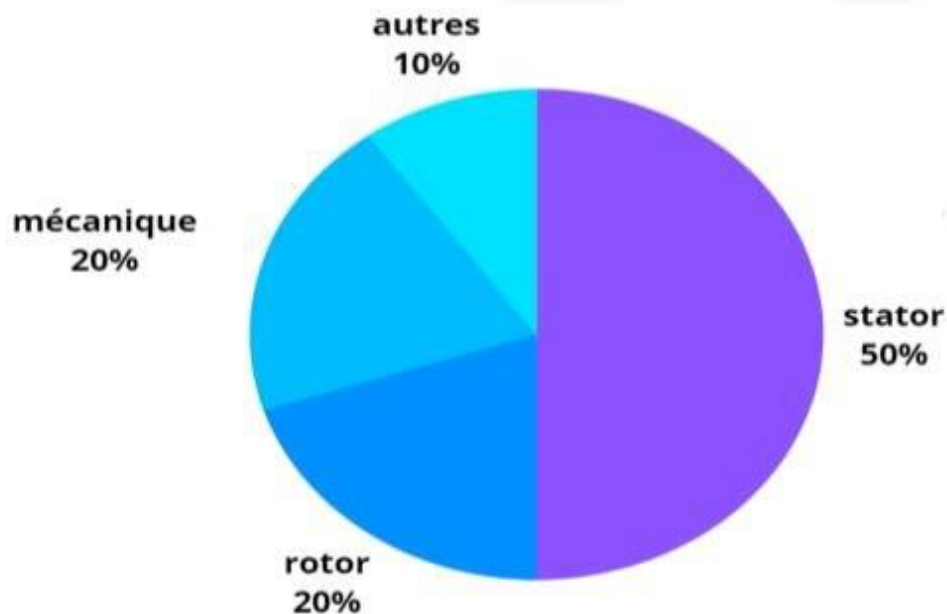


Figure I.6 : La répartition des pannes.

I.5 Différents défauts dans les machines électriques

I.5.1 Défauts statoriques

L'apparition de défauts au niveau des circuits électriques statoriques d'une machine asynchrone peut avoir plusieurs origines. Parmi les défauts les plus courants figurent les courts-circuits entre spires, qui se produisent généralement à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut est souvent causé par la dégradation de l'isolation des conducteurs du bobinage statorique.

On peut également rencontrer d'autres types de courts-circuits, tels que les courts-circuits entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine, ou encore entre deux phases statoriques. Le court-circuit entre spires est considéré comme l'un des défauts les plus fréquents affectant le stator. La fréquence caractéristique associée à ce type de défaut est donnée par l'expression suivante [14]

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \mp k \right\} \quad (I - 3)$$

f_s : fréquence de l'alimentation

P : nombre de paires de pôles

g : glissement

$n = 1, 2, 3, \dots$ et $k = 1, 3, 5, \dots$

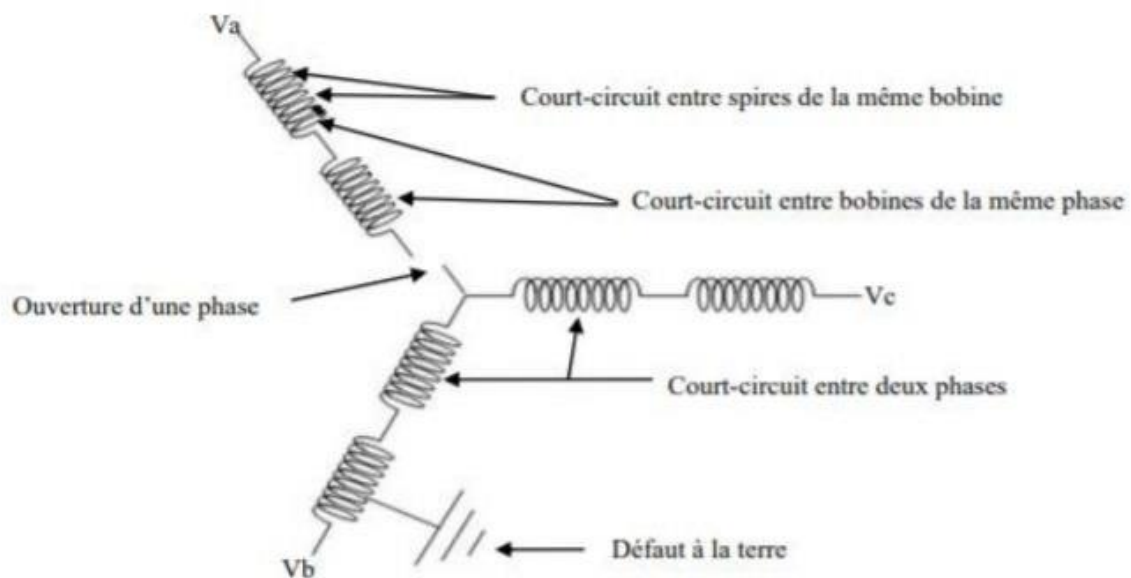


Figure I.7: Représentation des différents défauts statoriques possible [8].

I.5.2 Défaits rotoriques

i. Défaits de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Dans les machines asynchrones à rotor à cage d'écureuil, les défauts rotoriques les plus courants sont principalement liés à la rupture des barres rotoriques ou à la rupture des anneaux de court-circuit.

Ces défaillances peuvent être provoquées par plusieurs facteurs, tels qu'une surcharge mécanique, un échauffement local excessif, ou encore des défauts de fabrication. Ces phénomènes entraînent une perturbation du fonctionnement normal de la machine et peuvent provoquer des déséquilibres électromagnétiques susceptibles d'affecter ses performances [15].

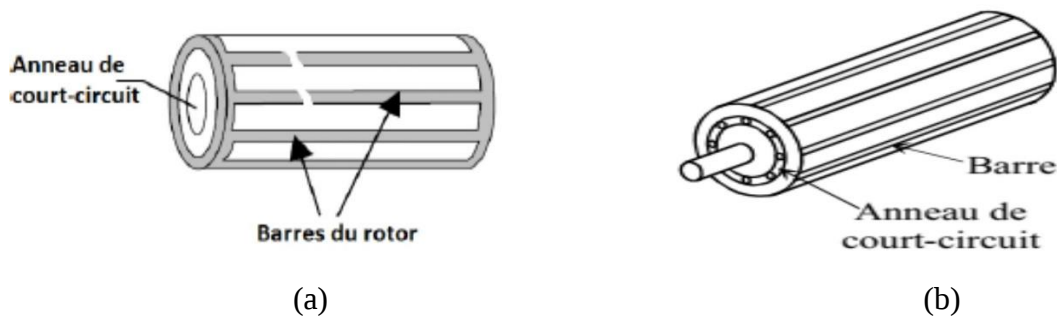


Figure I.8: Représentation de défaut rupture de barre et d'anneau [9].

ii. Défaits d'excentricité

Les défauts mécaniques dans les machines électriques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer, sous forme de défauts d'excentricité. L'excentricité dans les machines asynchrones peut se présenter sous plusieurs formes : Excentricité statique : Elle apparaît lorsque le centre du rotor ne coïncide pas avec le centre du stator, tandis que le rotor continue de tourner autour de son propre axe de rotation. Excentricité dynamique : Dans ce cas, le rotor ne tourne pas autour de son axe géométrique, ce qui provoque l'apparition d'un balourd pendant la rotation. Lorsque l'excentricité statique et l'excentricité dynamique apparaissent simultanément, on parle alors d'excentricité mixte [16].

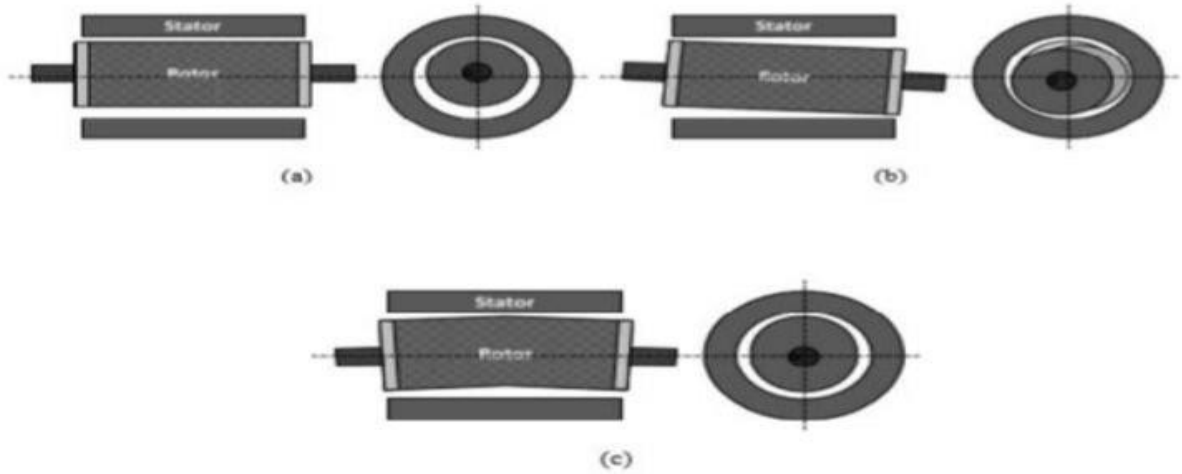


Figure I.9: Défauts d'excentricité [9].

iii. Défaillances des roulements mécaniques

Le roulement à billes constitue un élément fondamental dans la machine asynchrone, car il assure l'interface mécanique entre le stator et le rotor. Il joue également un rôle essentiel dans le maintien de l'arbre de la machine, garantissant ainsi une rotation stable du rotor. La majorité des machines électriques utilisent des roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le domaine industriel en raison de son bon rapport performance-prix [17][18].

Les roulements sont généralement composés de deux bagues, l'une intérieure et l'autre extérieure, entre lesquelles se trouvent des éléments roulants (billes ou rouleaux). En fonctionnement normal, les défaillances dues à la fatigue commencent par l'apparition de microfissures sous la surface du chemin de roulement ou des éléments roulants, qui se propagent progressivement jusqu'à la surface. Toute modification de l'uniformité du roulement engendre des vibrations mécaniques qui apparaissent dans le courant statorique sous forme de raies spectrales caractéristiques [19].

La fréquence associée à ces défauts peut être exprimée par :

$$f_{roul} = |f_s - k \cdot f_v| \quad (I - 4)$$

où : $k = 1, 2, 3, \dots$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations. Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par le défaut et des paramètres géométriques du roulement.

- Défaut au niveau d'une bille

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (I - 5)$$

- Défaut sur la bague intérieure

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I - 6)$$

- Défaut sur la bague extérieure

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I - 7)$$

Avec :

BD : diamètre d'un élément roulant

PD : distance entre les centres des billes diamétralement opposées

n_b : nombre d'éléments roulants

β : angle de contact des billes avec les bagues du roulement

f_{rot} : fréquence de rotation du rotor

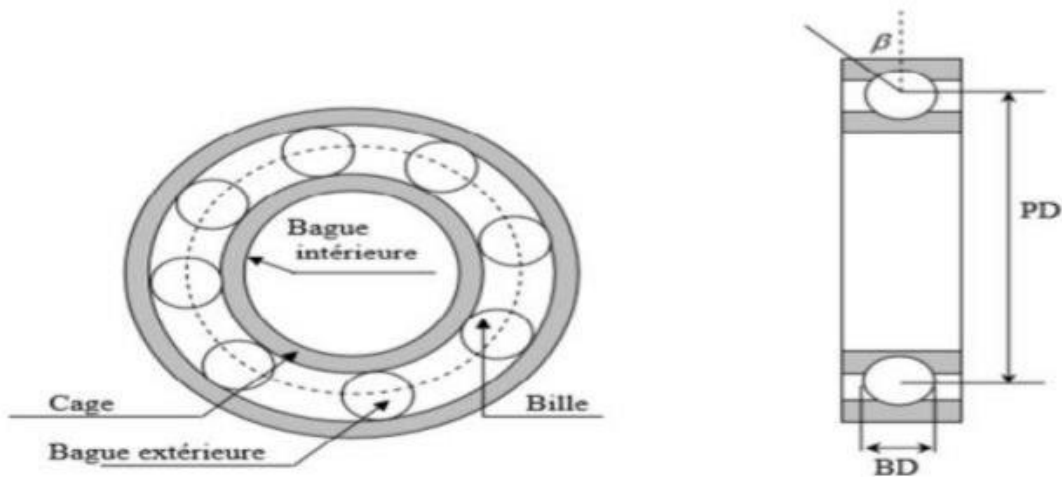


Figure I.10: roulement à bille [9].

I.6 Diagnostic des machines électriques

I.6.1 Conséquences des défauts [20]

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques peuvent entraîner plusieurs problèmes affectant la fiabilité et la rentabilité de l'installation industrielle. Dans certains cas, ces défaillances peuvent même provoquer l'arrêt total du système. Parmi les principales conséquences des défauts, on peut citer :

Des fluctuations du couple et de la vitesse de rotation.

Un appel supplémentaire de courant.

Un déséquilibre des tensions et des courants de ligne.

Une augmentation des arrêts non programmés, entraînant des pertes de production et une diminution du rendement global de l'installation.

I.6.2 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques

Pour réaliser le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent différents symptômes, tels que le bruit, la température, les vibrations, etc. Ces symptômes résultent généralement de modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles de certaines grandeurs mesurables. Le diagnostic repose sur l'analyse des signaux fournis par différents capteurs, aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel. Les informations utilisées pour établir un diagnostic peuvent provenir de plusieurs grandeurs mesurées, notamment : le courant absorbé par le moteur électrique, le carré du courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park, ou d'autres grandeurs caractéristiques du fonctionnement de la machine [21].

I.6.3 Organisation générale de la procédure de diagnostic

- La procédure de diagnostic des défaillances et des dégradations susceptibles d'affecter un moteur électrique se déroule généralement selon les étapes suivantes :
- Extraction des informations nécessaires à partir des mesures ou observations réalisées par les systèmes de surveillance afin de caractériser les régimes de fonctionnement normal et anormal.
- Élaboration des caractéristiques et signatures associées aux symptômes révélateurs de défaillances et de dégradations.
- Détection des dysfonctionnements par comparaison entre les signatures observées et celles correspondant à un fonctionnement normal.
- Application d'une méthode de diagnostic permettant d'identifier l'origine de la défaillance à partir des relations de cause à effet.
- Prise de décision en fonction des conséquences possibles de la défaillance ou de la dégradation détectée.

Dans certains cas, la décision peut conduire à l'arrêt de l'installation lorsque la défaillance présente un risque pour la sécurité des personnes et des équipements, ou à une reconfiguration

du fonctionnement du procédé industriel afin de limiter les pertes de production jusqu'à la prochaine intervention de maintenance corrective [22].

