

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE - BOUIRA



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Électrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

**Diagnostic des défauts d'excentricité
dans les machines asynchrones à cage par
l'analyse spectrale**

Présenté par :

ADJOUDJ Ahcene

HIDRA Djamel

Devant le Jury composé de :

Soutenu le : 22/06/2026

Mr. S. MOUASSA	M.C.A	Univ. de Bouira (Président)
Mme N. YASSA	Pr	Univ. de Bouira (Examinatrice)
Mr. A. BOUZIDA	Pr	Univ. de Bouira (Encadreur)

Année universitaire : 2025–2026

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur : **Pr. BOUZIDA Ahcene**, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés, ses orientations pertinentes ainsi que ses encouragements constants, qui ont contribué de manière significative à l'élaboration et à l'aboutissement de ce mémoire.

Avec nos sincères remerciements.

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، أحمدته سبحانه وأشكره على توفيقه لي لإتمام دراستي وإنجاز هذا العمل. أتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى والدي حفظهما الله، على صبرها ودعائها ودعمها المتواصل طوال سنوات دراستي، فجزاها الله عني خير الجزاء. كما أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى الأستاذة عقون غنية وتوجيهاتها القيمة، وإلى جميع الأساتذة الذين ساهموا في تكويني العلمي طوال مساري الجامعي. كما أشكر إخوتي وأخواتي وجميع أصدقائي، وكل من ساعدني من قريب أو بعيد في إتمام دراستي وإنجاز هذه المذكرة.

عجوج أحسن

إلى والدي الغالية، التي كان صبرها وتضحياتها مصدر إلهام لي دائماً، أهدي هذا العمل بكل نخر وامتنان. إلى زوجتي، شريكة حياتي اليومية، أشكرك على صبرك ودعمك المستمر وثقتك بي، والتي كانت سبباً في مواصلة الطريق دون تراجع.

إلى ابنتي الصغيرة، مصدر الفرح والدافع، أسأل الله أن يكون هذا النجاح حافزاً لها للإيمان بأحلامها والسعي لتحقيقها.

إلى إخوتي وأخواتي، أشكركم على تشجيعكم ونصائحكم ووقوفكم الدائم معي خلال سنوات الجهد والدراسة. إلى جميع من أحب، أهدي هذا العمل عربون امتنان على ما قدمتموه لي من حب ودعم وقوة.

حيدرة جمال

Résumé

Le défaut d'excentricité dans les machines asynchrones à cage d'écureuil est l'un des défauts mécaniques les plus fréquents. Il se caractérise par un décalage entre l'axe du rotor et celui du stator, et se divise en excentricité statique et dynamique. Ce mémoire présente une méthode de diagnostic basée sur l'analyse spectrale des signaux électriques (courant statorique) et vibratoires. L'analyse spectrale, notamment la technique MCSA (analyse spectrale du courant du moteur), permet de détecter l'apparition de raies latérales autour de la fréquence fondamentale et de ses harmoniques. Ces raies, dont les fréquences caractéristiques sont fonction du nombre de pôles, du glissement et de la géométrie de la machine, constituent des indicateurs fiables du type et du degré d'excentricité. Des simulations et validations expérimentales sont proposées pour établir une stratégie de surveillance non invasive et temps réel. Ce travail vise à fournir un outil pratique pour la maintenance prédictive des machines asynchrones.

Mots clés : machine asynchrone à cage, excentricité statique, excentricité dynamique, analyse du courant statorique, transformée de Fourier rapide, analyse spectrale.

Abstract

Eccentricity fault is a common defect in squirrel-cage induction machines, resulting from a misalignment between the rotor and stator axes. It is classified into static eccentricity and dynamic eccentricity. This memo focuses on diagnosing such faults using spectral analysis of electrical and vibration signals, particularly Motor Current Signature Analysis (MCSA) and vibration spectrum analysis. The fault introduces characteristic sidebands around the supply frequency and its harmonics, as well as specific frequency components in the vibration spectrum. Based on mathematical modeling, simulation, and experimental validation, the type and severity of eccentricity can be accurately identified. These spectral features enable non-invasive, real-time monitoring for predictive maintenance. This work presents a systematic framework for extracting reliable diagnostic indicators from spectral data.

Keywords : squirrel-cage induction machine, static eccentricity, dynamic eccentricity, stator current analysis, Fast Fourier Transform, spectral analysis.

الملخص

يُعد خلل اللامركزية (الانحراف المركزي) من الأعطال الشائعة في الآلات غير المتزامنة ذات القفص السنجابي، وينشأ نتيجة عدم تطابق محور الدوار مع محور الجزء الثابت، وينقسم إلى نوعين: اللامركزية الساكنة واللامركزية الديناميكية. يركز هذا البحث على تشخيص هذا الخلل باستخدام تحليل الطيف للإشارات الكهربائية والميكانيكية، خاصة تحليل طيف التيار (MCSA) وطيف الاهتزازات. يتميز الخلل بظهور توافقيات جانبية حول التردد الأساسي للتغذية وباقي التوافقيات التوافقية، بالإضافة إلى تعديلات في طيف الاهتزاز عند ترددات محددة. اعتماداً على النمذجة الرياضية والمحاكاة أو التجارب العملية، يمكن تحديد نوع وشدة اللامركزية بدقة، مما يسمح بالصيانة الوقائية وتجنب التوقف المفاجئ. تهدف هذه المذكرة إلى تقديم إطار منهجي لتحليل هذه التوافقيات واستخراج مؤشرات تشخيصية موثوقة.

الكلمات المفتاحية: الآلة غير المتزامنة ذات القفص، اللامركزية الساكنة، اللامركزية الديناميكية، تحليل تيار الجزء الثابت، تحويل فورييه السريع، التحليل الطيفي.

Liste des symboles

MAS	Machine asynchrone.
F.E.M	Force électromotrice.
MCSA	Motor Current Signature Analysis.
FFT	Fast Fourier Transform.
Exc	Excentricité.
ES	Excentricité statique.
ED	Excentricité dynamique.
N_r	Vitesse de rotation du rotor.
N_s	Vitesse de rotation du stator.
g	Glissement.
f_s	Fréquence de synchronisme.
f_r	Fréquence de rotation du rotor.
P	Nombre de paires de pôles.
ω	Fréquence angulaire (pulsation).
f	Fréquence en Hz.
φ	Phase du mouvement par rapport à un repère temporel.
ν	Ordre des harmoniques temporelles.
$\emptyset$	Nombre de spires par phase.
θ	Position angulaire.
C	Couple mécanique.
f_{cc}	Fréquence caractéristique de court-circuit statorique.
f_{ecc}	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité.
H	Champ magnétique.
N_b	Nombre de barres rotoriques.
B	Induction magnétique.

Table des matières

Remerciements

الشكر والتقدير

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des symboles

Liste des figures iv

Liste des tableaux vi

Introduction générale 1

I Généralités sur la Machine Asynchrone (MAS) 3

I.1 Introduction 3

I.2 Définitions 3

I.2.1 La Maintenance 3

I.2.1.1 Maintenance Corrective 4

I.2.1.2 Maintenance Préventive 4

I.2.1.2.1 Maintenance préventive systématique 4

I.2.1.2.2 Maintenance préventive conditionnelle 4

I.2.2 Le Diagnostic 5

I.3 Généralités sur la machine asynchrone 6

I.4 Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage 6

I.4.1 Le stator 7

I.4.1.1 Circuit magnétique 8

I.4.2 Le rotor 8

TABLE DES MATIÈRES

I.4.3	Les paliers	10
I.5	Étude des défaillances de la machine asynchrone	10
I.6	Fonctionnement de la machine	11
I.7	Défaillances des machines asynchrones	12
I.7.1	Défaillance d'ordre électrique	16
I.7.1.1	Défauts statoriques	16
I.7.2	Défaillance d'ordre mécanique	17
I.7.2.1	Défauts rotoriques	18
I.7.2.2	Cassure des barres	18
I.7.2.3	Défaut d'excentricité	18
I.7.2.3.1	L'excentricité dynamique	19
I.7.2.3.2	L'excentricité statique	19
I.7.2.3.3	L'excentricité mixte	20
I.7.2.4	Effets de la charge	20
I.7.2.5	Défaut dû au palier	21
I.8	Les causes des défauts	22
I.9	Conséquences des défauts	24
I.10	Conclusion	24
II	Méthodes de Diagnostic des Défauts	26
II.1	Introduction	26
II.2	Méthodes de traitement des signaux	27
II.2.1	Transformée de Fourier discrète	27
II.2.2	Transformée de Fourier rapide	28
II.3	Méthodes de diagnostic des défauts	28
II.3.1	Analyse temps-fréquence et temps-échelle	29
II.3.1.1	Analyse temps-fréquence	29
II.3.2	Analyse temps-échelle	30
II.3.3	Analyse spectrale	31
II.3.4	Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park	31
II.3.5	Technique additionnelle	32
II.3.6	Diagnostic de défaut par le suivi des grandeurs mesurables	34
II.3.6.1	Analyse fréquentielle des courants statoriques	35
II.3.6.2	Analyse fréquentielle du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation	36
II.3.6.3	Analyse spectrale de la puissance instantanée	37
II.4	Conclusion	38