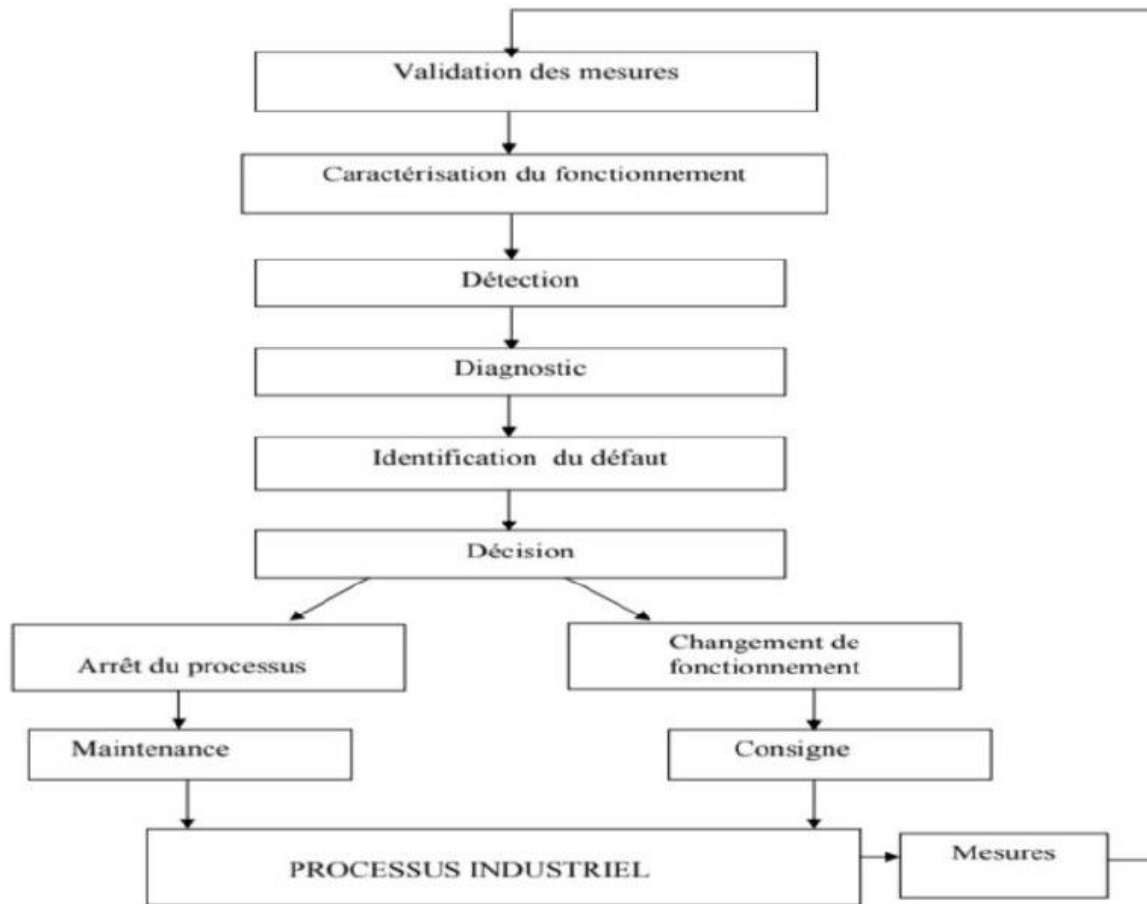


Figure I.11: Différentes phases de diagnostic [22].

I.7 Différentes méthodes de diagnostic

I.7.1 Méthodes internes

Les méthodes internes de diagnostic reposent sur la comparaison entre les mesures réelles du système surveillé et les informations fournies par un modèle de référence. Les écarts observés entre ces deux grandeurs permettent de caractériser l'état de fonctionnement du système.

- Lorsque l'écart est nul, le système fonctionne dans des conditions normales.
- Lorsque l'écart est non nul, cela indique généralement la présence d'un dysfonctionnement ou d'une défaillance.
- Les méthodes internes de diagnostic peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes de redondance analytique, qui utilisent les techniques d'estimation d'état, et les méthodes d'estimation paramétrique, dont l'objectif est d'identifier les paramètres du modèle représentant le système [23].

Méthodes internes selon les modèles utilisés
Modèle de simulation :

Il s'agit d'une représentation mathématique de la structure physique et du comportement dynamique du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce cadre sont généralement décrits par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Dans ce type d'approche, les perturbations sont prises en compte à travers les mesures, tandis que les défauts peuvent être modélisés par une modification de la structure du modèle. Cette approche permet de développer un modèle de simulation adapté à l'analyse du système [23].

Équations de parité :

Les équations de parité sont des relations mathématiques permettant de générer un résidu (écart entre les valeurs mesurées et estimées). Ces équations sont établies à partir des équations décrivant la structure et le comportement du système. Elles peuvent également être obtenues à l'aide de transformations mathématiques permettant d'améliorer la performance du diagnostic [23][19].

Observateurs :

Un observateur est un module permettant de générer une estimation du vecteur d'état du système, appelé également estimateur d'état. Le modèle est représenté par des variables d'état, et l'analyse de l'évolution des estimations de ces variables permet de détecter l'apparition de défauts dans le système [15].

Estimation paramétrique :

Cette méthode consiste à déterminer les valeurs des paramètres qui caractérisent le comportement dynamique du système. Elle permet d'identifier les coefficients des équations décrivant la structure du modèle du système [2].

Modélisation des signaux :

Dans cette approche, l'analyse du contenu spectral et de l'évolution temporelle des signaux mesurés est utilisée pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale est particulièrement utilisée pour le diagnostic des machines électriques, car certains défauts tels que la rupture de barres ou la dégradation des roulements génèrent des fréquences caractéristiques liées à la vitesse de rotation de la machine [21][9].

I.7.2 Méthodes externes

En raison de la difficulté liée à la construction de modèles physiques précis représentant le fonctionnement réel d'un système, les méthodes externes ont souvent montré une grande efficacité dans le diagnostic des machines électriques.

Ces méthodes exploitent les informations fournies par les capteurs installés sur les machines, notamment les signaux de vibration dans le cas des machines tournantes. Ces informations permettent de construire une représentation de l'état du système et de l'associer à un mode de fonctionnement particulier.

La mise en œuvre de ces méthodes repose généralement sur plusieurs étapes :

- L'extraction d'informations pertinentes à partir des signaux mesurés sous forme d'indicateurs caractéristiques,
- Le traitement de ces informations à l'aide de techniques de transformation et de sélection des indicateurs,
- L'utilisation de ces indicateurs comme vecteurs d'entrée pour des classificateurs permettant d'identifier les différents états de fonctionnement.

Ces méthodes sont particulièrement adaptées au diagnostic des machines tournantes, car elles exploitent directement les données issues des capteurs sans nécessiter le développement de modèles mathématiques complexes du système [24].

I.7.3 Méthodes inductives

Les méthodes inductives de diagnostic reposent sur une approche ascendante, appelée également raisonnement en avant. Le principe consiste à identifier le défaut à partir de l'analyse de ses effets observés sur le système. Ces méthodes permettent d'interpréter les différents symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de remonter progressivement à la cause probable de la défaillance [25].

I.7.4 Méthodes déductives

Les méthodes déductives reposent sur un raisonnement en arrière. Le diagnostic part d'une connaissance préalable du défaut potentiel afin d'identifier les effets qu'il peut produire sur le système. La comparaison entre les effets observés et les effets attendus permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut. Le diagnostic peut utiliser un raisonnement en avant, en arrière ou une combinaison des deux approches appelée raisonnement mixte [25].

I.8 Méthodes de détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage

Les méthodes de diagnostic des machines électriques peuvent être classées selon deux approches principales : l'approche signal et l'approche modèle. Ces méthodes permettent d'analyser les signaux issus du fonctionnement de la machine afin de détecter et localiser les anomalies [30].

I.8.1 Approche Signal

Dans cette approche, le diagnostic repose sur l'analyse des signaux mesurés sur la machine. L'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux permettent d'identifier les défauts susceptibles d'affecter le fonctionnement du système.

I.8.2 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic basé sur l'analyse des vibrations mécaniques est l'une des méthodes les plus utilisées dans la pratique. Les forces radiales produites par le champ magnétique dans l'entrefer peuvent générer des vibrations dans la machine asynchrone.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2}{2\mu_0} \quad (I - 8)$$

$$B_s = F_{mm} \cdot P$$

I.8.3 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut provoque un déséquilibre électromagnétique dans la machine, ce qui modifie la distribution du champ magnétique dans l'entrefer. L'analyse spectrale du flux magnétique axial permet de détecter différents défauts statoriques ou rotoriques [32].

I.8.4 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique repose sur l'analyse fréquentielle de la tension induite dans les enroulements statoriques par le flux rotorique. Elle est principalement utilisée pour la détection des défauts rotoriques comme la rupture de barres [33].

I.8.5 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre le champ statorique et le champ rotorique. Toute défaillance au niveau du stator ou du rotor influence directement ce couple. L'analyse spectrale du signal de couple fournit des informations pertinentes sur l'état de fonctionnement du moteur [34].

I.8.6 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'analyse de la puissance instantanée permet également de détecter les défauts mécaniques et électriques dans les moteurs asynchrones. Le signal de puissance contient souvent plus d'informations que le courant d'une seule phase.

I.8.7 Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Le courant statorique est l'un des signaux les plus utilisés pour le diagnostic des machines électriques. Cette méthode est connue sous le nom de Motor Current Signature Analysis (MCSA). Les défauts apparaissent dans le spectre du courant par l'apparition de raies spectrales caractéristiques ou par la modification de leur amplitude.

I.8.8 Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park

La méthode du vecteur de Park utilise les composantes i_d et i_q calculées à partir des trois courants d'alimentation. La variation de la forme de la courbe $i_q = f(i_d)$ peut indiquer la présence d'un défaut. La version étendue analyse le module $\sqrt{(i_d^2 + i_q^2)}$ pour détecter plusieurs types de défauts statoriques, rotoriques et de roulements [34].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux défauts pouvant affecter les machines électriques ainsi que leurs causes, leurs signatures et les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour les détecter. Certaines défaillances classiques, telles que les défauts de roulements ou la rupture de barres rotoriques, restent difficiles à diagnostiquer dans les machines tournantes. L'analyse de ces méthodes nécessite une bonne connaissance du modèle de la machine, qui sera étudié dans le chapitre suivant.

CHAPITER II : MÉTHODES AVANCÉES DE DIAGNOSTIC DES MOTEURS A INDUCTION

II.1 Introduction

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil constitue, sans conteste, le véritable cheval de bataille de l'industrie moderne. Sa robustesse, son coût modéré, son rendement élevé et la simplicité de son entretien lui confèrent une place dominante dans la conversion électromécanique : on estime qu'il absorbe à lui seul une fraction considérable de l'énergie électrique consommée par le secteur industriel [35]. Cette omniprésence rend toutefois sa surveillance critique : un arrêt imprévu, provoqué par une avarie non détectée, peut interrompre une chaîne de production entière et engendrer des coûts de maintenance et de manque à gagner considérables.

Les statistiques industrielles montrent que les défauts d'un moteur à induction se répartissent principalement entre quatre origines : les défauts de roulements, les défauts statoriques (essentiellement les courts-circuits entre spires), les défauts rotoriques (ruptures de barres ou d'anneaux) et les défauts d'excentricité d'entrefer [36]. La Figure II.2 en donne une répartition représentative : les roulements et le stator concentrent à eux seuls près de huit défaillances sur dix. Parmi celles-ci, le *court-circuit entre spires* du bobinage statorique occupe une position particulièrement préoccupante. Amorcé par une simple dégradation locale de l'isolant — sous l'effet conjugué des contraintes thermiques, électriques, mécaniques et environnementales — il évolue d'abord silencieusement, n'affectant que quelques spires, avant de dégénérer rapidement en un défaut franc phase-phase ou phase-masse susceptible de détruire la machine. La fenêtre temporelle pendant laquelle ce défaut reste bénin est courte ; sa détection précoce, alors que le nombre de spires concernées demeure faible, constitue donc l'un des objectifs les plus exigeants du diagnostic des machines électriques.

Historiquement, la surveillance des machines a d'abord reposé sur des grandeurs telles que les vibrations, le flux de dispersion, la température ou le couple. Ces approches, bien qu'efficaces, exigent généralement l'installation de capteurs dédiés, parfois invasifs et coûteux. L'analyse des signatures du courant statorique (*Motor Current Signature Analysis*, MCSA) a profondément modifié cette pratique en s'imposant comme la technique de référence [37] : elle est non invasive, économique, et se prête naturellement à une surveillance continue puisqu'un simple capteur de courant — souvent déjà présent pour la commande — suffit. Son principe est fondé sur une observation physique fondamentale : tout défaut rompt 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 présente cependant une limite intrinsèque lorsque le défaut est naissant : la signature qu'il imprime dans le spectre est de très faible amplitude, fréquemment noyée dans le bruit et masquée par la composante fondamentale à 50 Hz, dont l'énergie est plusieurs ordres de grandeur supérieure. Pour surmonter cet obstacle, une famille de méthodes dites *avancées* a été développée. Toutes reposent sur une même stratégie : appliquer au courant, en amont de la transformée de Fourier, un prétraitement mathématique (élévation au carré, transformation de Park, transformation de Hilbert, ou leur combinaison) destiné à amplifier la signature du défaut et à améliorer le rapport signal-sur-bruit.

Ce chapitre a pour objet de présenter, d'expliquer en détail et de comparer six de ces approches, classées 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 $PVSM_{P-H}$, et enfin la HPVPA (*Hilbert–Park's Vector Product Approach*) [38]. Toutes partagent la même finalité — révéler dans le spectre les harmoniques caractéristiques du défaut — mais se distinguent par la grandeur effectivement soumise à l'analyse spectrale, donc par la sensibilité qu'elles confèrent à la signature. La Figure II.1 en propose 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.

La structure du chapitre suit cette logique. La section II.2 rappelle l'origine physique des harmoniques exploités et les regroupe en quatre familles. La section II.3 introduit les deux outils mathématiques transverses — les transformées de Park et de Hilbert. La section II.4 détaille successivement les six approches et leur fondement théorique. La section II.5 en propose une synthèse comparée, prolongée par une étude expérimentale quantitative (section II.6) fondée sur des indices de sensibilité partielle et globale. Enfin, la section II.7 introduit la méthode NRHA, dont découle l'approche qui fera l'objet du chapitre III.

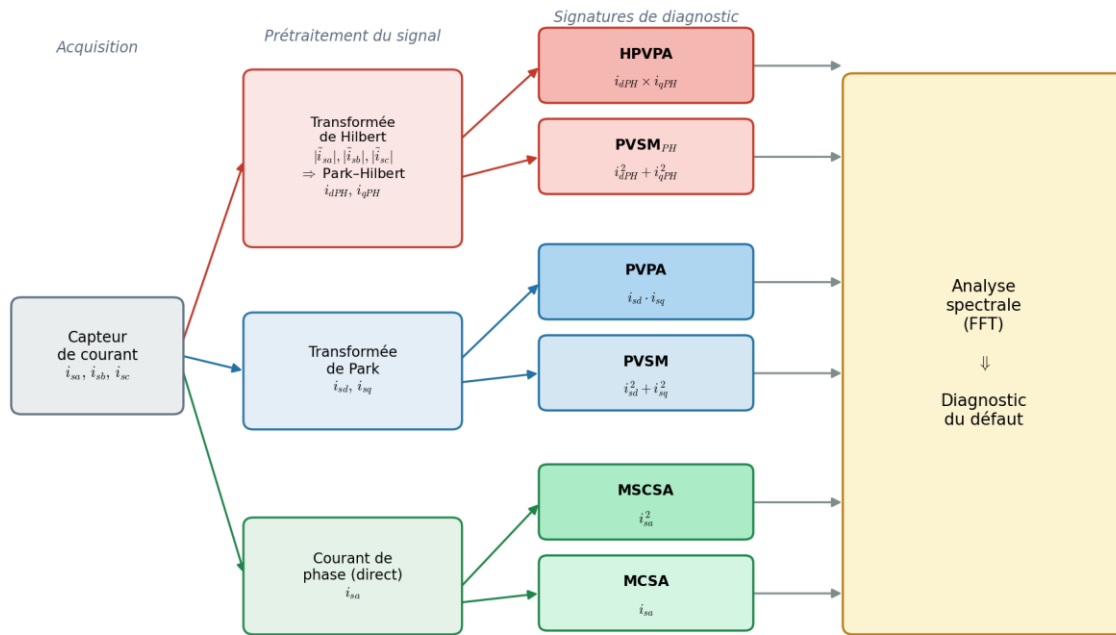


Figure II.1. Schéma synoptique des six approches de diagnostic à partir du courant statorique.