III Étude expérimentale à présence des défauts d'excentricité dynamique par analyse spectrale	39
III.1 Introduction	39
III.2 Étude expérimentale du défaut d'excentricité dynamique	41
III.2.1 Description du banc d'essai	41
III.2.2 Acquisition des signaux	45
III.2.3 Étude pratique des défauts mécaniques	45
III.2.4 Étude de l'excentricité dynamique	46
III.2.5 Étude de la vitesse rotorique	51
III.2.5.1 Élimination des ondulations pour la machine saine et avec défaut	53
III.2.6 Étude du couple mécanique	54
III.3 Application de l'analyse spectrale au diagnostic de défauts des machines asynchrones	57
III.3.1 Analyse de la machine saine sous différents niveaux de charge	58
III.3.2 Analyse de la machine avec défaut d'excentricité sous différents niveaux de charge	60
III.4 Influence de la variation de charge sur le diagnostic (Superposition et Comparaison)	62
III.4.1 Analyse, calcul et superposition sous charge faible (30%)	62
III.4.2 Analyse, calcul et superposition sous charge moyenne (50%)	63
III.5 . Conclusion	65
Conclusion Générale	67
Bibliographie	70

Table des figures

I.1	Constitution générale d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	7
I.2	Constitution du stator d'un moteur asynchrone triphasé [8]	8
I.3	Structure d'un rotor à cage d'écureuil	9
I.4	Répartition statistique des défaillances des machines asynchrones de grande puissance (100 kW à 1 MW), selon une étude réalisée en 1999	10
I.5	Répartition statistique des défaillances des machines asynchrones de grande puissance (100 kW à 1 MW), selon une étude réalisée en 2008	11
I.6	Représentation du champ tournant dans une machine asynchrone triphasée .	12
I.7	Classification des défauts de la machine asynchrone	14
I.8	Classification des défauts selon leur emplacement dans la machine asynchrone	15
I.9	Défauts statoriques	17
I.10	Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur .	17
I.11	Cassure de barres	18
I.12	Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte	20
I.13	Dimensions du roulement à bille	21
II.1	Analyse temps-fréquence du courant statorique sous variation du couple de charge, dans le cas d'un défaut de cassure de barre rotorique	30
II.2	Principe de surveillance par analyse spectrale	31
II.3	Vecteur de Park des courants statoriques (résultats expérimentaux)	32
II.4	Tension composée U_{ab} après déconnexion de la source d'alimentation (résultats expérimentaux avec variateur de vitesse) : a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées	33
II.5	Spectre de la tension composée U_{ab} après déconnexion de la source d'alimentation (résultats expérimentaux) : a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées	34
II.6	Spectre du courant statorique (résultats de simulation)	36
II.7	Spectre du couple électromagnétique (résultats de simulation)	36
II.8	Spectre de la puissance instantanée [10] : a) rotor sain, b) rotor avec barre cassée	37

TABLE DES FIGURES

III.1 Coupe transversale d'un moteur asynchrone : (a) état sain, (b) excentricité statique, (c) excentricité dynamique.	40
III.2 Machine asynchrone utilisée dans le banc d'essai.	42
III.3 Vue générale du banc d'essai.	43
III.4 Carte pour le conditionnement des signaux	44
III.5 Schéma de montage	46
III.6 Courants statoriques à la sortie du variateur	47
III.7 Tension composée à la sortie du variateur	49
III.8 Vitesse de rotation rotorique (saine et avec défaut)	52
III.9 Vitesse rotorique moyenne après élimination des ondulations machine (saine et avec défaut)	54
III.10 Courbes du couple mécanique pour la machine saine et la machine avec défaut (30 %, 50 %, 75 %).	55
III.11 Valeurs moyennes du couple mécanique après élimination des ondulations .	56
III.12 Spectre MCSA de la machine saine sous charge faible (30%).	58
III.13 Spectre MCSA de la machine saine sous charge moyenne (50%).	59
III.14 Spectre MCSA de la machine saine sous charge forte (75%).	59
III.15 Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge faible (30%).	60
III.16 Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge moyenne (50%). . .	61
III.17 Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge forte (75%).	61
III.18 Superposition des spectres MCSA (Saine vs Défaut) à charge faible.	63
III.19 Superposition des spectres MCSA (Saine vs Défaut) à charge moyenne. . .	64

Liste des tableaux

I.1	Les causes des défauts de la machine asynchrone	23
III.1	Caractéristiques principales de la machine asynchrone à cage.	42
III.2	Comparatif entre machine saine et avec défaut (N_r, g, C_n).	56
III.3	Évolution des couples mécanique en fonction de la charge appliqué	57
III.4	Résultat comparatif ($f_s \mp f_r$) d'analyse spectrale de deux machines saine et avec défaut pour plusieurs charges 30%, 50% et 75%.	62

Introduction générale

Grâce à sa robustesse, sa fiabilité et sa durée de vie élevée, le moteur asynchrone occupe une place importante dans le domaine industriel. Il est largement utilisé dans de nombreuses applications, même dans des conditions de fonctionnement difficiles. Avec un entretien régulier et une surveillance adaptée, ce type de moteur peut fonctionner pendant plusieurs années avec un faible risque de défaillance.

Aujourd'hui, l'efficacité énergétique constitue un critère essentiel dans le secteur industriel. Les moteurs asynchrones permettent de convertir une partie importante de l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique utile, ce qui contribue à réduire les pertes, la consommation énergétique ainsi que les coûts d'exploitation. Cette efficacité dépend de plusieurs paramètres, notamment la conception du moteur, sa puissance, son régime de fonctionnement, la charge appliquée et le type d'application entraînée. Dans ce contexte, les moteurs électriques sont classés selon des niveaux de rendement établis par les normes internationales d'efficacité énergétique, allant de IE1 à IE4. Plus le niveau de rendement est élevé, plus la consommation énergétique est réduite.

De plus, la machine asynchrone représente une solution économique pour les industriels grâce à sa conception simple, à son coût relativement faible, à sa disponibilité et à sa facilité d'entretien. Comparée à d'autres types de machines électriques, elle ne nécessite généralement pas de dispositifs complexes pour son démarrage, puisqu'elle peut être directement raccordée au réseau électrique. C'est pourquoi elle est couramment utilisée dans les applications ne nécessitant pas une grande précision de vitesse, telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les convoyeurs.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, la machine asynchrone n'est pas totalement exempte de défauts. Elle peut être affectée par des anomalies d'origine électrique, mécanique ou magnétique, touchant le stator, le rotor ou les deux à la fois. Ces défauts peuvent provenir de problèmes de fabrication, d'une mauvaise utilisation, d'une surcharge, de conditions d'alimentation défavorables ou encore de l'environnement de fonctionnement, notamment dans les milieux corrosifs, humides ou chimiques.

Lorsqu'un défaut apparaît dans une machine électrique, il peut entraîner une dégradation progressive de ses performances, une diminution de sa durée de vie, voire un arrêt brutal de la chaîne de production. Un tel arrêt peut provoquer des pertes économiques

importantes, liées à la baisse de production, aux retards de livraison, aux frais de réparation et à l'immobilisation des équipements. C'est pourquoi la détection précoce des défauts est devenue une étape indispensable pour assurer la continuité du fonctionnement, améliorer la sécurité et optimiser les opérations de maintenance.

Les systèmes de surveillance et de diagnostic occupent donc une place importante dans l'industrie moderne. Ils permettent de suivre l'état de fonctionnement des machines, de détecter les anomalies à un stade précoce et d'aider les opérateurs dans la prise de décision. Ces systèmes ne remplacent pas l'intervention humaine, mais ils constituent un outil d'aide efficace pour accroître la disponibilité des équipements et réduire les risques de pannes imprévues.

Ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts d'excentricité dans une machine asynchrone à cage. L'étude repose sur l'analyse spectrale des courants statoriques, à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT), ainsi que de la méthode MCSA-FFT, qui utilise l'analyse du courant statorique pour la détection des défauts.

Afin de réaliser cette étude, le mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre expose les notions générales relatives à la machine asynchrone à cage, sa constitution ainsi que les principaux défauts d'origine électrique et mécanique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des défauts d'excentricité du rotor et aux méthodes utilisées pour leur détection.

Enfin, le troisième chapitre présente la partie expérimentale, basée sur le traitement des signaux et l'analyse spectrale par FFT. Le mémoire se termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

Généralités sur la Machine Asynchrone (MAS)

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter quelques définitions relatives à la maintenance. Ensuite, nous explorerons et analyserons la structure de la machine asynchrone, son principe de fonctionnement, ainsi que ses principaux composants internes. Nous aborderons également les facteurs influençant les performances de cette machine, ainsi que les défauts d'ordre électrique et mécanique susceptibles de l'affecter. L'objectif de ce chapitre est donc de fournir une compréhension globale de la machine asynchrone, tout en mettant en évidence l'importance de la connaissance de sa structure, de son fonctionnement et des défauts potentiels pouvant apparaître au cours de son exploitation.

I.2 Définitions

I.2.1 La Maintenance

Le rôle principal d'un ingénieur consiste à assurer la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire à garantir leur fonctionnement lorsqu'ils sont mis en service. Cette mission relève principalement de la maintenance, qui occupe une place essentielle dans la continuité et la fiabilité des installations industrielles. Selon l'Association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est définie comme «l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise» [4].