II.2 Généralités sur les défauts du moteur à induction

Avant d'aborder les méthodes de diagnostic, il est utile de rappeler brièvement la nature des principaux défauts et la manière dont ils s'impriment dans le courant statorique. Cette mise en perspective éclaire le choix des signatures exploitées par les différentes approches. La Figure II.2 rappelle la répartition statistique de ces défauts.

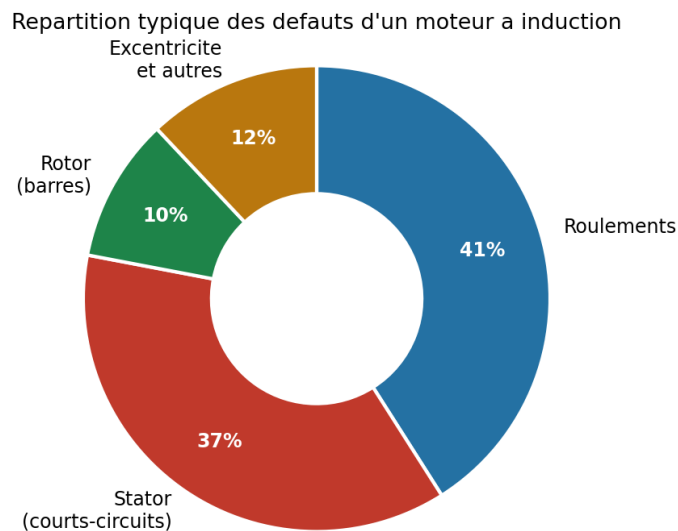


Figure II.2. Répartition statistique typique des défauts d'un moteur à induction

II.2.1 Le court-circuit entre spires du stator

Le bobinage statorique d'une machine asynchrone est constitué de spires isolées les unes des autres par un vernis ou une résine. Lorsque cet isolant se dégrade entre deux spires voisines d'une même phase, un chemin conducteur de faible impédance s'établit : c'est le court-circuit entre spires. Le courant qui circule dans la boucle ainsi formée peut atteindre plusieurs fois le courant nominal, provoquant un échauffement local intense qui accélère la dégradation de l'isolant des spires adjacentes. Le défaut se propage alors en cascade, d'où l'importance d'une détection au stade incipit.

Du point de vue électromagnétique, ce défaut introduit une asymétrie dans la distribution des enroulements. Le champ magnétique tournant, jusque-là équilibré, se décompose désormais en une composante directe et une composante inverse. Cette dernière induit, dans le courant statorique, des composantes harmoniques supplémentaires dont les fréquences et les amplitudes constituent la signature recherchée par les méthodes de diagnostic.

II.2.2 Les autres défauts et leur signature

Bien que ce chapitre se concentre sur le court-circuit entre spires, il convient de mentionner que les méthodes présentées réagissent également aux trois autres familles de défauts. Les **ruptures de barres rotoriques** créent une asymétrie de la cage qui module l'amplitude du courant et fait apparaître des bandes latérales autour du fondamental, aux fréquences $(1 \pm 2k_s)f_s$. L'**excentricité d'entrefer** — statique, dynamique ou mixte — fait varier périodiquement la réluctance du circuit magnétique et engendre des raies liées à la vitesse de rotation f_r . Les **défauts de roulements**, enfin, se traduisent par des vibrations mécaniques qui, par l'intermédiaire des variations d'entrefer qu'elles induisent, se reportent sous forme de modulations sur le courant statorique. La distinction entre ces signatures, partiellement recouvrantes, justifie le recours à plusieurs familles d'harmoniques que nous détaillons à la section II.3.

II.2.3. Les approches de surveillance par le courant

Historiquement, plusieurs grandeurs physiques ont été exploitées pour surveiller l'état de santé d'une machine : les vibrations mécaniques, le flux de dispersion axial, la température des enroulements, le couple électromagnétique, ou encore l'analyse chimique des huiles et des gaz dissous. Chacune présente ses avantages, mais la plupart exigent l'installation de capteurs dédiés, souvent coûteux et parfois intrusifs, ce qui en limite l'usage à des machines de forte puissance ou critiques.

L'analyse du courant statorique présente, à cet égard, un avantage décisif : le courant est une grandeur déjà mesurée dans la plupart des entraînements modernes, pour les besoins de la commande ou de la protection. Exploiter cette information pour le diagnostic ne demande donc aucun capteur supplémentaire. De surcroît, le courant porte la trace de pratiquement tous les défauts, qu'ils soient électriques ou mécaniques, car tous finissent par perturber le champ d'entrefer et, partant, les courants induits. C'est cette universalité, conjuguée à son caractère non invasif, qui a fait de l'analyse du courant le socle des méthodes étudiées dans ce chapitre.

II.3 Harmoniques caractéristiques du courant statorique

Le principe physique commun à toutes les méthodes de diagnostic par le courant repose sur un constat simple mais fondamental : une machine parfaitement saine et symétrique absorbe un courant dont le spectre est dominé par le seul fondamental, tandis qu'un défaut, en rompant une symétrie, fait apparaître ou renforce des raies à des fréquences précises. Il faut toutefois nuancer : même saine, une machine réelle présente déjà un spectre riche, car la distribution discrète des enroulements, la denture du rotor et du stator, ainsi que la saturation du circuit magnétique engendrent naturellement des harmoniques d'espace. De même, une alimentation non idéale introduit des harmoniques de temps. Le diagnostic consiste donc, le plus souvent, non pas à détecter des fréquences entièrement nouvelles, mais à mesurer le *renforcement* de raies préexistantes. On regroupe ces raies en quatre familles, illustrées à la Figure II.3 et résumées au Tableau II.1.

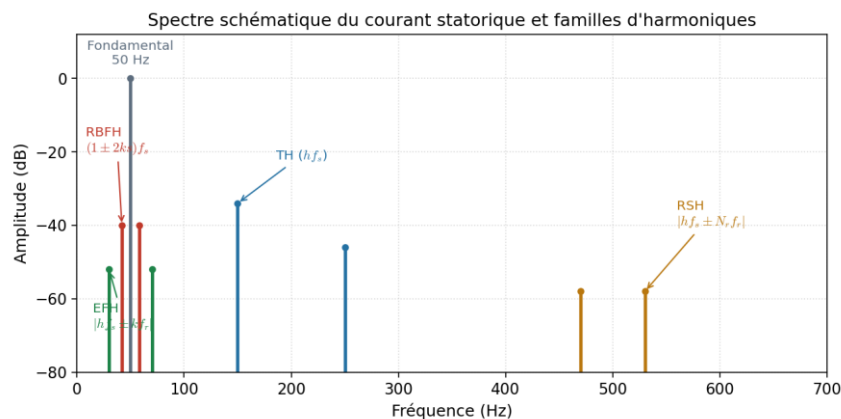


Figure II.3. Représentation schématique du spectre du courant et localisation des quatre familles d'harmoniques.

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 :

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

Les quatre familles d'harmoniques se distinguent par leur origine physique et par leur expression fréquentielle. Les **harmoniques de temps** (TH) sont les multiples impairs du fondamental ; ils traduisent la distorsion globale de l'onde de courant et sont sensibles 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*) apparaissent comme des bandes latérales du fondamental, espacées de $2k_s f_s$. Les **harmoniques d'excentricité** (EFH, *Eccentricity Fault Harmonics*) sont enfin liés aux défauts d'entrefer. Le Tableau II.1 récapitule ces expressions.

Famille	Expression fréquentielle	Origins physique
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 $	Denture 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)

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

Où $h = 1, 3, 5, \dots$ désigne le rang de l'harmonique de temps et $k = 1, 2, 3, \dots$ un entier. Un court-circuit entre spires, parce qu'il perturbe simultanément le champ et les courants induits, laisse une empreinte sur l'ensemble de ces quatre familles. C'est pourquoi les méthodes les plus performantes évaluent leur sensibilité non pas sur une seule famille, mais sur les quatre conjointement — idée qui sera formalisée par les indices de sensibilité introduits à la section II.6.

II.4 Outils mathématiques communs

Les six approches étudiées ne diffèrent que par la grandeur qu'elles soumettent à la transformée de Fourier. Or, les méthodes les plus performantes reposent sur deux transformations

mathématiques fondamentales, qu'il convient de présenter au préalable : la transformée de Park, qui condense les trois courants de phase en un vecteur plan, et la transformée de Hilbert, qui en extrait l'enveloppe instantanée. Toutes deux poursuivent un même objectif : concentrer l'information utile et atténuer la composante fondamentale qui masque la signature du défaut.

Rappelons que l'analyse spectrale repose sur la transformée de Fourier rapide (FFT), qui décompose un signal temporel en ses composantes fréquentielles. Sa résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à la durée d'acquisition : distinguer deux raies très proches — comme une signature de défaut située à quelques hertz du fondamental — exige donc une acquisition longue et une fréquence d'échantillonnage adaptée. C'est l'une des raisons pour lesquelles le simple examen du spectre brut (MCSA) atteint vite ses limites : non seulement le fondamental masque les raies voisines par fuite spectrale, mais leur séparation impose des contraintes expérimentales sévères. Les prétraitements présentés ci-après contournent partiellement 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'exploiter le vecteur de Park pour le diagnostic des courts-circuits statoriques remonte aux travaux fondateurs de Cardoso *et al.* [39] Cette projection n'est pas un simple artifice de calcul : en éliminant la redondance inhérente à un système triphasé équilibré, elle concentre 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 apparaît de façon saisissante dans le *plan de Park*. En régime sain et équilibré, le lieu décrit par l'extrémité du vecteur (i_{sd} , i_{sq}) au cours du temps est un cercle parfait, centré sur l'origine, dont le rayon est proportionnel à l'amplitude du courant. En présence d'un court-circuit entre spires, l'asymétrie introduite déforme 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 traduisent en grandeurs scalaires propices à l'analyse spectrale.

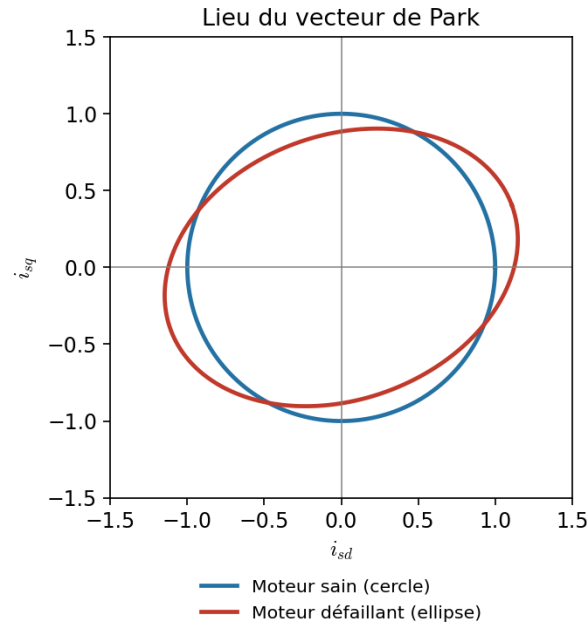


Figure II.4. Lieu du vecteur de Park : cercle (machine saine) et ellipse (machine défaillante).

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 le signal déphasé de 90° . En notant $\hat{i}_{sa}$ la transformée de Hilbert de i_{sa} , le signal analytique associé 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 réside dans l'accès direct à l'*amplitude instantanée* — l'enveloppe — du courant, donnée par le module du signal analytique :

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

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

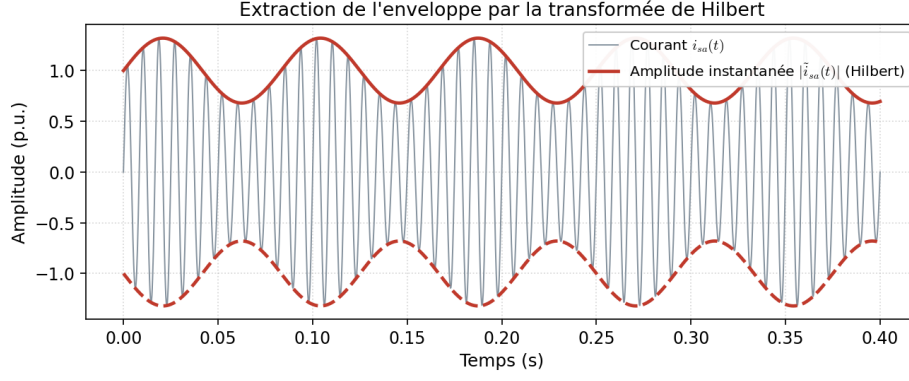


Figure II.5. Extraction de l'enveloppe (amplitude instantanée) du courant par la transformée de Hilbert.

En appliquant la transformée de Hilbert aux trois courants de phase pour en extraire les amplitudes instantanées, puis la transformée de Park à ces enveloppes plutôt qu'aux courants eux-mêmes, on définit les *composantes de Park-Hilbert*, notées i_{dP-H} et i_{qP-H} . Elles cumulent les avantages des deux transformations — la concentration de l'information par Park et l'élimination de la porteuse par Hilbert — et s'écrivent :

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

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

Ces deux composantes constituent le socle des deux approches les plus performantes de l'étude, la PVSM_{P-H} et la HPVPA, examinées plus loin.

II.5 Les six approches de diagnostic

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

II.5.1 MCSA (analyse directe du courant)

L'approche historique, et la plus simple, consiste à appliquer la transformée de Fourier directement au courant d'une seule phase statorique, sans aucun prétraitement [37] :

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

Sa simplicité fait à la fois sa force et sa faiblesse. Sa force : un seul capteur, une seule FFT, une interprétation 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, dont l'amplitude est très supérieure à celle des harmoniques de défaut, sature la dynamique du spectre et, par fuite spectrale, masque les signatures situées dans son voisinage immédiat. De plus, la position de ces signatures dépend du glissement, donc de la charge, ce qui complique leur identification automatique. La MCSA constitue ici le niveau de référence inférieur auquel sont comparées les autres approches.

II.5.2 MSCSA (analyse du carré du courant)

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

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

L'élévation au carré est une opération non linéaire qui engendre des produits d'intermodulation entre le fondamental et les composantes harmoniques. En développant le carré d'une somme de sinusoides, on voit apparaître 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 déplace les signatures du défaut vers une région spectrale moins encombrée que le voisinage immédiat du fondamental et augmente leur amplitude relative. Il en résulte une sensibilité supérieure à celle de la MCSA, obtenue sans aucun matériel supplémentaire ni transformation vectorielle — ce qui explique l'intérêt 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 :

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

En condensant le déséquilibre triphasé en une seule grandeur scalaire, la PVSM réduit fortement la contribution du fondamental — qui se reporte sur un niveau quasi continu — et fait ainsi ressortir les composantes liées au défaut. Le spectre de cette grandeur comporte un terme continu et des composantes additionnelles aux fréquences $2sf_s$, $4sf_s$, ..., soit de façon générale $2ksf_s$. La prise en compte simultanée des trois phases amplifie la signature de l'asymétrie : la PVSM surpasse donc nettement la MCSA pour le court-circuit entre spires. Elle reste toutefois en retrait par rapport aux approches utilisant la transformée de Hilbert, car le module carré conserve une part importante de l'énergie du fondamental.