La maintenance se classe généralement en deux grandes catégories :

- la maintenance corrective
- la maintenance préventive, qui peut être systématique ou conditionnelle.

I.2.1.1 Maintenance Corrective

Il s'agit de l'ensemble des activités réalisées à la suite de la défaillance d'un bien. En d'autres termes, la maintenance dite « corrective » est effectuée après la détection d'une panne. Elle s'applique généralement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance est réservé aux équipements peu coûteux, non stratégiques pour la production, et dont la panne présente peu d'incidence sur la sécurité.

I.2.1.2 Maintenance Préventive

Ce type de maintenance a pour objectif de minimiser le risque d'apparition des défauts. Elle permet d'éviter ou de limiter les pannes des équipements pendant leur utilisation. La mise en œuvre de cette maintenance repose sur la décomposition des systèmes en éléments constitutifs, tels que les roulements, le circuit magnétique, etc.

Les objectifs de la maintenance préventive sont les suivants :

- augmenter la durée de vie des équipements
- réduire les coûts de maintenance
- éliminer ou limiter les causes pouvant provoquer des accidents graves.

I.2.1.2.1 Maintenance préventive systématique La maintenance systématique est une forme de maintenance préventive planifiée dans le temps. Elle comprend des opérations telles que le graissage, le refroidissement, le nettoyage, le dégraissage ou le calibrage. Elle a pour objectif de prévenir les causes de défaillances et de limiter la dégradation des éléments du système. En règle générale, la maintenance préventive systématique est appliquée aux éléments dont le coût de défaillance est élevé, mais dont le remplacement reste relativement peu coûteux. À titre d'exemple, elle peut concerner le remplacement périodique de l'huile, des filtres, des courroies, des roulements ou des paliers de rotation.

I.2.1.2.2 Maintenance préventive conditionnelle La maintenance préventive conditionnelle est une forme de maintenance fondée sur la surveillance de l'état réel des équipements. Elle est mise en œuvre lorsqu'un symptôme particulier est détecté, tel qu'une élévation de la température, une augmentation des vibrations, une pression anormale ou un jeu excessif. Son objectif est de prévoir l'apparition d'une panne et d'intervenir avant que celle-ci ne se produise.

Cette maintenance repose sur le suivi de grandeurs physiques mesurables. Elle se déclenche dès qu'une grandeur physique mesurée, telle que la température ou la pression, dépasse une valeur limite prédéfinie appelée seuil. Elle permet ainsi d'agir au moment opportun, en fonction de l'état réel de la machine, contrairement à la maintenance systématique qui est réalisée selon un calendrier fixe.

La maintenance préventive conditionnelle s'applique notamment aux composants dont le remplacement est coûteux et dont l'état peut être évalué par des techniques de surveillance non destructives. Parmi ces techniques, on peut citer l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile, la mesure de la température, la mesure de la pression, ainsi que l'analyse du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance.

Les principaux outils et signaux utilisés dans ce type de maintenance sont :

- La température et la thermographie infrarouge, utilisées notamment pour surveiller l'échauffement des arbres, des roulements et des paliers ;
- La pression et le débit, particulièrement dans les systèmes comportant des paliers ou des circuits de lubrification ;
- L'analyse d'huile, appliquée aux roulements, aux paliers et aux engrenages afin de détecter l'usure ou la présence de particules métalliques ;
- L'analyse vibratoire, qui permet de détecter les déséquilibres, les défauts de roulements, les défauts de paliers, les défauts d'engrenages ainsi que les jeux mécaniques ;
- L'analyse des grandeurs électriques et mécaniques, telles que le courant statorique, le couple, la vitesse et la puissance.

Ainsi, l'élément surveillé n'est remplacé ou réparé que lorsqu'il présente des signes de dégradation ou d'usure susceptibles d'influencer les performances de fonctionnement. La mise en œuvre de cette maintenance nécessite des moyens de surveillance adaptés ainsi qu'un personnel qualifié, capable d'exploiter les mesures et d'interpréter les résultats de diagnostic.

Il convient enfin de distinguer la maintenance préventive conditionnelle de la maintenance corrective. Lorsqu'un élément est déjà défectueux, sa réparation ou son remplacement relève de la maintenance corrective. En revanche, lorsqu'un élément n'est pas encore défaillant, mais présente un état de dégradation avancé, l'intervention réalisée sur celui-ci est considérée comme une opération de maintenance préventive.

I.2.2 Le Diagnostic

En général, le diagnostic est un ensemble d'étapes mises en œuvre afin d'identifier les causes les plus probables d'une panne. Il repose principalement sur deux fonctions

essentielles : la détection et la localisation des défauts [4]. La détection permet de signaler la présence d'une anomalie dans le système, tandis que la localisation vise à déterminer la nature du défaut ainsi que son emplacement. L'objectif du diagnostic est donc de repérer les défauts dès leur apparition, afin d'éviter leur évolution vers une panne complète de l'installation industrielle.

I.3 Généralités sur la machine asynchrone

La machine asynchrone, également appelée machine à induction, est une machine électrique alimentée par un système de tensions et de courants alternatifs. En 1831, Michael Faraday (1791-1867) découvrit le phénomène de l'induction électromagnétique. Par la suite, Nikola Tesla (1856-1943) exploita ce principe pour concevoir le moteur à induction. Depuis, de nombreux perfectionnements ont été apportés à cette machine, donnant naissance à la machine asynchrone que nous connaissons aujourd'hui [1].

La machine asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans le domaine industriel. Cet intérêt croissant s'explique par ses nombreux avantages, notamment sa puissance élevée, sa robustesse, sa simplicité de mise en œuvre, sa fiabilité ainsi que son faible coût [2].

Cependant, le moteur asynchrone, comme tout système électrique, n'est pas infailible et peut être exposé à des dysfonctionnements ou à des pannes intempestives. Il peut être soumis à de multiples contraintes internes ou externes d'origine mécanique, électrique et/ou magnétique, telles que les surcharges, les défauts d'alimentation, l'excentricité du rotor ou encore l'usure des roulements à billes. Ces contraintes peuvent altérer le fonctionnement de la machine, provoquer des détériorations, entraîner une diminution de ses performances et réduire sa durée de vie [3].

I.4 Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage

La connaissance des différents composants d'une machine asynchrone permet de mieux comprendre son principe de fonctionnement. La machine asynchrone est constituée principalement d'une partie fixe, appelée stator, et d'une partie tournante, appelée rotor, comme le montre la figure I.1. Seuls les enroulements statoriques sont raccordés au réseau d'alimentation triphasé, dont les tensions, d'amplitude et de fréquence donnée, créent un champ magnétique tournant dans l'entrefer. Contrairement aux machines synchrones et aux machines à courant continu, le moteur asynchrone ne possède ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Dans le cas d'un rotor à cage d'écureuil, les conducteurs rotoriques sont court-circuités aux extrémités par deux anneaux conducteurs. Le flux rotorique nécessaire à

la production du couple électromagnétique est ainsi obtenu par induction électromagnétique [5].

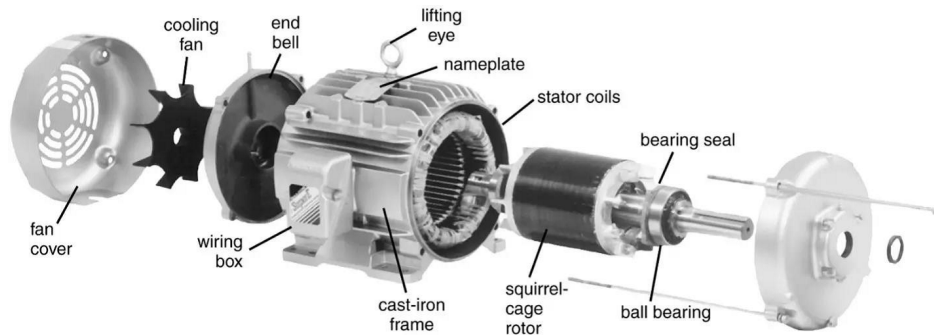


Fig. I.1: Constitution générale d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

Bien que le moteur asynchrone triphasé à cage soit un système relativement complexe, il peut être décomposé en trois principaux sous-systèmes :

I.4.1 Le stator

Le stator d'une machine asynchrone est constitué d'un empilement de tôles d'acier destinées à supporter les enroulements statoriques. Pour les machines de petites dimensions, ces tôles sont généralement découpées en une seule pièce, tandis que, pour les machines de grandes dimensions, elles sont réalisées en plusieurs sections. Elles sont habituellement recouvertes d'un vernis isolant afin de réduire les effets des courants de Foucault [6], [7].

Les tôles sont ensuite assemblées par vissage ou par soudage afin de former le circuit magnétique du stator. Après cette étape d'assemblage, les bobinages statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être imbriqués, ondulés ou concentriques. Dans les machines asynchrones, le bobinage concentrique est fréquemment utilisé [6], [7].

Dans les machines de grandes puissances, les encoches peuvent recevoir directement des conducteurs constitués de barres ou de plaques de cuivre de différentes sections. L'isolation entre le bobinage et le circuit magnétique est assurée par divers matériaux isolants, choisis selon les exigences de fonctionnement de la machine asynchrone. Le stator comporte également une plaque à bornes, permettant le raccordement de la machine au réseau d'alimentation [6], [7].