II.5.4 PVPA (produit des composantes de Park)

La PVPA, introduite par Allal *et al.* [36], repose non plus sur le module carré, mais sur le *produit* des deux composantes de Park :

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

Le produit $i_{sd} \cdot i_{sq}$ engendre un spectre présentant 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 révèle 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 s'avère la moins performante des approches vectorielles : la symétrie particulière de l'ellipse engendrée par ce défaut atténue l'effet du produit. Cet exemple illustre une idée essentielle du diagnostic : aucune signature n'est universellement optimale, le choix dépend du défaut recherché.

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

La méthode de Park–Hilbert, proposée par Sahraoui *et al.* [40], 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, bénéficiant ainsi de la démodulation préalable opérée par la transformée de Hilbert :

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

L'étape de Hilbert, en isolant l'enveloppe, supprime l'essentiel de l'oscillation fondamentale avant la projection de Park. Le module carré qui en résulte est donc bien plus pauvre en composante fondamentale et, en proportion, bien plus riche en signatures de défaut. Les harmoniques du défaut y ressortent avec un contraste accru. La PVSM_{p-h} surpasse nettement la PVSM, la MSCSA et la MCSA, et se classe au deuxième rang de l'étude comparative, juste derrière la HPVPA.

II.5.6 HPVPA (produit vectoriel de Park–Hilbert)

L'approche HPVPA, proposée par Allal et Chetate [38], constitue l'aboutissement de cette démarche. Elle reprend les composantes de Park–Hilbert mais, à la manière de la PVPA, en calcule le *produit* plutôt que la somme des carrés :

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

Le traitement enchaîne ainsi 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.

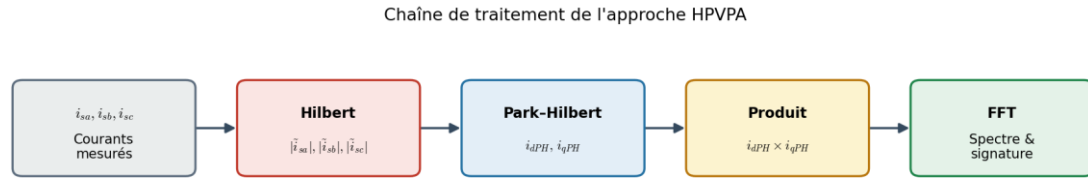


Figure II.6. Chaîne de traitement de l'approche HPVPA, du courant mesuré à la signature spectrale.

Sa supériorité tient à un double mécanisme. D'une part, la transformée de Hilbert élimine la majeure partie du fondamental et place les modulations du défaut au premier plan, comme dans la PVSM_{P-H}. D'autre part, le produit — opération multiplicative — agit comme un mélangeur qui amplifie davantage les bandes latérales du défaut 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 résume, de manière schématique, 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, restent enfouies dans le bruit. La PVSM 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 isolées, ce qui explique sa supériorité pour la détection précoce.

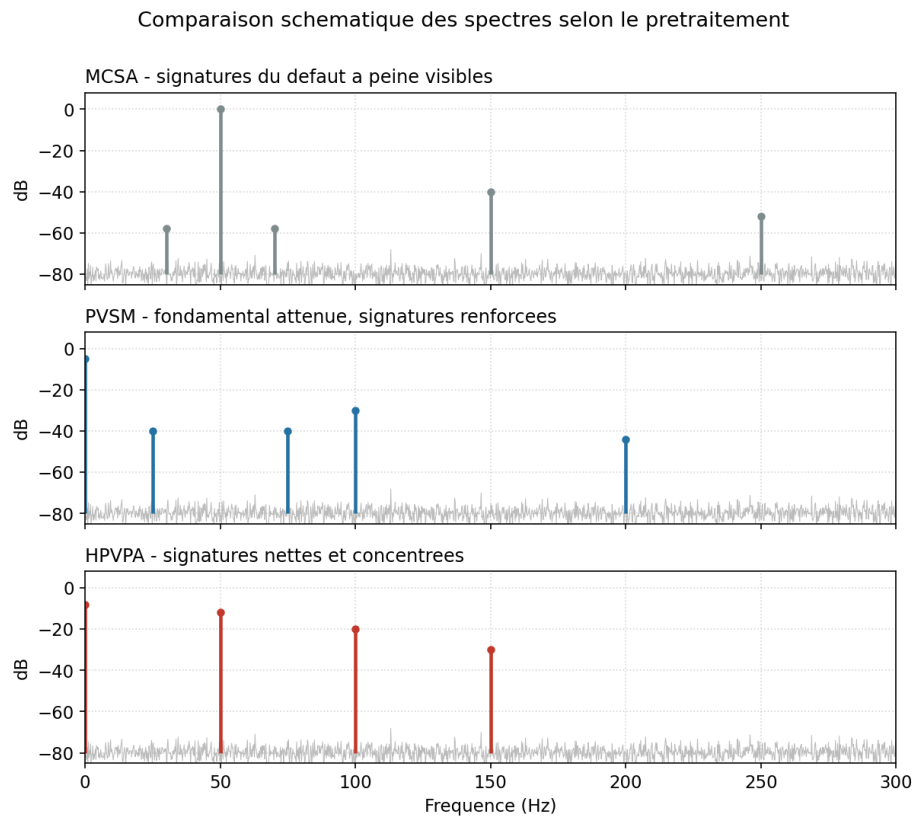


Figure II.7. Comparaison schématique des spectres obtenus par MCSA, PVSM et HPVPA pour un même défaut.

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. On y lit clairement la logique d'ensemble : passer du courant brut (MCSA) à des grandeurs de plus en plus prétraitées améliore la sensibilité, le gain le plus important étant apporté par la transformée de Hilbert, et le meilleur résultat par sa combinaison avec un produit de composantes (HPVPA).

Rang	Approche	Grandeur analyses	Pretreatment
1	HPVPA	$i_{dP-H} \times i_{qP-H}$	Hilbert + Park + produit
2	PVSM _{P-H}	$i_{dP-H}^2 + i_{qP-H}^2$	Hilbert + Park + module carré
3	MSCSA	$i_{sa}^2(t)$	Élévation au carré
4	PVSM	$i_{sd}^2 + i_{sq}^2$	Park + module carré
5	MCSA	$i_{sa}(t)$	Aucun (référence)
6	PVPA	$i_{sd} \cdot i_{sq}$	Park + produit

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

Il importe de 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. Le choix d’une méthode résulte donc d’un compromis entre sensibilité et coût de calcul, ce dernier croissant 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 à ressources limitées, la MSCSA offre un excellent compromis.

Sur le plan du coût de calcul, la hiérarchie s’inverse partiellement. La MCSA ne requiert qu’une seule FFT. La MSCSA y ajoute une élévation 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 coûteuses, car la transformée de Hilbert exige une convolution — typiquement réalisée par une FFT, un produit fréquentiel et une FFT inverse appliquée à chacune des trois phases. En pratique, cette charge supplémentaire reste tout à fait accessible aux processeurs de traitement de signal actuels, de sorte que la sensibilité demeure le critère déterminant pour la détection précoce.

II.7 Étude expérimentale comparative

II.7.1 Banc d’essai et protocole

Les approches ont été évaluées sur un banc d’essai composé d’un moteur asynchrone triphasé à cage de 3 kW, 4 pôles, alimenté à 50 Hz et couplé en étoile, dont le bobinage comporte 200 spires par phase et le rotor 28 barres [38]. Le court-circuit entre spires a été émulé

physiquement en dérivant successivement 4 puis 10 spires d'une phase, ce qui correspond à deux niveaux de sévérité du défaut. Pour évaluer l'influence du point de fonctionnement, chaque essai a été répété 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

Pour comparer objectivement les méthodes, deux indicateurs quantitatifs sont définis [38]. 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 afin de 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 respectivement. L'indice de sensibilité globale (GRI, *Global Relative Index*) est ensuite défini 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 permet un classement non ambigu des approches.

II.7.3 Résultats et discussion

La Figure II.8 présente 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 demeure élevée à faible et moyenne charge précisément dans le domaine où les méthodes classiques perdent en efficacité, le défaut étant alors le plus difficile à détecter.

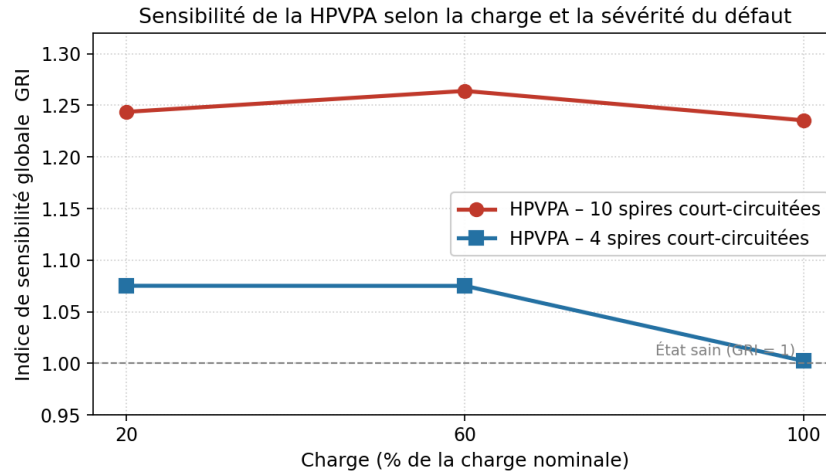


Figure II.8. Évolution de l'indice GRI de la HPVPA selon la charge et le nombre de spires en défaut (d'après [38]).

Le Tableau II.3 rassemble les valeurs de l'indice GRI obtenues pour les six approches, dans la condition de défaut de 10 spires sous faible charge. Ces valeurs numériques confirment, de façon quantitative, l'écart de sensibilité entre les méthodes.

Approche	Indices 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

Tableau II.3. Indices GRI des six approches (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [38]).

La Figure II.9 traduit graphiquement ce classement. La hiérarchie y est sans ambiguïté : la HPVPA domine avec un GRI d'environ 1,24, suivie de la PVSM_{P-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.

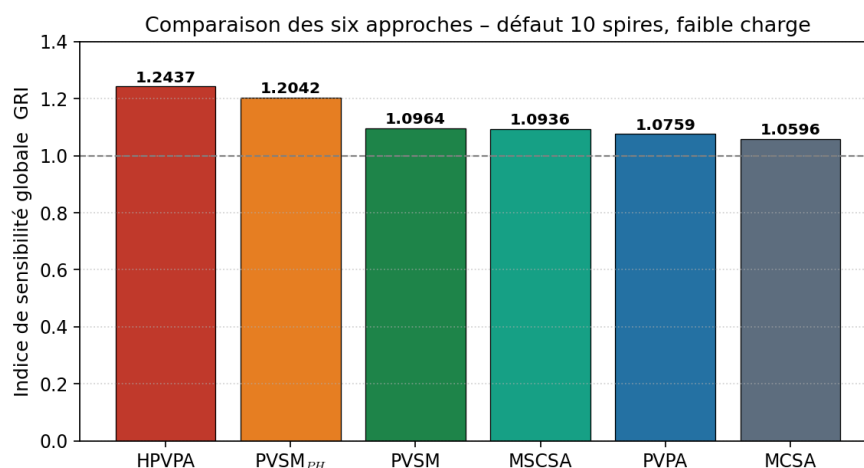


Figure II.9. Classement des six approches selon l'indice GRI (défaut de 10 spires, faible charge ; d'après [38]).

L'ensemble des essais conduit au classement global suivant, par ordre de sensibilité décroissante : **HPVPA** > **PVSM_{P-H}** > **MSCSA** > **PVSM** > **MCSA** > **PVPA**. La HPVPA s'impose donc comme la technique la plus apte à détecter de façon précoce un court-circuit entre spires du stator, quel que soit le régime de fonctionnement de la machine. Ces résultats valident la hiérarchie attendue théoriquement et démontrent que l'association d'une démodulation par Hilbert et d'un produit des composantes de Park constitue 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 partagent une même logique : amplifier la signature du défaut par un prétraitement non linéaire, puis l'analyser dans un spectre en décibels. Leurs signatures restent néanmoins 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 lever cette difficulté[41].

Son principe consiste à comparer, 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, de sorte que la signature du défaut se concentre sur un harmonique résiduel situé à une fréquence fixe (50 Hz), indépendamment de la nature du défaut. La méthode ne requiert qu'un simple capteur de

courant et a été validée expérimentalement sur des défauts de barres cassées et de courts-circuits entre spires.

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 traduit directement, pour chaque rang harmonique, l'écart entre l'état sain et l'état défaillant. Plus simple et moins coûteuse en calcul que les approches vectorielles, cette formulation ouvre la voie à un diagnostic en ligne particulièrement adapté aux défauts d'excentricité. Le chapitre III mettra en œuvre cette approche, dérivée de la NRHA et centrée sur les harmoniques de temps, afin de diagnostiquer expérimentalement un défaut d'excentricité et d'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. Partant de la méthode de référence (MCSA), nous avons montré comment l'introduction de prétraitements successifs — élévation au carré (MSCSA), transformation de Park (PVSM, PVPA), puis transformation de Hilbert (PVSM_{P-H}, HPVPA) permet d'amplifier progressivement la signature du court-circuit entre spires.

L'étude théorique, appuyée par une comparaison expérimentale quantitative fondée sur les indices PRI et GRI, a établi le classement de sensibilité suivant : HPVPA > PVSM_{P-H} > MSCSA > PVSM > MCSA > PVPA. La HPVPA, qui combine 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 trace la voie vers l'approche développée au chapitre suivant, consacré au diagnostic expérimental du défaut d'excentricité.

**CHAPITER III : DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES
MOTEURS ASYNCHRONES PAR LA METHODE
D'ANALYSE HARMONIQUE DES RESIDUS NORMALISES
DU COURANT DU MOTEUR**

III.1 Introduction

La maintenance efficace des machines électriques exige aujourd'hui un système de surveillance performant, capable de prendre les bonnes décisions au bon moment afin d'éviter les pannes et, par conséquent, les arrêts de production non planifiés. C'est pourquoi l'industrie a de plus en plus besoin de méthodes et d'outils de diagnostic à la fois fiables et rapides pour évaluer l'état de santé de ses équipements. Le moteur asynchrone (MAS), grâce à sa robustesse, son faible coût et sa simplicité de construction, demeure la machine la plus répandue dans le milieu industriel ; il n'en reste pas moins exposé à de nombreux défauts qui, s'ils ne sont pas détectés à temps, peuvent devenir catastrophiques.

Parmi ces défauts, les défauts statoriques — et plus particulièrement les courts-circuits entre spires des enroulements — occupent une place prépondérante. Ils représentent une part importante des défaillances rencontrées sur les machines asynchrones. Un court-circuit entre spires débute généralement par une simple dégradation de l'isolation entre deux conducteurs voisins ; ce micro-défaut, d'apparence bénigne, provoque une circulation de courant élevée dans la maille court-circuitée, un échauffement local, puis une propagation rapide qui peut conduire à la destruction complète de l'enroulement. La détection précoce de ce type de défaut, dès l'apparition des toutes premières spires en court-circuit, constitue donc un enjeu majeur pour la sûreté de fonctionnement et la continuité de la production.

Le diagnostic des machines électriques repose essentiellement sur l'analyse spectrale de différentes grandeurs : courants statoriques, couple, vibrations, flux de fuite, vitesse, puissance, etc. Dans cette analyse, les signatures de défaut peuvent se manifester soit par l'apparition de nouvelles composantes spectrales, soit par une simple modification de l'amplitude de composantes déjà existantes.

Parmi toutes ces techniques, l'**analyse des signatures du courant moteur (MCSA)** s'est imposée comme l'une des plus utilisées [46], car elle est non invasive et n'exige qu'un seul capteur de courant. D'autres approches ont également été développées, telles que l'**approche du produit vectoriel de Park de Hilbert (HPVPA)** et l'**approche du vecteur de Park étendu (EPVA)** [44-47], l'**analyse de la signature du courant moteur au carré (MSCSA)** [48], ou encore les méthodes fondées sur la **transformée en ondelettes discrète (DWT)** et les **réseaux de neurones artificiels (ANN)** [49- 50].

Cependant, les méthodes classiques présentent une limite importante : chaque type de défaut possède une fréquence caractéristique propre, variable et dépendante du glissement, ce qui oblige à effectuer à chaque fois un large balayage spectral pour rechercher la signature recherchée.

Pour lever cette contrainte, la **méthode d'analyse des harmoniques résiduelles normalisées du courant moteur (NRHA)** est proposée. Cette méthode est à la fois simple et efficace : elle repose sur une signature de défaut plus sensible et sur une fréquence unique d'harmonique, fixe et identique quel que soit le type de défaut. Elle s'appuie sur l'analyse du résidu des harmoniques, obtenu en comparant le spectre linéaire normalisé de la transformée de Fourier rapide (FFT) du courant de la machine saine à celui de la machine défaillante. Le présent travail se concentre sur l'application de cette méthode au diagnostic du défaut statorique de court-circuit entre spires, en mettant en évidence sa sensibilité à détecter ce défaut à la fréquence caractéristique fixe de 50 Hz, et ce pour différents niveaux de charge.

III.2 Méthode et formulation théorique

III.2.1 Harmoniques du courant statorique de la machine asynchrone

Le champ d'entrefer d'une machine asynchrone alimentée par une tension sinusoïdale est composé d'un large éventail d'harmoniques d'espace. L'analyse suivante suppose que ces harmoniques de flux d'entrefer résultent de l'interaction de la perméance d'entrefer avec les ondes de force magnétomotrice (FMM). Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) sont générées dans le courant de ligne statorique d'une machine saine aux fréquences données par [44] :

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

où k est un entier positif, s est le glissement, N_r le nombre d'encoches rotoriques, p le nombre de paires de pôles et f_s la fréquence fondamentale d'alimentation.

Pour un enroulement statorique formé de trois bobines identiques alimentées par un système de tension équilibré, seules les harmoniques d'ordre impair et non multiple de trois sont détectables. L'ensemble G des harmoniques détectées s'écrit [44] :

$$G = \left\{ \left(\frac{kN_r}{p} \pm 1 \right)_{k=1,2,3,\dots} \cap (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\} \quad (\text{III.2})$$

où v est un entier positif. En pratique, il existe toujours un certain déséquilibre statorique ; dans ce cas, toutes les harmoniques, même celles d'ordre multiple de trois, apparaissent dans le spectre du courant statorique.

En fonctionnement sain, le courant statorique d'une machine asynchrone à cage d'écureuil est constitué de deux séries d'harmoniques. La série des harmoniques de temps (TH) de fréquence [44]

$$f_{TH}(h) = hf_s \quad \text{ou} \quad TH = hf_s \quad (\text{III.3})$$

et la série des harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) de fréquence [2] :

$$f_{RSH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1-s) \right) f_s \right| \quad \text{ou} \quad S_{\pm} = |(hf_s \pm kN_r f_r)| \quad (\text{III.4})$$

avec $h = 1, 3, 5, \dots$ l'ordre de l'harmonique de temps et $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

En présence de défauts, deux autres séries d'harmoniques apparaissent. La série des harmoniques de défaut de barres rotoriques (RBFH), liée aux asymétries de la cage, de fréquence [44] :

$$f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2ks)f_s| \quad \text{ou} \quad R_{\pm} = |(h \pm 2ks)f_s| \quad (\text{III.5})$$

et la série des harmoniques de défaut d'excentricité (EFH), liée à l'excentricité mixte, de fréquence [44] :

$$f_{EFH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{k}{p} (1-s) \right) f_s \right| \quad \text{ou} \quad E_{\pm} = |(hf_s \pm kf_r)| \quad (\text{III.6})$$

où $f_r = (1/p)(1-s)f_s$ est la fréquence de rotation.

III.2.2 Étude du courant statorique et de ses harmoniques

L'analyse porte ici sur les courants de phase. Dans le cas idéal, le courant instantané circulant dans la phase « A » du stator s'écrit :

$$i_{sa}(t)_{sain} = \hat{I}_F \cos(2\pi f_s t) \quad (\text{III.7})$$

où $\hat{I}_F$ est le courant de phase maximal de la composante fondamentale (harmonique de temps avec $h = 1$). En ajoutant l'ensemble des harmoniques des équations (1) à (6), l'expression devient, en régime sain [44] :

$$i_{sa}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^n [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi TH_h t) + \hat{I}_{S_{\pm h,k}} \cos(2\pi S_{\pm h,k} t) + \sum_{k=1}^m (\hat{I}_{R_{\pm h,k}} \cos(2\pi R_{\pm h,k} t) + \hat{I}_{E_{\pm h,k}} \cos(2\pi E_{\pm h,k} t))] \quad (\text{III.8})$$

et, en régime défaillant :

$$i_{sa}(t)_{défaut} = \sum_{h=1}^n [\hat{I}'_{THh} \cos(2\pi TH_h t) + \hat{I}'_{S_{\pm h,k}} \cos(2\pi S_{\pm h,k} t) + \sum_{k=1}^m (\hat{I}'_{R_{\pm h,k}} \cos(2\pi R_{\pm h,k} t) + \hat{I}'_{E_{\pm h,k}} \cos(2\pi E_{\pm h,k} t))] \quad (\text{III.9})$$

Lors de l'apparition du défaut, le glissement augmente très légèrement ($s' \approx s$ mais $s' \neq s$) et les amplitudes des harmoniques en régime défaillant diffèrent de celles du régime sain.

III.2.3 Principe de la méthode NRHA

À partir de l'étude des quatre familles d'harmoniques présentes dans le courant moteur (équations (1) à (9)), la **méthode NRHA** exploite le résidu restant de la différence entre les harmoniques du régime sain, stockées dans une base de données, et celles du régime réel de fonctionnement. L'analyse des harmoniques résiduelles normalisées du courant moteur s'obtient selon les étapes suivantes :

- L'étude est menée dans la bande 35–70 Hz, car elle contient les harmoniques d'amplitude les plus importantes.
- Les deux états (sain et défaillant) sont comparés pour un même niveau de charge.
- Le traitement du signal fournit directement l'amplitude normalisée du spectre FFT linéaire.

Les amplitudes normalisées des spectres sain et défaillant sont définies par :

$$A(f)_{sain_N} = \frac{A(f)_{sain}}{A(f)_{sain,max}} \quad (III.10)$$

$$A(f)_{défaut_N} = \frac{A(f)_{défaut}}{A(f)_{défaut,max}} \quad (III.11)$$

où $A(f)_{défaut}$ et $A(f)_{sain}$ sont les amplitudes du spectre du courant en cas de défaut et en régime sain, $A(f)_{sain,max}$ et $A(f)_{défaut,max}$ les amplitudes maximales correspondantes, et f la fréquence (50 Hz).

L'amplitude résiduelle normalisée est ensuite obtenue par la différence entre le spectre normalisé défaillant et le spectre normalisé sain :

$$A(f)_R = 10^{(A(f)_{défaut_N} - A(f)_{sain_N})} \quad (III.12)$$

Le traitement du signal résiduel permet ainsi de calculer la différence des amplitudes et fournit l'écart le plus marqué entre les états sain et défaillant. C'est cette grandeur, l'harmonique résiduelle, qui sert d'indice de diagnostic unique, fixé à la fréquence invariable de 50 Hz quel que soit le type de défaut.

III.2.4 Schéma synoptique et organigramme de la méthode NRHA

La mise en œuvre pratique de la méthode NRHA peut être résumée par le schéma synoptique de la Figure 1 et par l'organigramme de la Figure 2. À l'aide d'un seul capteur de courant à effet Hall, on acquiert le signal de courant statorique d'une phase quelconque ; la FFT linéaire est alors calculée en temps réel. Selon le glissement estimé du moteur, on récupère les données numériques

de la FFT linéaire de l'état sain correspondant à la charge entraînée, stockées dans une base de données (RAM), puis on traite les deux signaux selon l'équation (12).

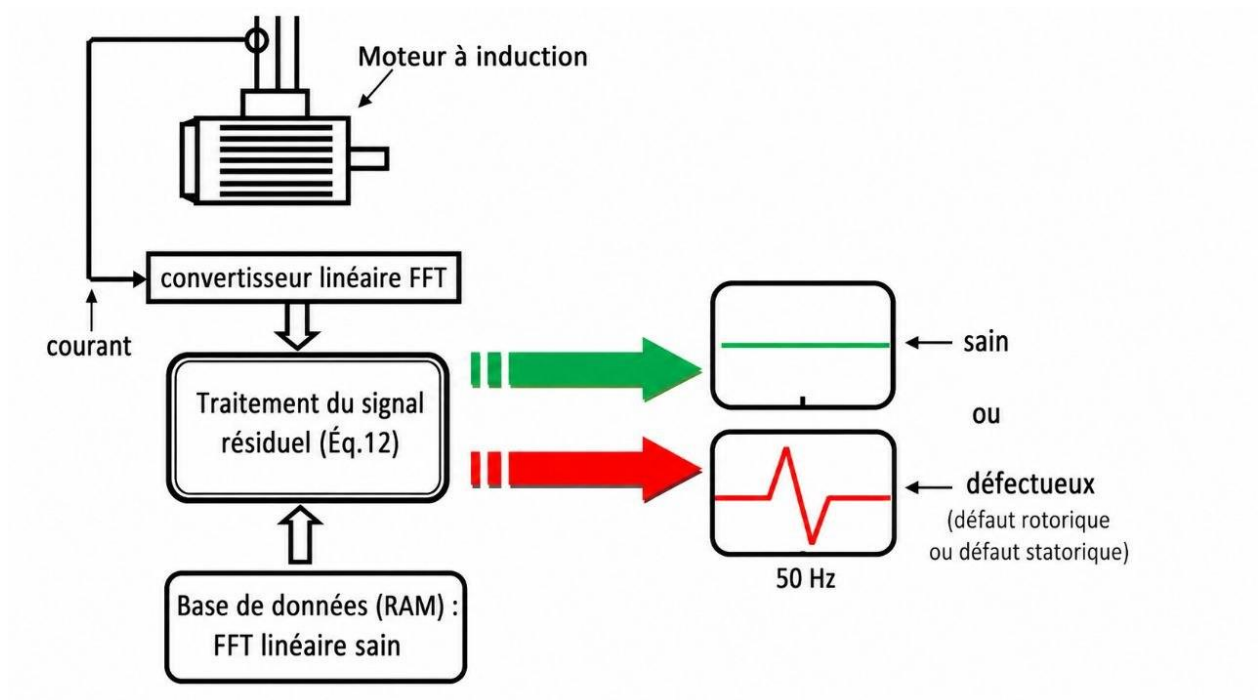


Figure III.1 : Diagramme bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA

Le balayage spectral est effectué uniquement dans l'intervalle restreint [49,9 – 50] Hz, ce qui révèle deux cas possibles : en l'absence d'harmonique résiduelle, la machine est saine ; en présence d'une harmonique résiduelle, un défaut est détecté. La gestion du fonctionnement du moteur est ensuite assurée selon le degré de sévérité du défaut, soit en arrêtant et réparant immédiatement, soit en reportant la réparation à un arrêt programmé.

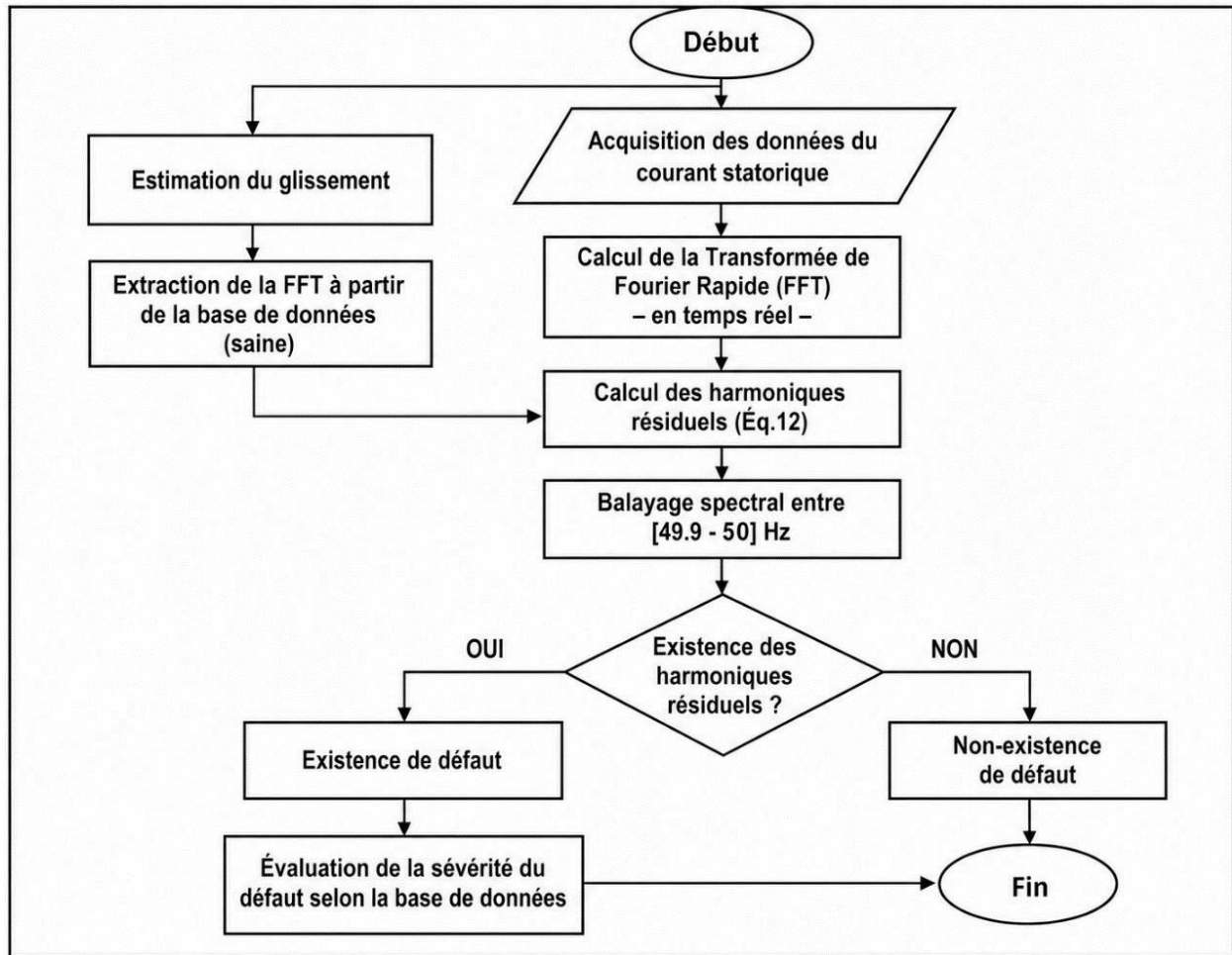


Figure III.2 : Organigramme des différentes étapes de détection des défauts par la méthode NRHA

Remarque:

D'après les études expérimentaux, nous avons remarqué que l'harmonique de temps TH est plus grande, 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.3 Résultats expérimentaux et discussion

III.3.1 Description du banc d'essai

Afin de valider la méthode NRHA pour le diagnostic du défaut statorique, des essais expérimentaux ont été réalisés sur un moteur asynchrone de 3 kW présentant un court-circuit entre spires(10 spires) et quatre pôles au niveau d'une phase du stator. Le signal de courant statorique a été acquis à l'aide d'un capteur de courant à effet Hall pour la phase considérée. La même résolution

fréquentielle a été conservée pour tous les essais. Les essais ont été menés pour trois niveaux de charge — 20 %, 60 % et 100 % de la charge nominale — afin d'étudier le comportement de l'indice de diagnostic (l'harmonique de temps résiduelle TH_R) en fonction du point de fonctionnement de la machine.