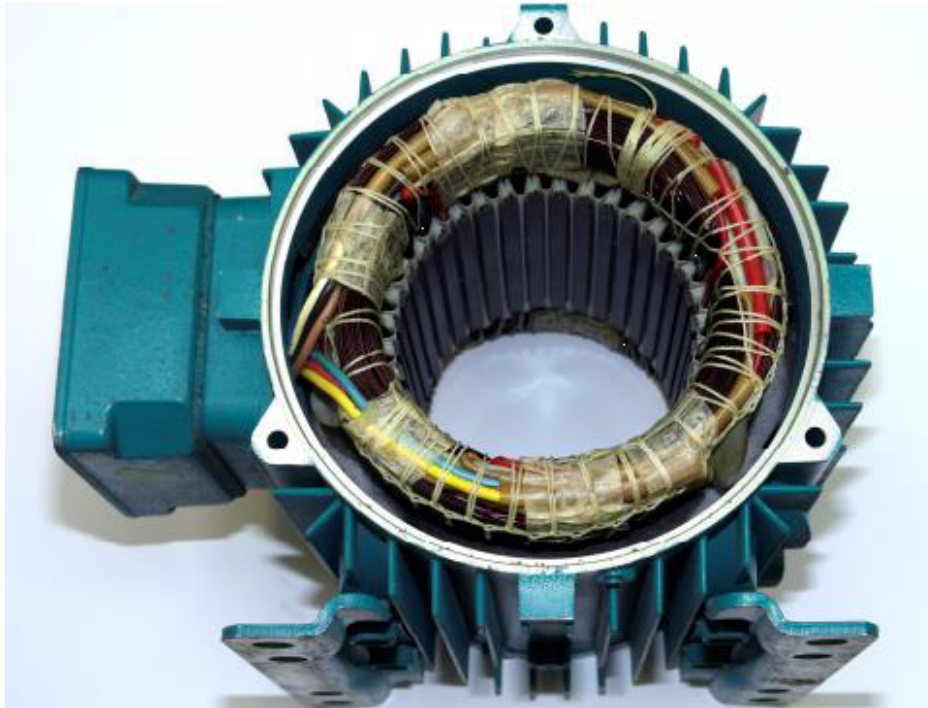


Fig. I.2: Constitution du stator d'un moteur asynchrone triphasé [8]

I.4.1.1 Circuit magnétique

Le circuit magnétique joue un rôle essentiel dans la machine asynchrone. Il permet de guider les lignes d'induction magnétique, de supporter les conducteurs du bobinage et d'assurer l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements vers les zones de refroidissement. Il doit donc présenter à la fois de bonnes propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques suffisantes et une conductivité thermique appropriée.

Les pertes les plus importantes dans le circuit magnétique sont les pertes fer, dues principalement au phénomène d'hystérésis et aux courants de Foucault. Afin de réduire ces pertes, le circuit magnétique est généralement réalisé à partir d'un empilement de tôles minces en acier au silicium, dont l'épaisseur est inférieure à 1 mm. Plus la teneur en silicium est élevée, plus les pertes fer sont réduites. Cependant, l'augmentation de cette teneur entraîne une diminution de la perméabilité magnétique.

I.4.2 Le rotor

Comme le stator, le circuit magnétique du rotor est constitué d'un empilement de tôles d'acier. Ces tôles sont généralement de même nature que celles utilisées dans le stator. Selon leur construction, les rotors des machines asynchrones se classent en deux grandes familles : les rotors bobinés et les rotors à cage d'écureuil.

Dans le cas du rotor bobiné, la structure est proche de celle de l'enroulement

statorique. Les enroulements sont placés dans les encoches du rotor, puis raccordés à un système de bagues et de balais fixés sur l'arbre de la machine. Ce dispositif permet d'accéder aux phases rotoriques et d'y connecter éventuellement des résistances externes.

Le rotor à cage d'écureuil est constitué de barres conductrices, généralement en cuivre pour les moteurs de grande puissance et en aluminium pour les moteurs de faible ou de moyenne puissance. Ces barres sont logées dans les encoches du rotor et sont reliées à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs, appelés anneaux de court-circuit. L'ensemble formé par les barres conductrices et les anneaux de court-circuit constitue la cage rotorique [6].

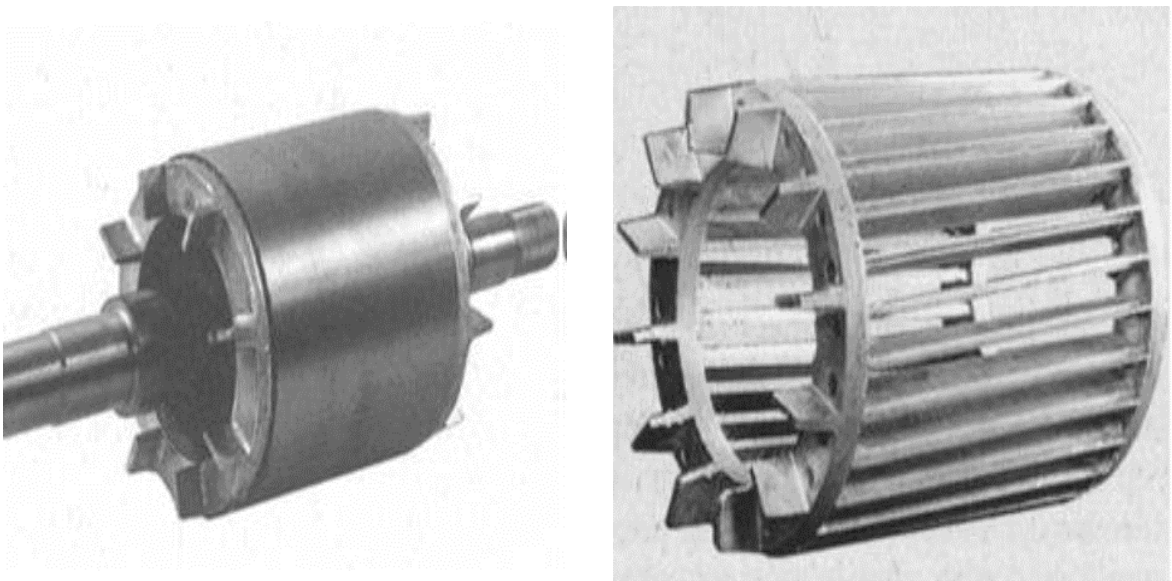


Fig. I.3: Structure d'un rotor à cage d'écureuil

Tous les rotors à cage ne présentent pas la même structure. Il existe plusieurs configurations selon la puissance du moteur, ses dimensions et son domaine d'application. En général, cette structure comprend l'arbre mécanique, l'empilement des tôles magnétiques, les barres conductrices ainsi que les deux anneaux de court-circuit. Dans de nombreuses machines, les barres rotoriques sont légèrement inclinées afin de réduire les harmoniques, les vibrations et le bruit, notamment lors du démarrage ou des phases d'accélération.

En général, il n'est pas nécessaire d'assurer une isolation électrique entre les barres conductrices et les tôles magnétiques, car la tension induite dans chaque barre reste faible. De plus, la faible résistivité du matériau utilisé pour la cage rotorique limite la circulation des courants dans les tôles du rotor. Toutefois, en présence d'un défaut, tel qu'une rupture de barre rotorique, la répartition des courants peut être perturbée, ce qui influence le comportement électromagnétique et mécanique de la machine [7].

Le rotor peut également comporter des ailettes de ventilation. Celles-ci contribuent à améliorer le refroidissement de la machine et à limiter son échauffement pendant le

fonctionnement.

I.4.3 Les paliers

Les paliers assurent le guidage et la rotation de l'arbre rotorique. Ils sont généralement composés de flasques et de roulements à billes installés sur l'arbre de la machine. Les flasques, généralement réalisés en fonte, sont fixés au carter statorique à l'aide de boulons ou de tiges de serrage. Les roulements permettent de réduire les frottements mécaniques et de garantir une rotation régulière du rotor pendant le fonctionnement de la machine [7].

I.5 Étude des défaillances de la machine asynchrone

Il est difficile d'établir une répartition statistique précise des défaillances des machines électriques, en raison de l'absence d'un système de recensement automatique des pannes et des défauts dans l'ensemble des installations industrielles et des ateliers de maintenance [10].

Depuis les années 1980, de nombreuses études statistiques ont été réalisées afin d'identifier les principaux types de défaillances affectant les machines électriques tournantes [48]. Parmi ces études, deux analyses portant sur les machines de grande puissance (100 kW à 1 MW), réalisées respectivement en 1999 et en 2008, permettent de mettre en évidence la répartition des principaux défauts rencontrés.

Les résultats montrent que les défaillances les plus fréquentes concernent principalement les roulements et le stator, tandis que les défauts du rotor et les autres défaillances représentent une proportion plus faible [48].

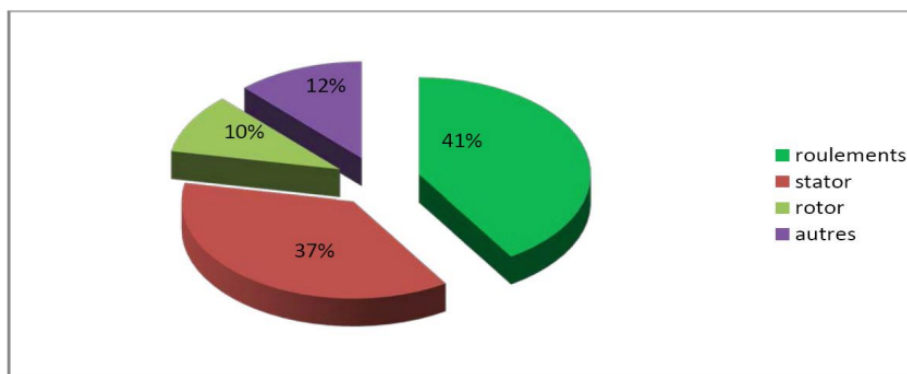


Fig. I.4: Répartition statistique des défaillances des machines asynchrones de grande puissance (100 kW à 1 MW), selon une étude réalisée en 1999

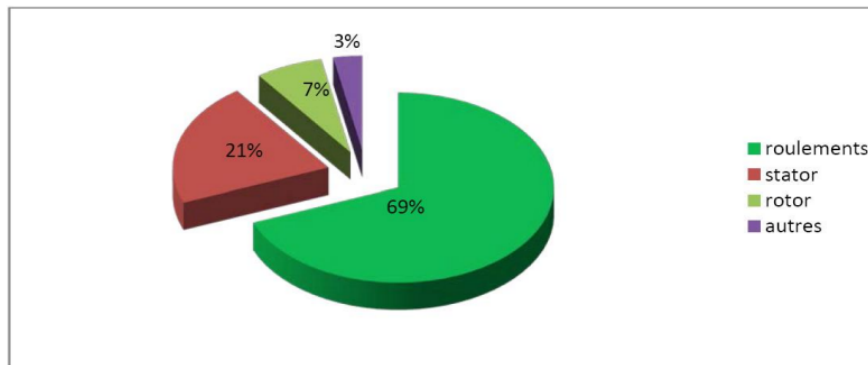


Fig. I.5: Répartition statistique des défaillances des machines asynchrones de grande puissance (100 kW à 1 MW), selon une étude réalisée en 2008

I.6 Fonctionnement de la machine

Le fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur le principe du champ magnétique tournant, produit par l'alimentation triphasée du stator. Celui-ci comporte trois enroulements décalés spatialement de 120° . Lorsqu'ils sont alimentés par un système de tensions alternatives triphasées, ces enroulements créent des champs magnétiques variables et déphasés dans le temps. La combinaison de ces champs donne naissance à un champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine.

Ce champ tournant entraîne le rotor en rotation par induction électromagnétique. Toutefois, le rotor tourne toujours à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ magnétique tournant. Cette différence de vitesse est appelée glissement. C'est précisément cette absence de synchronisme entre la vitesse du champ tournant et celle du rotor qui justifie l'appellation de machine asynchrone.

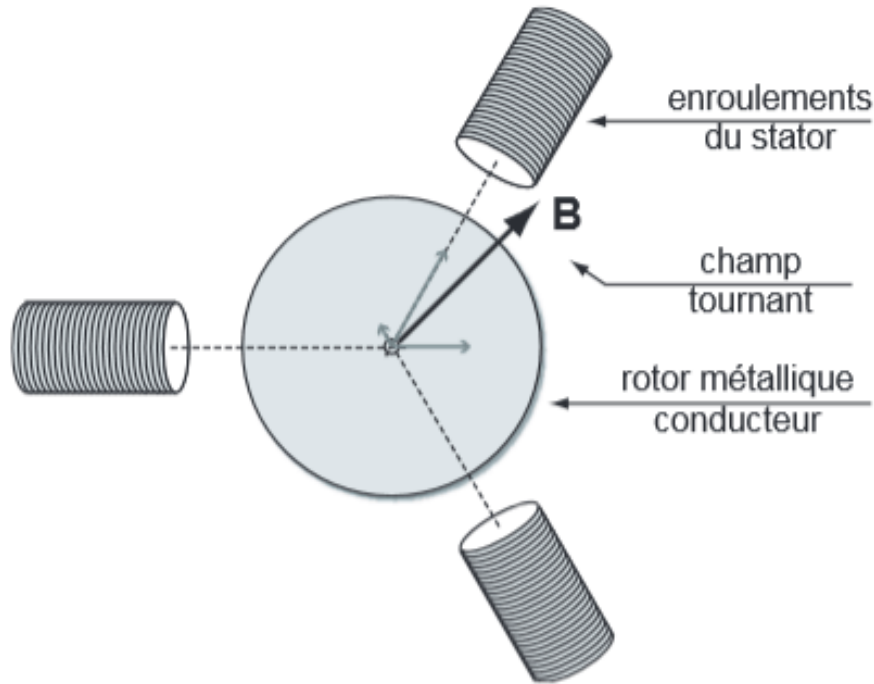


Fig. I.6: Représentation du champ tournant dans une machine asynchrone triphasée

La vitesse du champ tournant, appelée vitesse de synchronisme, dépend principalement de la fréquence d'alimentation du stator et du nombre de paires de pôles de la machine. Elle s'exprime en tours par seconde par la relation suivante [7] :

$$n_1 = \frac{f}{p} \left[\frac{\text{tr}}{\text{s}} \right] \quad (\text{I.1})$$

Où :

- f : est la fréquence d'alimentation
- p : représente le nombre de paires de pôles

Ainsi, la vitesse de synchronisme peut être modifiée soit en agissant sur la fréquence d'alimentation, soit en changeant le nombre de paires de pôles de la machine.

I.7 Défaillances des machines asynchrones

Aujourd'hui, la machine asynchrone occupe une place importante dans les systèmes de commande et les entraînements industriels. Afin d'assurer son bon fonctionnement et de limiter les risques d'arrêt imprévu, il est nécessaire de mettre en place des méthodes de surveillance et de diagnostic permettant de suivre l'évolution de son état. Cette surveillance

peut être réalisée en ligne ou hors ligne, à partir de l'analyse des différentes grandeurs de la machine, telles que le courant, la tension, la vitesse, le couple ou les vibrations.

Les défauts pouvant apparaître dans les machines électriques peuvent avoir plusieurs origines. Ils peuvent être liés à la conception de la machine, aux tolérances de fabrication, aux conditions d'installation, à l'environnement de fonctionnement, à la nature de la charge entraînée ou encore à la qualité du programme de maintenance. Ces facteurs peuvent provoquer une dégradation progressive des performances et conduire, dans certains cas, à une défaillance importante.

Comme toute machine électrique tournante, la machine asynchrone est soumise à des contraintes électromagnétiques, mécaniques et thermiques. Lorsqu'un défaut apparaît, l'équilibre entre ces différentes contraintes peut être perturbé, ce qui favorise l'apparition d'autres défauts secondaires. Les défaillances de la machine asynchrone peuvent être classées en deux grandes catégories : les défaillances d'ordre électrique et les défaillances d'ordre mécanique.

Les sources de défauts peuvent être internes, externes ou liées à l'environnement de fonctionnement, comme le montre la Figure I.7. Les défauts internes sont généralement classés selon leur origine, électrique ou mécanique. Les défauts de roulements et de refroidissement sont souvent associés aux parties mobiles de la machine, car ils sont directement liés au fonctionnement du rotor.

La Figure I.8 présente l'arbre des défauts de la machine asynchrone. Cette représentation permet de classer les défauts selon leur emplacement principal, notamment au niveau du stator et du rotor [6, 11, 12].