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 1 : Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé dans l'expérimentation[51]

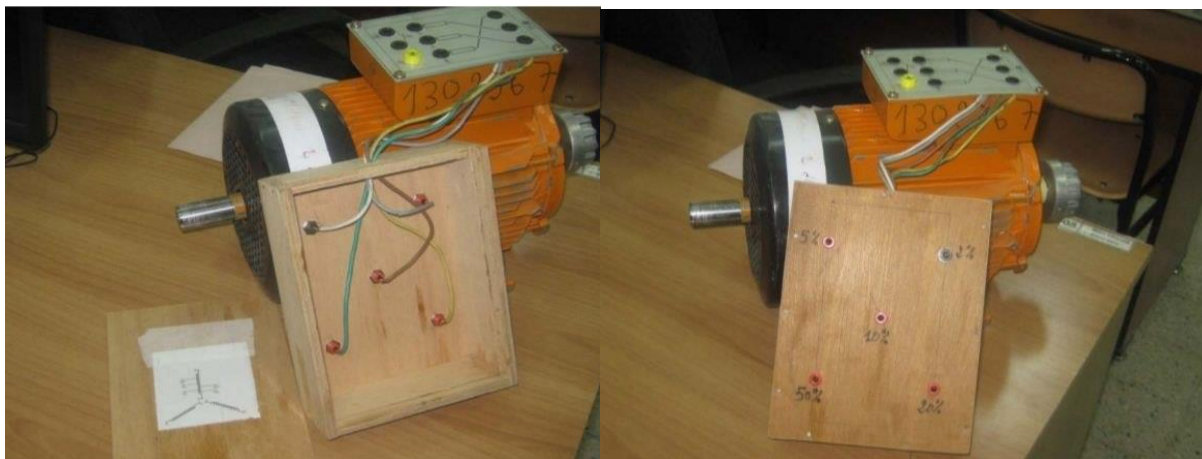


Figure III.3: moteur 3kW rebobiné spécialement pour faire les essais de court-circuit entre Spires[51]

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.3.2 Résultats sous 20 % de la charge nominale

Les Figures 4 et 5 présentent les formes d'onde des trois courants statoriques (phases A, B et C) respectivement en régime sain et en régime défaillant, sous 20 % de charge. On observe trois courants sinusoïdaux équilibrés et déphasés de 120° . En régime sain (Figure 4), les trois courants conservent des amplitudes pratiquement égales et une allure régulière. En régime défaillant (Figure 5), l'amplitude des courants augmente légèrement et une déformation apparaît, traduisant le déséquilibre introduit par le court-circuit entre spires. À faible charge, cette déformation reste discrète et difficilement exploitable à l'œil nu, ce qui justifie le recours à l'analyse spectrale.

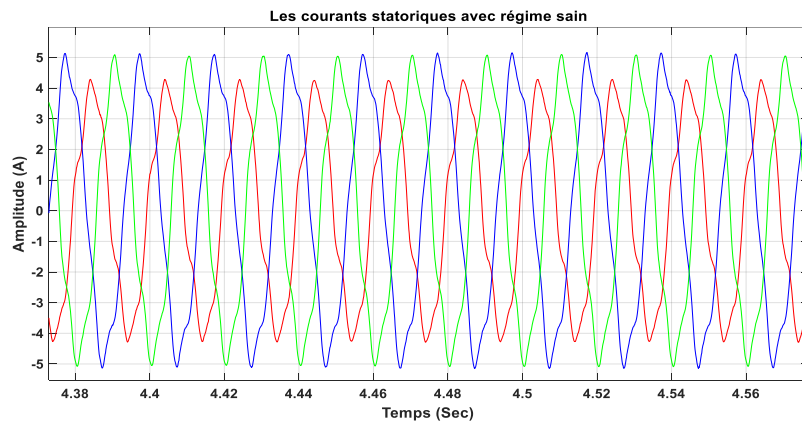


Figure III.4 : Courants statoriques triphasés en régime sain — 20 % de charge

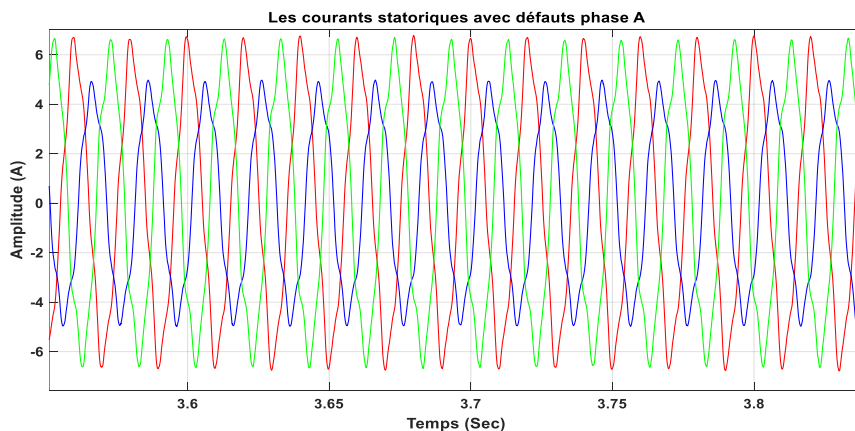


Figure III.5 : Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 20 % de charge

La Figure 6 compare les spectres FFT du courant statorique entre l'état sain et l'état défaillant. Cette comparaison met en évidence l'écart d'amplitude au voisinage du fondamental (50 Hz), qui constitue précisément l'information exploitée par la méthode NRHA pour générer l'harmonique résiduelle.

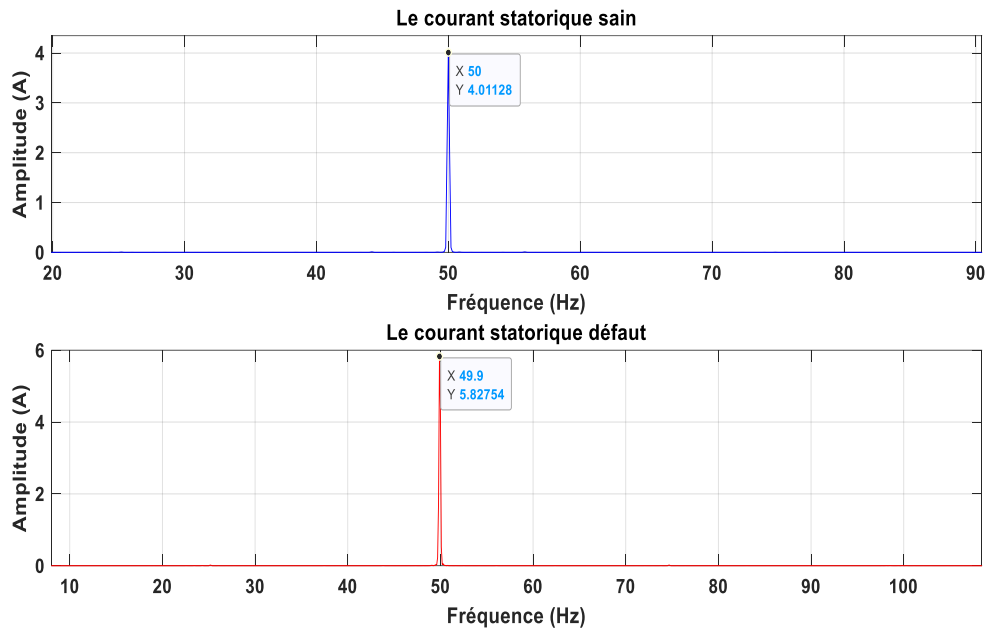


Figure III.6 : Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 20 % de charge

La Figure 7 montre le spectre obtenu par la méthode NRHA sous 20 % de charge. Ce spectre représente l'amplitude résiduelle $A(f)|_R$ en fonction de la fréquence : pour un état parfaitement sain, le résidu resterait proche de l'unité (ligne plate) ; toute remontée nette traduit la présence d'un défaut. On constate ici une raie résiduelle franche et isolée localisée à la fréquence caractéristique de 49,9 Hz (≈ 50 Hz), ce qui confirme la détection du défaut statorique.

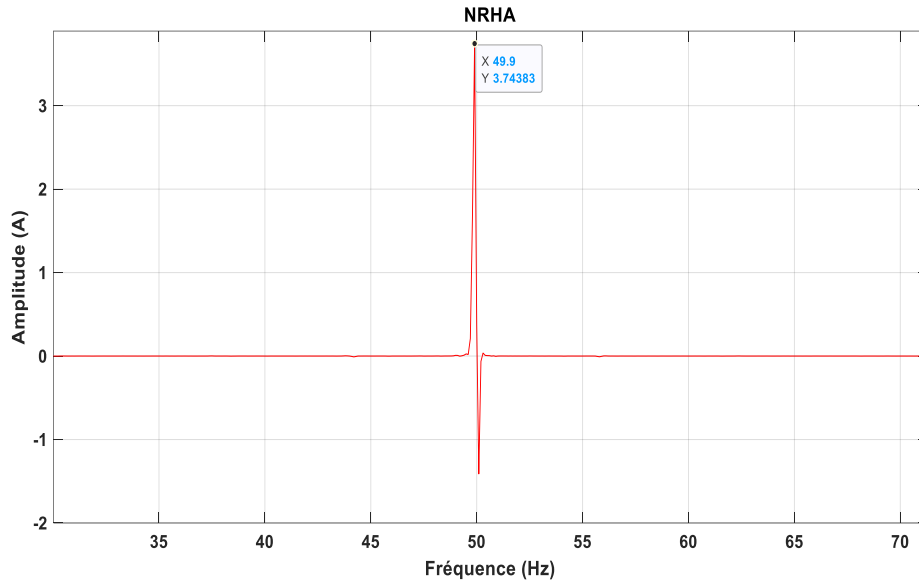


Figure III.7 : Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 20 % de charge (défaut stator)

III.3.3 Résultats sous 60 % de la charge nominale

Les Figures 8 et 9 présentent les courants statoriques triphasés sous 60 % de charge, en régime sain puis en régime défaillant. Par rapport au cas précédent, l'amplitude des courants est plus élevée, en cohérence avec l'augmentation de la charge. En régime défaillant (Figure 9), le déséquilibre entre phases devient plus perceptible.

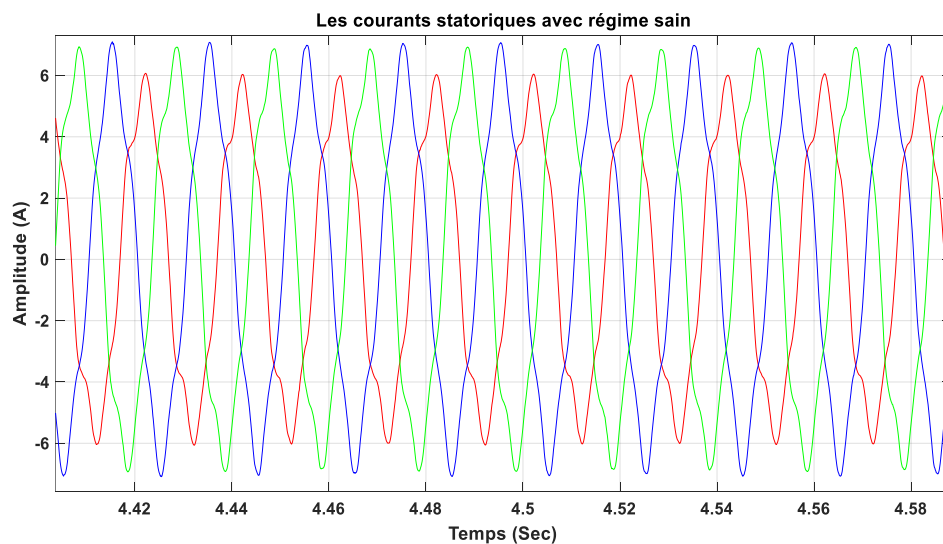


Figure III.8 : Courants statoriques triphasés en régime sain — 60 % de charge

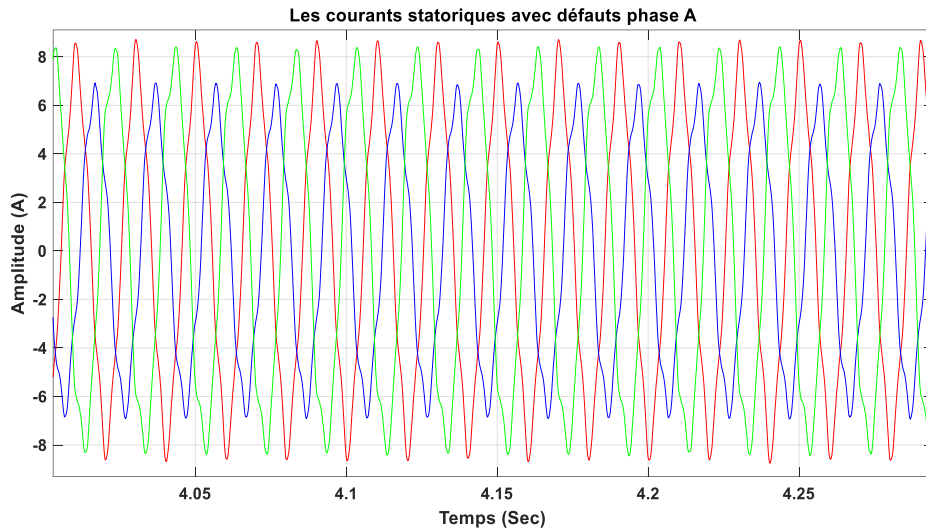


Figure III.9 : Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 60 % de charge

La Figure 10 compare les spectres FFT sain et défaillant sous 60 % de charge ; l'écart d'amplitude au niveau du fondamental y est plus important que sous 20 %, ce qui se répercute directement sur la valeur de l'harmonique résiduelle.

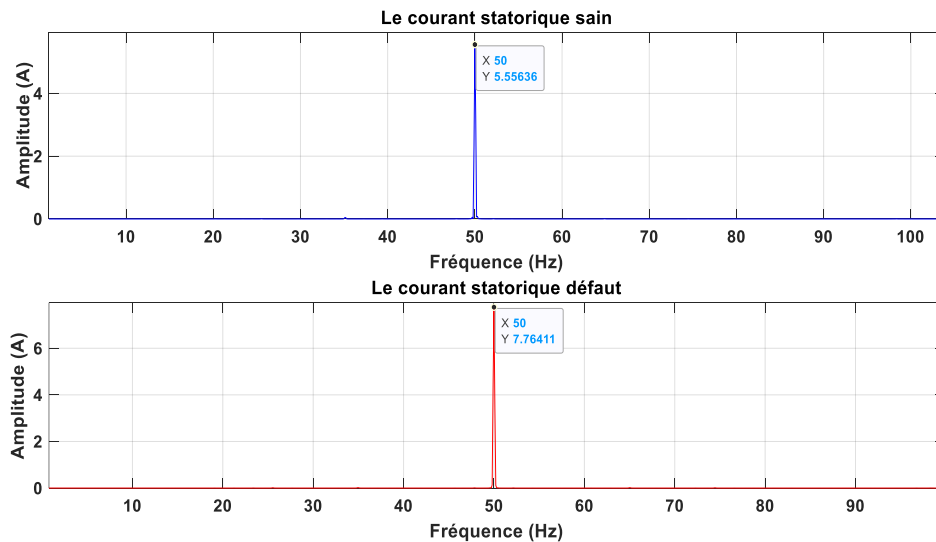


Figure III.10 : Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 60 % de charge

La Figure 11 présente le spectre NRHA sous 60 % de charge. La raie résiduelle apparaît de nouveau à la fréquence fixe de 50 Hz, l'indice de diagnostic restant nettement détectable, ce qui traduit la bonne sensibilité de la méthode lorsque la machine est davantage chargée.