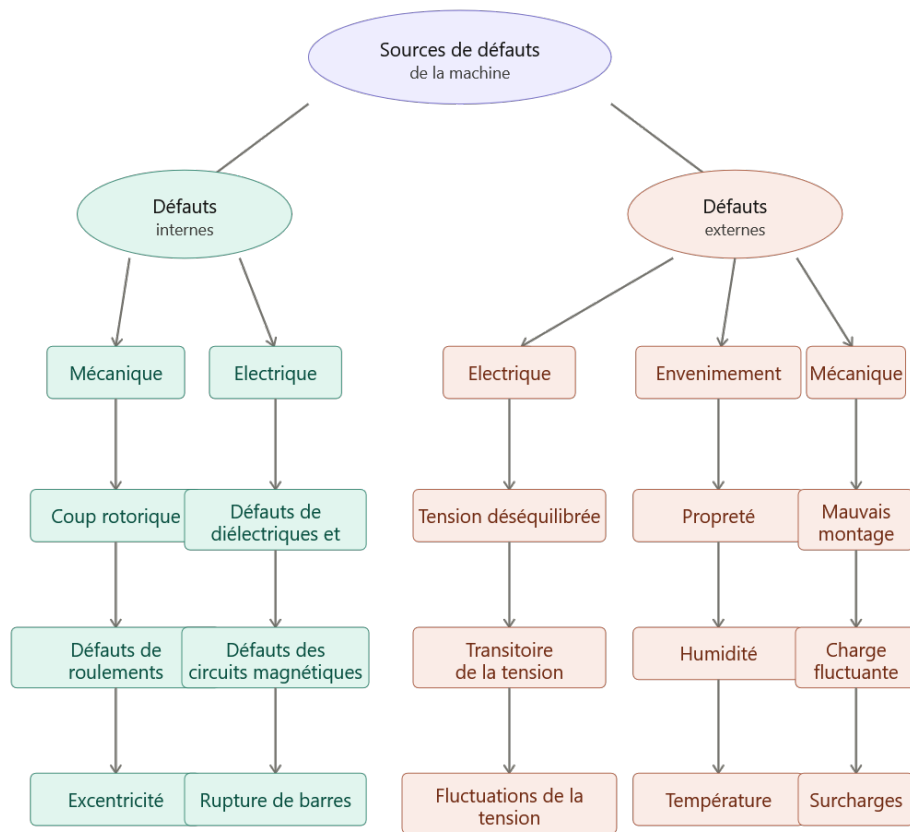


Fig. I.7: Classification des défauts de la machine asynchrone

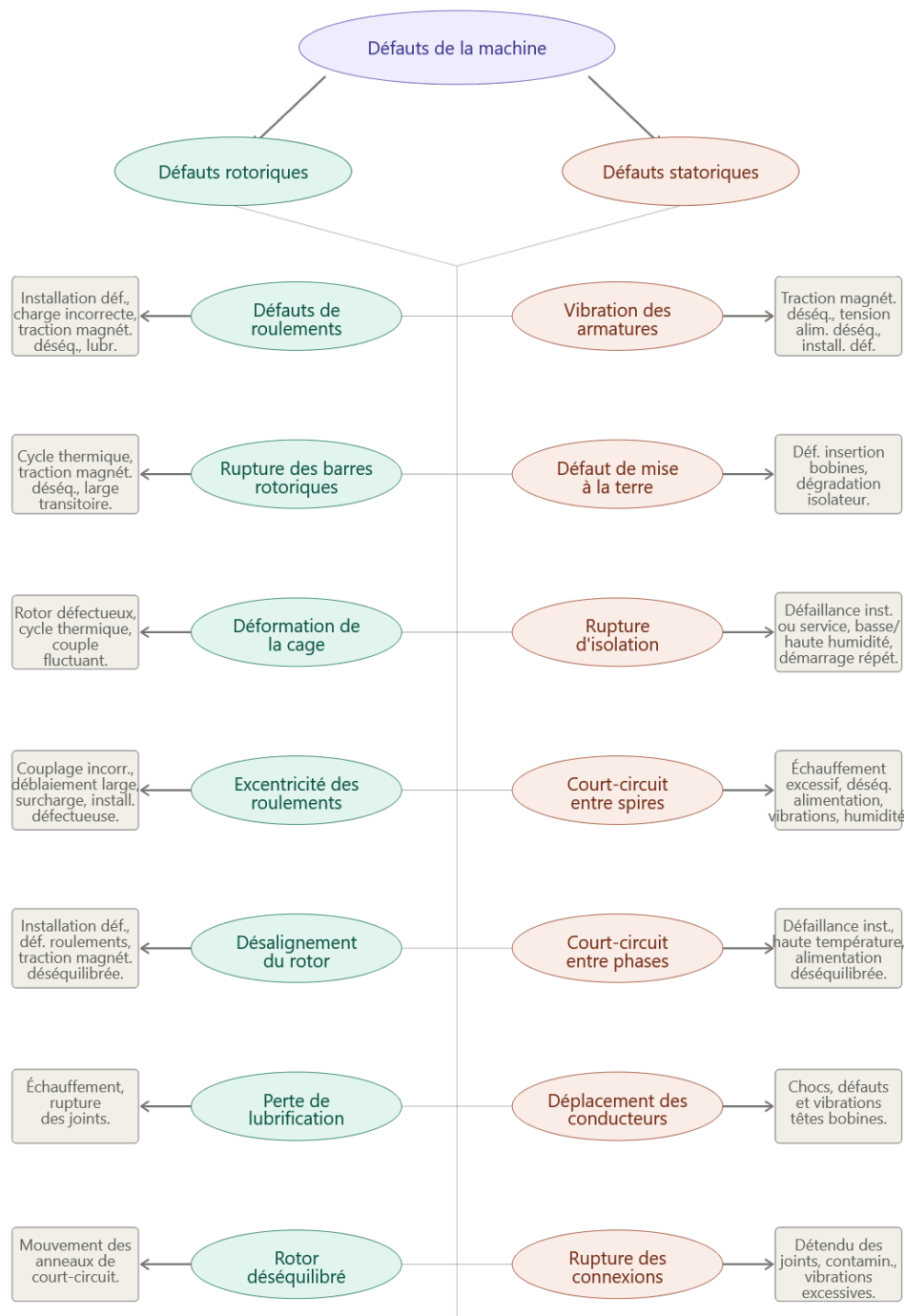


Fig. I.8: Classification des défauts selon leur emplacement dans la machine asynchrone

D'après les deux figures précédentes, les principaux défauts pouvant apparaître dans une machine asynchrone à cage d'écureuil peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les défaillances d'ordre électrique et les défaillances d'ordre mécanique.

I.7.1 Défaillance d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique regroupent l'ensemble des défauts qui affectent principalement les parties électriques de la machine, en particulier les enroulements statoriques. Elles peuvent être provoquées par plusieurs facteurs, tels que les surtensions, la dégradation de l'isolant, l'échauffement excessif du bobinage ou l'apparition de courts-circuits entre spires.

I.7.1.1 Défauts statoriques

Les défauts statoriques apparaissent généralement au niveau des enroulements du stator, comme le montre la Figure I.9. Ils peuvent être dus à des contraintes électriques, thermiques, mécaniques ou environnementales [3]. Parmi les principaux défauts statoriques, on peut citer :

- le court-circuit entre spires d'une même phase
- le court-circuit entre phases ou entre bobines
- la coupure d'une phase
- le défaut du circuit magnétique, comme la rupture des tôles
- le défaut d'isolement par rapport à la masse.

Les études théoriques montrent que l'apparition d'un court-circuit au niveau du stator entraîne un enrichissement du spectre du courant statorique par des composantes fréquentielles supplémentaires. Ces fréquences additionnelles peuvent être exprimées par la relation suivante [13], [14] :

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p}(1 - g) \mp k \right\} \quad (I.2)$$

Où :

- f_{cc} : fréquence de court-circuit ;
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in N$; p = nombre de paires de pôles ; g = glissement ; $k = 1, 2, 3, \dots, K \in N$

Les différents court-circuit sont représentés dans la figure ci-dessous :

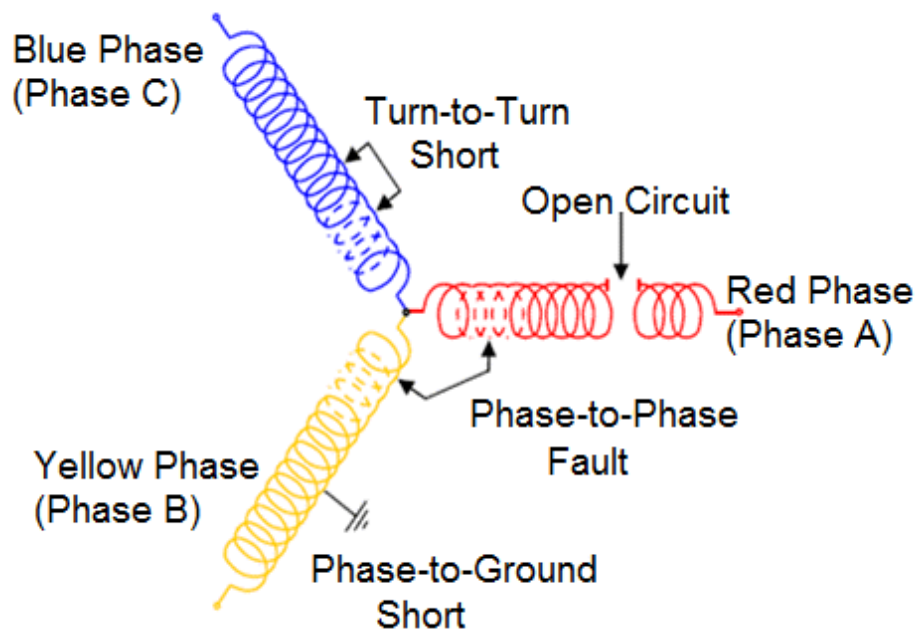


Fig. I.9: Défaits statoriques



Fig. I.10: Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur

I.7.2 Défaillance d'ordre mécanique

Les machines asynchrones sont souvent affectées par des défauts d'ordre mécanique. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des différentes pièces mécaniques de la machine, notamment au niveau des roulements à billes, des flasques, de l'arbre mécanique ou de certains éléments liés au rotor. Ils peuvent entraîner des vibrations, une augmentation du niveau sonore, des fluctuations du couple ainsi qu'une dégradation progressive des performances de la machine. On les citera dans ce qui suit :

I.7.2.1 Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques concernent principalement les éléments constituant le rotor, tels que les barres rotoriques, les anneaux de court-circuit et l'entrefer. En régime permanent, l'analyse du spectre du courant statorique permet de détecter plusieurs anomalies liées au rotor, notamment la rupture des barres, la rupture des anneaux de court-circuit ainsi que les défauts d'excentricité de l'entrefer [13], [14].