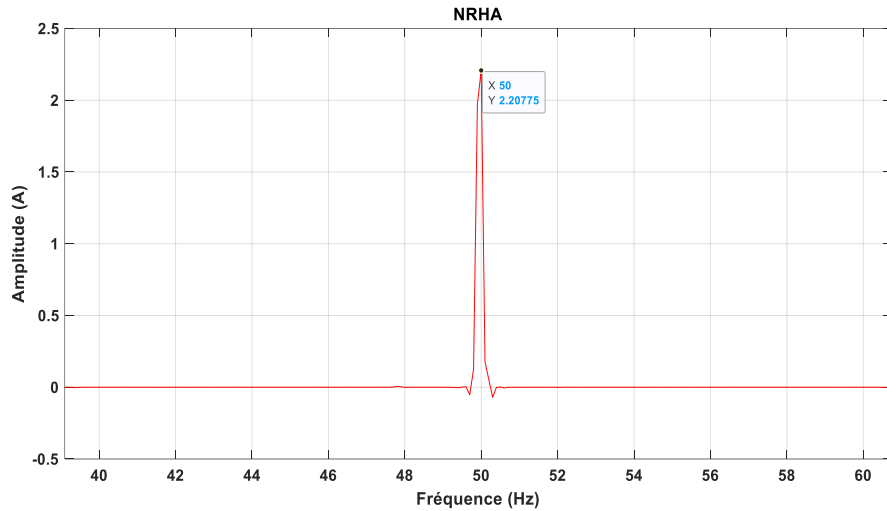


Figure III.11 : Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 60 % de charge (défaut stator)

III.3.4 Résultats sous 100 % de la charge nominale

Les Figures 12 et 13 présentent les courants statoriques triphasés à pleine charge (100 %), en régime sain puis en régime défaillant. À ce niveau de charge, les amplitudes sont maximales et la déformation des courants en régime défaillant (Figure 13) est la plus prononcée des trois cas étudiés.

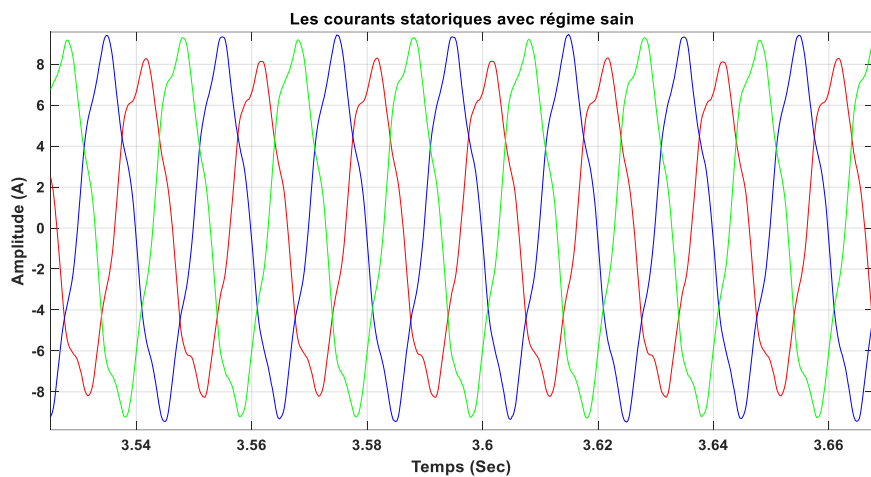


Figure III.12 : Courants statoriques triphasés en régime sain — 100 % de charge

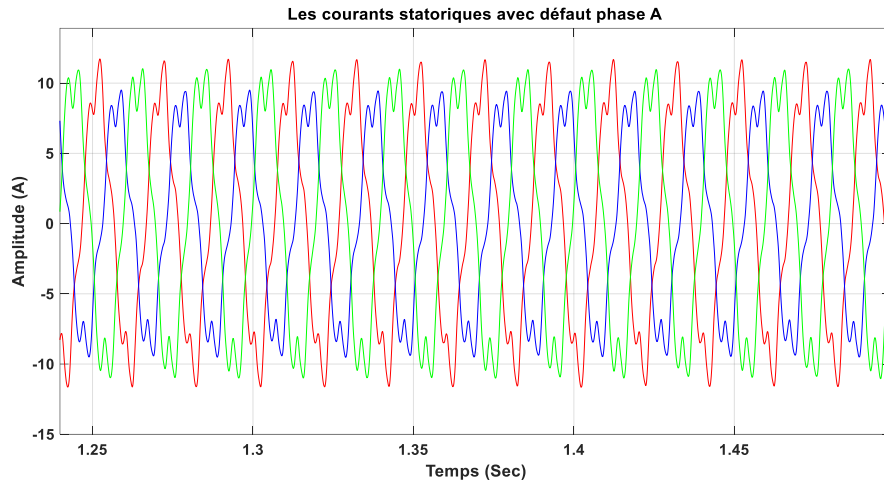


Figure III.13 : Courants statoriques triphasés en régime défaillant (défaut stator) — 100 % de charge

La Figure 14 compare les spectres FFT sain et défaillant à pleine charge ; l'écart d'amplitude au fondamental y est clairement visible.

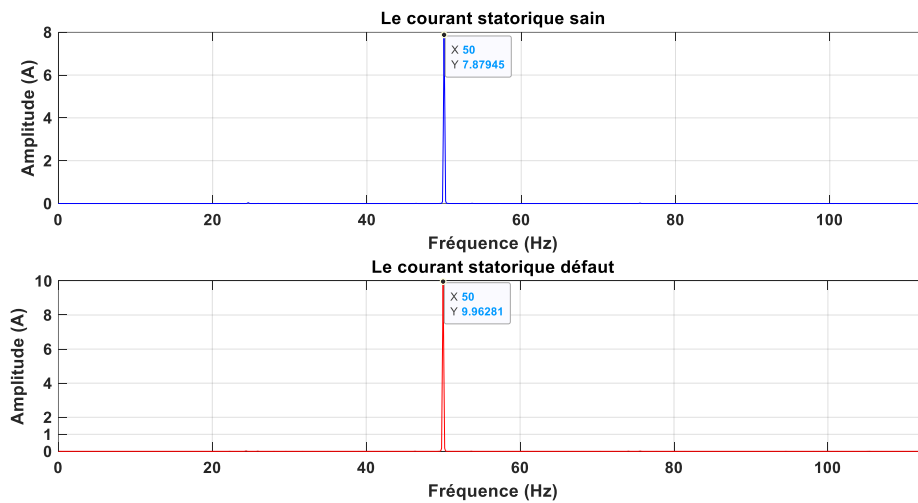


Figure III.14 : Comparaison spectrale du courant statorique (FFT) entre l'état sain et l'état défaillant — 100 % de charge

La Figure 15 présente le spectre NRHA à pleine charge. La raie résiduelle reste localisée à la fréquence invariable de 50 Hz, confirmant le caractère fixe de la signature de défaut quel que soit le niveau de charge.

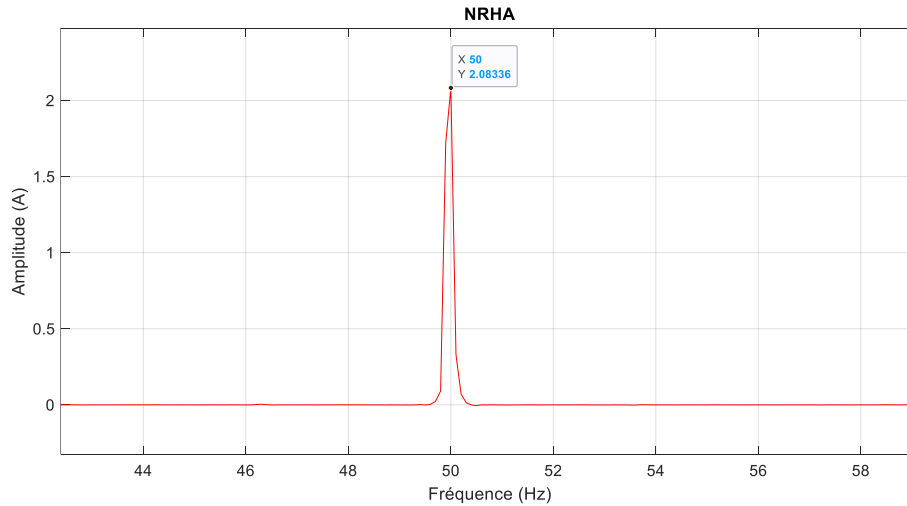


Figure III.15 : Spectre du courant statorique obtenu par la méthode NRHA — 100 % de charge (défaut stator)

III.3.5 Synthèse quantitative des résultats

Le Tableau 2 présente, pour chaque niveau de charge, l'amplitude de l'harmonique de temps (TH) du courant statorique en régime sain et en régime défaillant, ainsi que la fréquence associée.

Charge	Harmonique de temps	Stator sain : Fréq. (Hz)	TH:Fréq. (Hz)	Stator avec défaut : A(f) (A)	TH : Fréq. (Hz)
20 %	TH	4,01128	50	5,82754	49,9
60 %	TH	5,55636	50	7,76411	50
100 %	TH	7,87945	50	9,96281	50

Tableau III.2 : Amplitude de l'harmonique de temps (TH) du courant statorique — états sain et défaillant — en fonction de la charge

La Figure 16 compare, pour chaque niveau de charge, l'amplitude de l'harmonique de temps TH entre l'état sain et l'état défaillant. On observe d'abord que l'amplitude TH croît avec la charge dans les deux états, ce qui est cohérent puisque le courant absorbé augmente avec le couple demandé. Surtout, l'amplitude en régime défaillant demeure systématiquement supérieure à celle du régime sain, et ce pour les trois niveaux de charge : c'est précisément cet écart qui, après normalisation et application de l'équation (12), donne naissance à l'harmonique résiduelle servant d'indice de diagnostic. Il convient de souligner que, dès 20 % de charge, l'amplitude relevée en régime

défaillant (5,82754 A) dépasse déjà nettement celle de l'état sain (4,01128 A) : le défaut statorique reste donc parfaitement détectable même à faible charge, ce qui constitue un avantage majeur de la méthode par rapport aux techniques classiques, réputées peu sensibles dans ces conditions de fonctionnement.

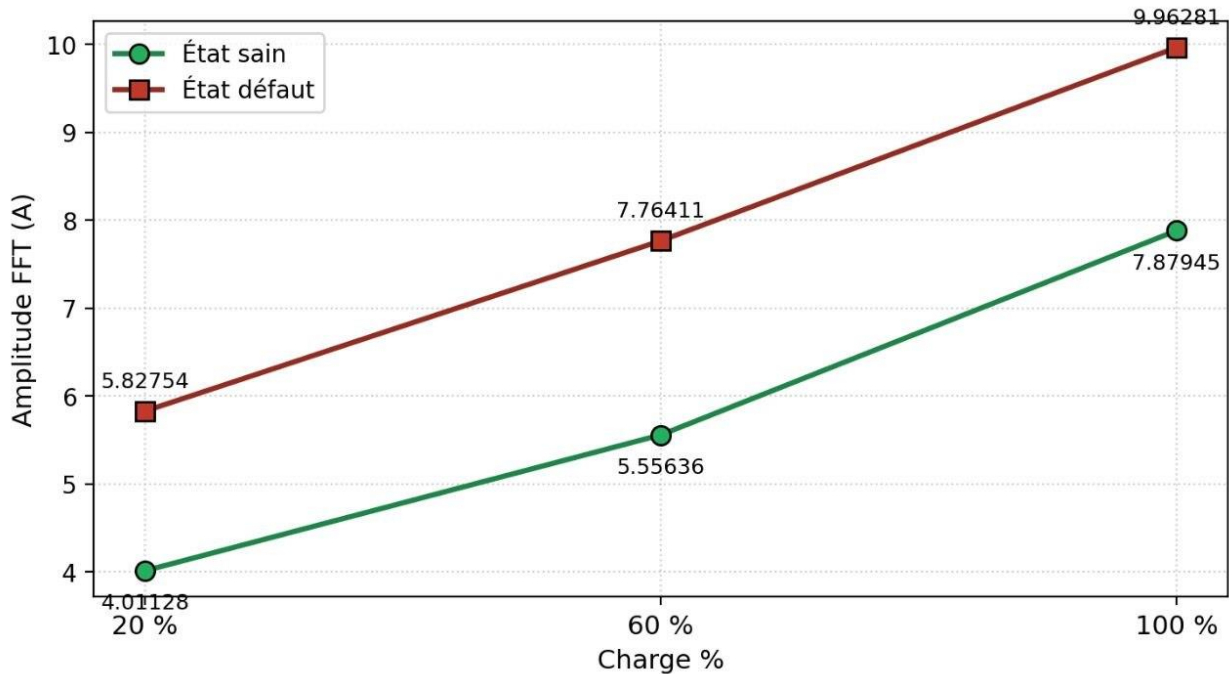


Figure III.16 : Comparaison de l'amplitude de FFT (état sain / état défaut) en fonction de la charge

Le Tableau 3 regroupe les valeurs de l'harmonique de temps résiduelle (TH_R) — indice de diagnostic de la méthode NRHA — relevées pour les trois niveaux de charge, ainsi que la fréquence correspondante.

Charge	Harmonique de temps résiduelle	Stator avec défaut : $A(f)_R$ (A)	Fréquence (Hz)
20 %	TH_R	3,74383	49,9
60 %	TH_R	2,20775	50
100 %	TH_R	2,08336	50

Tableau III.3 : Sensibilité de la méthode NRHA (harmonique de temps résiduelle TH_R) pour le défaut statorique en fonction de la charge

La Figure 17 illustre, sous forme de courbe, l'évolution de l'harmonique de temps résiduelle TH_R en fonction de la charge. L'indice de diagnostic est présent et nettement détectable pour les trois niveaux de charge, ce qui confirme l'aptitude de la méthode à révéler le défaut statorique quel que soit le point de fonctionnement. La valeur du résidu reste du même ordre de grandeur sur toute la plage de charge, et la raie demeure dans tous les cas localisée autour de la fréquence fixe de 50 Hz, ce qui constitue l'avantage central de la méthode.