I.7.2.2 Cassure des barres

La cassure d'une barre rotorique crée une dissymétrie dans la cage du rotor. Cette dissymétrie fait apparaître un champ magnétique tournant en sens inverse de celui produit par le stator. Par conséquent, des composantes fréquentielles supplémentaires apparaissent dans le courant statorique, ce qui permet de détecter ce type de défaut par analyse spectrale.

Les fréquences caractéristiques associées à la rupture des barres rotoriques sont données par la relation suivante :

$$f_{bc} = (1 \mp 2kg) f_s \quad (I.3)$$

avec f_{bc} : fréquence de barre cassée, g : glissement, f_s : fréquence d'alimentation statorique, $k = 1, 2, 3, \dots$

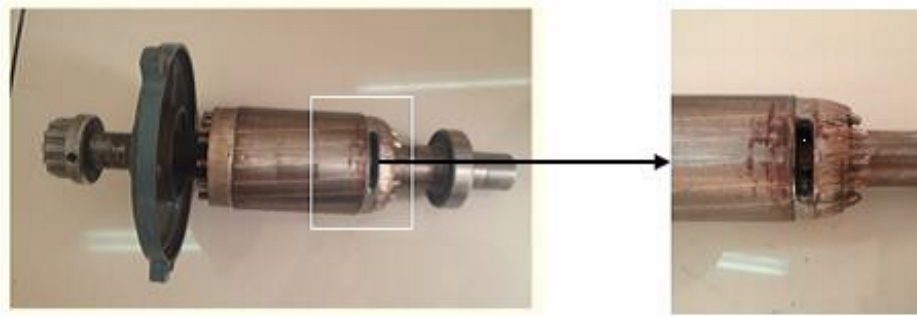


Fig. I.11: Cassure de barres

I.7.2.3 Défaut d'excentricité

L'excentricité dans une machine asynchrone correspond à une asymétrie de l'entrefer entre le stator et le rotor. Un faible niveau d'excentricité peut exister même dans une machine saine, en raison des tolérances de fabrication et d'assemblage. Toutefois, lorsque ce défaut dépasse une certaine limite, il peut perturber le fonctionnement normal de la machine.

Selon les fabricants et les utilisateurs, le niveau admissible d'excentricité varie généralement entre 5 % et 10 % de la largeur de l'entrefer. Pour cette raison, les constructeurs cherchent à réduire ce défaut afin de limiter les vibrations, le bruit et les forces

radiales, qui peuvent provoquer un frottement entre le stator et le rotor et entraîner une dégradation de la machine [17].

En raison de la faible valeur de l'entrefer dans les machines asynchrones, l'excentricité peut modifier la répartition du flux magnétique et affecter le comportement électromagnétique et mécanique de la machine.

Trois types d'excentricité sont généralement distingués [18] :

I.7.2.3.1 L'excentricité dynamique L'excentricité dynamique (Figure I.12.a) est généralement due à une déformation du rotor, à un défaut d'alignement ou à un desserrage des barres rotoriques. Dans ce cas, le centre du rotor ne coïncide pas avec son centre de rotation. Par conséquent, la position de l'entrefer minimal varie avec la rotation du rotor. Ainsi, l'excentricité dynamique dépend à la fois du temps et de l'espace, contrairement à l'excentricité statique qui dépend uniquement de l'espace.

Ce type de défaut peut être provoqué par la flexion de l'arbre, l'usure des roulements, un défaut d'alignement entre le rotor et la charge ou encore une résonance mécanique à la vitesse critique [15]. En pratique, les excentricités statique et dynamique ont souvent tendance à coexister. Même à l'état sain, la machine présente généralement un faible niveau d'excentricité statique résiduelle, dû aux inévitables défauts de fabrication.

L'excentricité dynamique modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer entraîne une augmentation des forces électromagnétiques agissant directement sur l'armature statorique et sur les enroulements, ce qui peut provoquer une dégradation de leur isolation. Elle peut également engendrer des frottements entre le stator et le rotor, en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Il en résulte des niveaux de vibration élevés dans les enroulements [16].

L'ampleur du défaut d'excentricité dynamique est souvent exprimée en pourcentage par la relation suivante :

$$ED \% = \frac{\text{entrefer normal} - \min(\text{entrefer})}{\text{entrefer normal}} \quad (I.4)$$

I.7.2.3.2 L'excentricité statique L'excentricité statique (Figure I.12.b) est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe géométrique du stator. Elle peut être causée par l'ovalisation de la partie interne du stator, par un mauvais positionnement du rotor ou du stator lors de la fabrication, ou encore par un défaut d'assemblage. Lorsque l'ensemble arbre-rotor est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique reste pratiquement constant.

I.7.2.3.3 L'excentricité mixte L'excentricité mixte (Figure I.12.c) correspond à la coexistence de l'excentricité statique et de l'excentricité dynamique dans la même machine. Ce type de défaut peut entraîner l'apparition de composantes fréquentielles supplémentaires dans le spectre du courant statorique. Les fréquences caractéristiques associées à l'excentricité peuvent être exprimées par la relation suivante [25] :

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

avec $k = 1, 2, 3, \dots$ et f_{exc} : fréquence d'excentricité.

Les causes principales de l'excentricité peuvent être liées à un mauvais positionnement des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des roulements ou encore à une déformation de l'arbre.

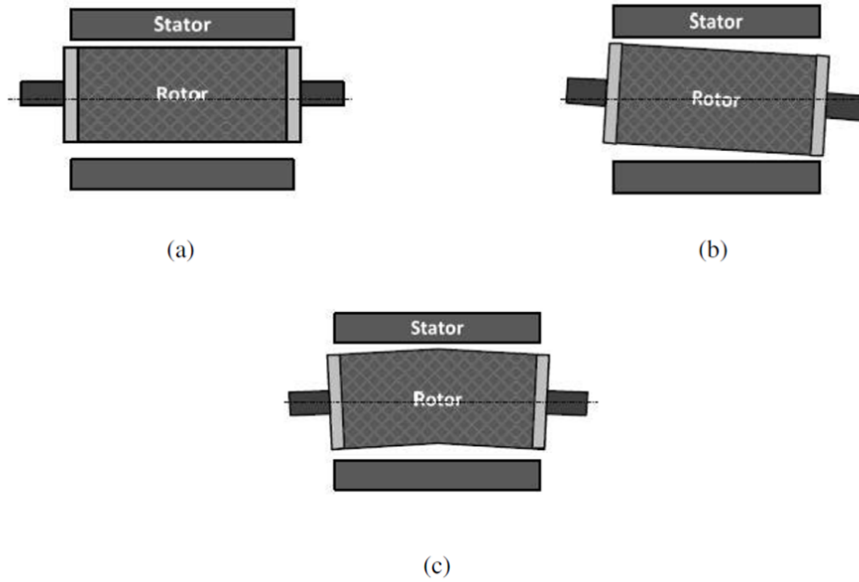


Fig. I.12: Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte

I.7.2.4 Effets de la charge

Les oscillations du couple de charge peuvent entraîner l'apparition d'harmoniques dans le spectre du courant statorique. Ces composantes fréquentielles peuvent être proches de celles générées par certains défauts électriques ou mécaniques, ce qui peut compliquer leur identification lors du diagnostic.

Dans le cas d'une machine idéale, où le flux statorique est supposé parfaitement sinusoïdal, une oscillation du couple de charge à la fréquence $k.f_r$ engendre des composantes dans les courants statoriques aux fréquences suivantes [20] :

$$f_{charge} = f_s \mp k.f_r = f_s \left[1 \mp n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \quad (I.5)$$

avec f_r : fréquence de rotation du rotor, $k = 1, 2, 3, \dots$

Ainsi, dans le cadre d'un diagnostic basé sur l'analyse spectrale du courant statorique, il est important de s'assurer que les composantes fréquentielles observées ne sont pas uniquement dues aux oscillations du couple de charge, mais qu'elles sont bien liées à la présence d'un défaut dans la machine.