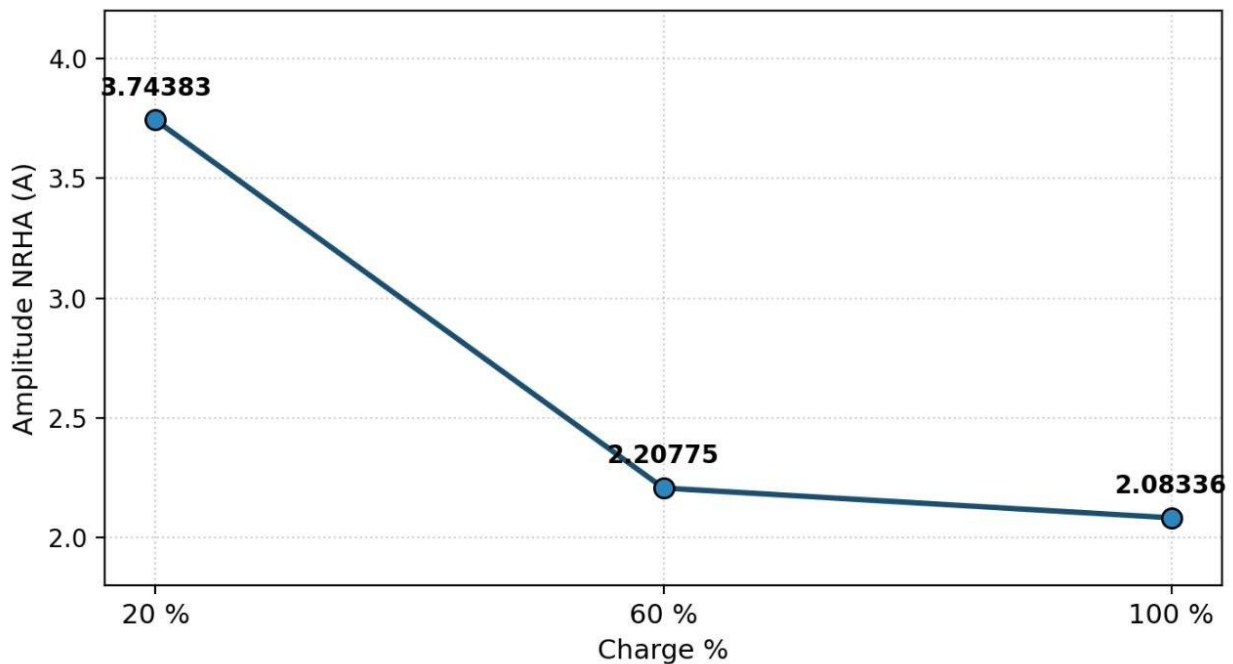


Figure III.17 : Évolution de l'amplitude NRHA en fonction de la charge (défaut stator)

III.3.6 Discussion

L'ensemble des résultats montre que l'harmonique de temps résiduelle TH_R constitue un excellent indice de diagnostic du défaut statorique : elle est sensible, isolée et toujours localisée à la fréquence fixe et invariable de 50 Hz, quel que soit le niveau de charge. Cette propriété représente l'apport majeur de la méthode NRHA par rapport aux techniques classiques. En effet, il n'est plus nécessaire d'effectuer un large balayage spectral pour rechercher à chaque fois des fréquences caractéristiques variables ; il suffit de surveiller l'apparition d'une raie résiduelle dans l'intervalle restreint [49.9 – 50] Hz. La comparaison des trois niveaux de charge met par ailleurs en évidence un atout déterminant de la méthode : elle demeure pleinement opérationnelle dès 20 % de charge, là où la plupart des techniques de diagnostic classiques perdent en sensibilité et peinent à distinguer le défaut du bruit de fond. Ainsi, la méthode NRHA reste efficace aussi bien à faible qu'à pleine charge, ce qui la distingue nettement des approches conventionnelles.

III.4 Point fort de notre méthode NRHA

La méthode NRHA se distingue avant tout par sa simplicité de mise en œuvre : elle ne requiert qu'un seul capteur de courant et un espace mémoire réduit, le traitement se limitant à une comparaison du spectre du courant et au calcul de la différence (le résidu) entre l'état sain et l'état réel de fonctionnement. Cette facilité de surveillance, associée à une détection précoce des défauts adaptée au contexte industriel, constitue le fondement commun aux différentes techniques de diagnostic.

Le principal atout de la méthode réside toutefois dans son comportement vis-à-vis de la charge. Les techniques classiques fondées sur l'analyse du courant voient leur signature de défaut s'intensifier uniquement lorsque la charge augmente, et perdent fortement en sensibilité à faible charge ou à vide. À l'inverse, la méthode NRHA permet une détection fiable du défaut statorique même à faible charge, voire en fonctionnement à vide, comme l'ont confirmé les résultats obtenus dès 20 % de la charge nominale. Cette aptitude à diagnostiquer le défaut sur toute la plage de fonctionnement, et notamment dans les conditions les plus défavorables aux méthodes conventionnelles, représente la véritable supériorité de l'approche proposée.

III.5 Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que le traitement du signal issu des lignes d'alimentation permet, par la méthode NRHA, d'analyser une harmonique spécifique lors de l'apparition d'un défaut statorique de court-circuit entre spires. Les principaux avantages de la méthode appliquée au défaut statorique sont les suivants :

- une surveillance simple du fonctionnement de la machine (état sain ou défaillant) à l'aide d'un indice de diagnostic unique ;
- une détection du défaut statorique fondée sur l'harmonique de temps résiduelle TH_R toujours fixée à la fréquence invariable de 50 Hz ;
- une détection rapide, sans large balayage spectral, l'analyse étant restreinte à l'intervalle [49.9 – 50] Hz ;
- une estimation du degré de sévérité du défaut à partir de l'amplitude de l'harmonique résiduelle, permettant de détecter le tout début de la dégradation (micro-court-circuit entre spires) ;
- une efficacité confirmée pour différents niveaux de charge (20 %, 60 % et 100 %), et notamment **une détection fiable du défaut dès la faible charge (20 %)**, contrairement à la plupart des méthodes classiques dont la sensibilité se dégrade fortement dans ces conditions.

Au-delà de ces avantages, le résultat le plus remarquable de cette étude réside dans l'aptitude de la méthode NRHA à détecter le défaut statorique même sous faible charge (20 %), un régime de fonctionnement où les méthodes de diagnostic classiques se révèlent généralement peu fiables. Cette caractéristique distingue nettement la méthode proposée et renforce son intérêt pour une surveillance industrielle continue. La méthode étant très efficace pour des charges fixes bien déterminées, une perspective de ce travail consiste à recourir à des techniques d'intelligence artificielle afin de lever la limitation liée à la variation continue de la charge.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts statoriques des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, en exploitant l'analyse spectrale du courant statorique comme grandeur de surveillance. L'objectif était à la fois de comparer les méthodes de diagnostic existantes et de proposer une approche nouvelle, la méthode NRHA, capable de surmonter les limitations des techniques classiques.

Pour y parvenir, nous avons commencé par dresser un état de l'art complet sur la machine asynchrone et ses défaillances. Les principaux types de défauts ont été classifiés selon leur origine : défauts statoriques, rotoriques, d'excentricité et de roulements. Il est apparu que le court-circuit entre spires représente l'une des défaillances les plus redoutées, en raison de son caractère évolutif et silencieux : il débute de manière imperceptible, sans affecter sensiblement le fonctionnement apparent de la machine, avant de dégénérer rapidement en un défaut franc susceptible de la détruire entièrement, laissant peu de marge pour une intervention corrective.

Forts de ce constat, nous avons présenté et comparé plusieurs méthodes avancées de diagnostic par le courant statorique — parmi lesquelles la MCSA, la MSCSA, la PVSM, la PVPA, la PVSMP-H et la HPVPA. Toutes partagent la même finalité, à savoir révéler les harmoniques caractéristiques du défaut dans le spectre du courant, mais se distinguent par le prétraitement mathématique appliqué en amont de la transformée de Fourier. L'étude comparative a montré que la sensibilité au défaut croît avec la complexité du prétraitement : les méthodes faisant intervenir la transformée de Hilbert se sont révélées nettement supérieures aux approches directes, tandis que la MCSA classique, bien qu'elle reste la référence industrielle de par sa simplicité, montre ses limites lorsque le défaut est naissant ou que la machine fonctionne à faible charge.

C'est précisément cette dépendance au point de fonctionnement, et plus généralement la variabilité de la fréquence caractéristique du défaut selon le glissement, qui nous a conduits à nous intéresser à la méthode NRHA — Normalized Residual Harmonic Analysis. Son principe repose sur la comparaison entre le spectre linéaire normalisé du courant en régime sain, stocké en mémoire comme référence, et celui acquis en temps réel lors du fonctionnement. Le résidu

normalisé ainsi obtenu constitue un indicateur de diagnostic dont la fréquence caractéristique est fixe et invariable, quel que soit le type de défaut, sa sévérité ou le régime de charge de la machine.

La validation expérimentale de la méthode NRHA sur un moteur asynchrone présentant un court-circuit entre spires a pleinement confirmé ces propriétés. La raie résiduelle caractéristique du défaut a été détectée avec netteté et constance pour l'ensemble des conditions de charge testées. L'indicateur de diagnostic s'est révélé systématiquement plus élevé en régime défaillant qu'en régime sain, garantissant une discrimination fiable entre les deux états. Plus significatif encore, la méthode s'est montrée efficace même en conditions de faible charge, là où les approches classiques peinent à extraire un indicateur exploitable — ce qui constitue un avantage déterminant pour la détection précoce du défaut, avant que celui-ci n'atteigne un stade critique.

Au terme de ce travail, il ressort que la méthode NRHA représente une avancée significative dans le domaine du diagnostic des machines électriques. En s'affranchissant de la variabilité de la fréquence caractéristique du défaut, elle simplifie considérablement la procédure de surveillance et ouvre la voie à une automatisation complète du diagnostic. Sa légèreté calculatoire et son recours à un seul capteur de courant la rendent particulièrement adaptée à une intégration embarquée, ce qui en fait un outil prometteur pour la maintenance prédictive des moteurs asynchrones en environnement industriel.

Ces résultats encourageants invitent naturellement à poursuivre l'investigation dans plusieurs directions. Il serait d'abord intéressant d'étendre la validation de la NRHA à d'autres types de défauts — rotoriques, excentricité, roulements — afin d'évaluer sa généralité et sa polyvalence. L'intégration de la méthode dans une plateforme embarquée temps réel, couplée à des algorithmes d'apprentissage automatique pour la classification automatique des défauts, constituerait une perspective industrielle particulièrement valorisante. Enfin, l'étude de sa robustesse face aux perturbations du réseau d'alimentation et aux régimes transitoires mériterait une attention particulière dans de futurs travaux.

Bibliographiques

- [1] A. Allal, *"Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones"*, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [2] M. Ammar, *"Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones"*, Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955, Skikda, 2012.
- [3] Y. Babeche, *"Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2018.
- [4] E. Schaeffer, *"Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts"*, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 1999.
- [5] B. Bisma, *"Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.
- [6] Y. Laamari, *"Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques"*, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- [7] S. Hajji, *"Modélisation, observation et commande de la machine asynchrone"*, Thèse en cotutelle, Université de Caen Basse-Normandie (France) / Université de Sfax (Tunisie), 2009.
- [8] A. Abdelkebir, *"Diagnostic d'un moteur à induction en utilisant la transformée en ondelettes"*, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2017.
- [9] C. Hakima, *"Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [10] A. Ceban, *"Méthode globale de diagnostic des machines électriques"*, Thèse de doctorat, Université de Lille, 2012.
- [11] T. Boileau, *"Contribution à la continuité de service des actionneurs synchrones à aimants permanents — Tolérance au défaut de capteur mécanique : détection de défauts électriques"*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2010.
- [12] A. Chahmi, *"Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic"*, Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017.

- [13] M. E. K. Oumaamar, *"Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée"*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [14] R. Bousseksou, *"Modélisation analytique des machines asynchrones — application au diagnostic"*, Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [15] A. Ghouggal, *"Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts"*, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [16] S. Zouzou, *"Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2015.
- [17] N. Yassa, *"Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spores et des cassures de barres d'anneaux"*, Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2009.
- [18] K. Ilyes, *"Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle"*, Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2014.
- [19] A. Abed, *"Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone"*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2002.
- [20] S. Belhamdi, *"Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [21] A. Ghoggal, *"Contribution à la modélisation de la machine asynchrone triphasée dédiée au diagnostic"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.
- [22] S. Mohamed, *"Étude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones"*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.
- [23] I. Kerszenbaum, C. F. Landy, *"The existence of large interbar currents in three-phase squirrel-cage motors with rotor-bar and end-ring faults"*, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, n° 7, pp. 1854–1862, 1984.
- [24] J. R. Cameron et al., *"Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors"*, *IEE Proceedings B*, vol. 133, n° 3, 1986.
- [25] J. Penman et al., *"Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors"*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, n° 4, 1994.

- [26] S. Nandi et al., "Novel frequency-domain based technique to detect incipient stator inter-turn faults in induction machines using stator induced voltage after switch-off", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, n° 1, pp. 101–109, 2002.
- [27] Y. Han, Y. H. Song, "Condition monitoring techniques for electrical equipment — a literature survey", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, n° 1, 2003.
- [28] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, n° 5, pp. 984–993, 2000.
- [29] W. T. Thomson, M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, n° 4, pp. 26–34, 2001.
- [30] S. Nandi, H. A. Toliyat, 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.
- [31] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz, 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.
- [32] M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. Guedidi, 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.
- [33] A. Allal, B. Chetate, 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.
- [34] A. Allal, 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° 2, pp. 994–1022, 2019.
- [35] A. Allal, 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, pp. 108219, 2022.
- [36] A. Allal, A. Khechekhouche, Z. Driss, "Induction machines diagnosis by the time's harmonics", *International Journal of Energetica*, vol. 5, n° 2, pp. 32–36, 2020.
- [37] P. Gangsar, R. Tiwari, "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors — a state-of-the-art review", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144, pp. 106908, 2020.

- [38] M. B. Abd-el-Malek, A. K. Abdelsalam, O. E. Hassan, "Novel approach using Hilbert transform for multiple broken rotor bars fault location detection for three-phase induction motor", *ISA Transactions*, vol. 80, pp. 439–457, 2018.
- [39] K. N. Gyftakis, A. J. Marques Cardoso, J. A. Antonino-Daviu, "Introducing the filtered Park's and filtered extended Park's vector approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 93, pp. 30–50, 2017.
- [40] V. F. Pires, M. Kadivonga, J. F. Martins, A. J. Pires, "Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis", *Measurement*, vol. 46, n° 2, pp. 942–948, 2013.
- [41] A. E. Mabrouk, S. E. Zouzou, S. Khelif, A. Ghoggal, "On-line fault diagnostics in operating three-phase induction motors by the active and reactive currents", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 8, n° S1, pp. 160–168, 2017.
- [42] A. Glowacz et al., "Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals", *Measurement*, vol. 113, pp. 1–9, 2018.
- [43] D. Camarena-Martinez et al., "Synchrosqueezing transform-based methodology for broken rotor bars detection in induction motors", *Measurement*, vol. 90, pp. 519–525, 2016.
- [44] O. Alshorman, A. Alshorman, "A review of intelligent methods for condition monitoring and fault diagnosis of stator and rotor faults of induction machines", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, n° 4, pp. 2820–2830, 2021.
- [45] M. Defdaf, F. Berrabah, A. Chebabhi, B. D. E. Cherif, "A new transform discrete wavelet technique based on artificial neural network for induction motor broken rotor bar faults diagnosis", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, n° 4, pp. e12807, 2021.
- [46] T. Ameid, A. Menacer, H. Talhaoui, Y. Azzoug, "Discrete wavelet transform and energy eigenvalue for rotor bars fault detection in variable speed field-oriented control of induction motor drive", *ISA Transactions*, vol. 79, pp. 217–231, 2018.
- [47] H. Cherif et al., "Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor", *Energy*, vol. 212, pp. 118684, 2020.

- [48] R. G. C. Cunha, E. T. da Silva, C. M. de Sá Medeiros, "*Machine learning and multiresolution decomposition for embedded applications to detect short-circuit in induction motors*", *Computers in Industry*, vol. 129, pp. 103461, 2021.
- [49] S. Merahi, N. Hamdi, "*Diagnostic de défauts des machines électriques*", *Revue des Sciences et de la Technologie*, 2020.
- [50] L. Labiod, F. Boutadjine, "*Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones résultats expérimentaux et de simulation*", *Revue Électrotechnique*, 2019.
- [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.

يسمح للأستاذ المشرف علال عبد الرحيم
باستعمال نتائج هذه الدراسة