I.7.2.5 Défaut dû au palier

Les défauts de roulements constituent l'une des principales défaillances mécaniques pouvant affecter les machines asynchrones. Les vibrations générées par ces défauts peuvent provoquer des variations de l'entrefer, ce qui influence la répartition du champ magnétique dans la machine. Par conséquent, des composantes fréquentielles supplémentaires peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique. Ces harmoniques peuvent être exprimées par la relation suivante [6] :

$$f_{roul} = f_s \mp k f_v \quad (I.6)$$

avec $k = 1, 2, 3, \dots$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

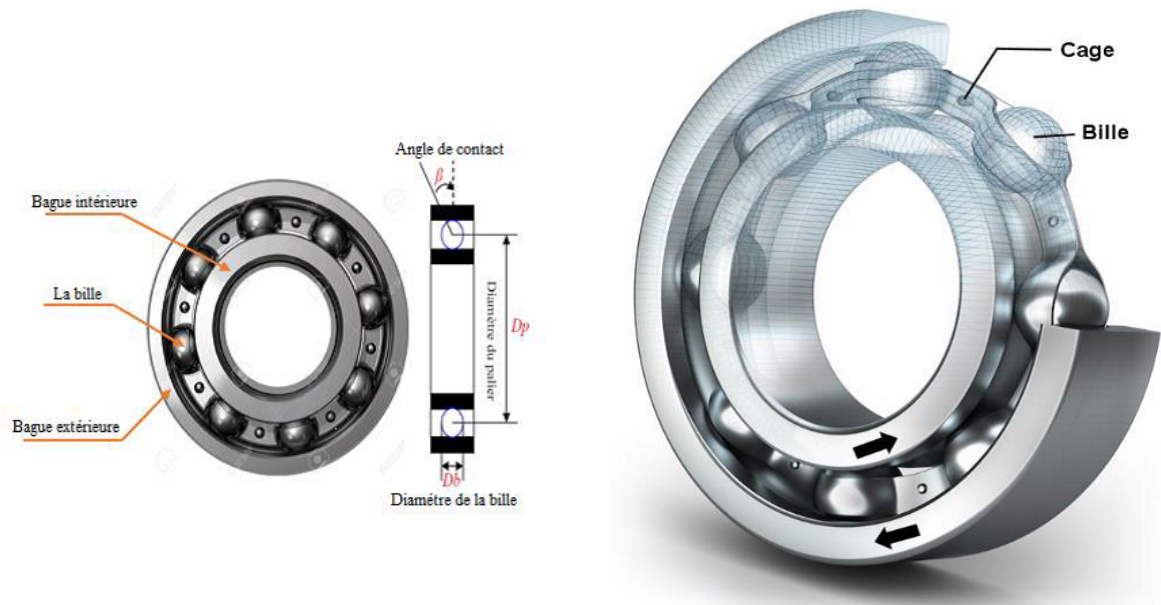


Fig. I.13: Dimensions du roulement à bille

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par le défaut. Elles sont liées aux paramètres géométriques du roulement, notamment le diamètre des billes, le diamètre primitif, le nombre de billes et l'angle de contact. Les principales fréquences caractéristiques des défauts de roulements sont données comme suit :

- Défaut au niveau d'une bille :

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

- Défaut sur la bague intérieure :

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

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.8)$$

- Défaut sur la cage :

$$f_{b.cage} = \frac{1}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.9)$$

Où : f_{rot} : Fréquence de rotation du rotor.

I.8 Les causes des défauts

Les défauts pouvant affecter la machine asynchrone peuvent avoir plusieurs origines. Ils peuvent être dus à des contraintes électriques, mécaniques, thermiques ou environnementales. Selon la référence [21], qui rapporte les résultats présentés dans [22], les principales causes des défauts statoriques et rotoriques, ainsi que leurs effets sur le système, sont résumés dans le Tableau I.1.

Tab. I.1: Les causes des défauts de la machine asynchrone

Type de défaut	Défauts observé	Causes possibles	Effets sur le système
Défauts statoriques	Vibration du support	Déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, contact avec le rotor.	Vibrations mécaniques
	Défaut entre le stator et la carcasse	Écrasement des spires par la carcasse, cycles thermiques, abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, choc mécanique	Courant de fuite ou défaut d'isolement
	Défaut d'isolement	Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrages fréquents, température élevée, humidité excessive.	Court-circuit dans l'enroulement
	Court-circuit entre spires	Température excessive, humidité, vibrations, surtension	Variation des courants statoriques et augmentation de l'amplitude du courant dans les autres phases
Défauts rotoriques	Déséquilibre d'alimentation	Défaut d'installation, température élevée, alimentation déséquilibrée, contraintes mécaniques au niveau des enroulements	Déséquilibre des courants statoriques
	Défauts de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, mauvaise qualité du lubrifiant, température élevée, surcharge	Oscillations du couple, augmentation des pertes, vibrations
	Rupture de barres rotoriques	Déséquilibre magnétique, régime transitoire prolongé, fatigue thermique	Réduction du couple électromagnétique, oscillations de vitesse, vibrations

I.9 Conséquences des défauts

L'apparition de défauts dans les machines asynchrones peut engendrer plusieurs perturbations affectant le fonctionnement global de l'installation industrielle. Ces défauts peuvent provoquer une dégradation des performances de la machine, une diminution de sa durée de vie, voire un arrêt total du système de production [9].

Parmi les principales conséquences de ces défauts, on peut citer :

- Des fluctuations du couple et de la vitesse ;
- Une augmentation du courant absorbé ;
- Un déséquilibre des tensions et des courants de ligne ;
- Une augmentation des arrêts non programmés ;
- Des pertes de production et une diminution du rendement global de l'installation.

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peuvent engendrer les défauts dans les processus industriels, le diagnostic des machines électriques suscite un intérêt croissant. Il permet de détecter les anomalies à un stade précoce, d'éviter leur évolution vers des pannes graves et d'améliorer la disponibilité des équipements.

Afin de mieux situer notre travail, il est nécessaire de présenter les principales méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les anomalies dans la machine asynchrone. Dans le domaine industriel, le diagnostic consiste à déterminer la cause probable d'une défaillance à partir d'un ensemble d'informations issues d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Il constitue donc un outil essentiel pour la surveillance, la maintenance et la protection des machines électriques.

I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les concepts fondamentaux liés à la machine asynchrone à cage d'écureuil, en mettant en évidence sa constitution physique et son principe de fonctionnement. Étant donné sa forte présence dans l'industrie, nous avons souligné l'importance de la maintenance (préventive et conditionnelle) et du diagnostic pour éviter des temps d'arrêt coûteux et garantir la sécurité des équipements. L'examen des différentes défaillances nous a permis de constater que la machine est sujette à diverses contraintes électromécaniques. Parmi ces anomalies, les défauts d'excentricité (statique, dynamique et mixte) occupent une place critique, car ils modifient considérablement le comportement magnétique de l'entrefer et engendrent des vibrations néfastes. Son étude

constitue la base nécessaire pour bien cerner l'environnement de notre problématique. Par conséquent, le chapitre suivant sera consacré à une étude plus approfondie et spécifique des défauts d'excentricité, ce qui nous préparera à l'implémentation de la méthode de diagnostic par analyse spectrale.

Méthodes de Diagnostic des Défauts

II.1 Introduction

Le diagnostic des défauts dans les machines électriques, et plus particulièrement dans les machines asynchrones à cage d'écureuil, constitue un axe essentiel de la maintenance industrielle. Ces machines sont largement utilisées dans les systèmes d'entraînement électrique grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction, leur fiabilité et leur coût relativement faible. Toutefois, malgré ces avantages, elles peuvent être soumises à différents défauts susceptibles d'affecter leurs performances, leur rendement ainsi que leur durée de vie.

Les défauts rencontrés dans les machines asynchrones peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Parmi les défauts les plus fréquents, on peut citer les défauts statoriques, les défauts rotoriques, les défauts de roulements, les défauts d'excentricité ainsi que les déséquilibres d'alimentation. L'apparition de ces défauts se manifeste généralement par des variations de certaines grandeurs mesurables, telles que le courant statorique, la tension, la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, la puissance instantanée ou encore les vibrations.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Nous commençons par introduire quelques outils classiques de traitement du signal, notamment la transformée de Fourier discrète et la transformée de Fourier rapide. Ensuite, nous abordons les techniques de diagnostic les plus couramment utilisées, telles que l'analyse spectrale, l'analyse temps-fréquence, l'analyse du vecteur de Park ainsi que le suivi des grandeurs mesurables de la machine.

II.2 Méthodes de traitement des signaux

Nous commençons par présenter les méthodes classiques d'estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) d'un signal, fondées sur la transformée de Fourier discrète. Cette approche permet d'analyser le contenu fréquentiel du signal observé.

Nous abordons ensuite quelques techniques permettant de réduire la variance de l'estimation spectrale et d'obtenir une estimation plus fiable de la densité spectrale de puissance. Enfin, nous présentons les principales caractéristiques d'un estimateur spectral, notamment le biais et la variance, ainsi que leur influence sur la qualité du spectre fréquentiel obtenu.

II.2.1 Transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier discrète, généralement notée *TFD*, permet de passer d'une suite finie d'échantillons temporels à une représentation dans le domaine fréquentiel. Pour une suite discrète constituée de (N) échantillons, la *TFD* est définie par la relation suivante :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{II.10})$$

où (N) représente le nombre de points utilisés pour le calcul de la TFD. Ce paramètre influence la précision de la représentation fréquentielle, tandis que le nombre d'échantillons (P) est directement lié à la résolution fréquentielle du signal observé.

En pratique, lorsque le nombre d'échantillons disponibles (P) est inférieur au nombre de points de calcul (N) , on utilise une technique appelée **zero-padding**. Cette méthode consiste à compléter la suite temporelle par $(N-P)$ zéros afin d'obtenir une suite de longueur (N) . Le zero-padding permet d'obtenir un spectre plus détaillé visuellement, sans toutefois augmenter réellement l'information contenue dans le signal.

La transformée de Fourier discrète inverse, notée *TFDI*, permet de reconstruire le signal temporel à partir de sa représentation fréquentielle. Elle est donnée par la relation suivante :

$$p_s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{II.11})$$

En décomposant l'exponentielle complexe à l'aide de la formule d'Euler, la TFD peut être exprimée sous la forme suivante :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.12})$$

Cette expression montre que la transformée de Fourier discrète peut être décomposée en deux parties : une partie réelle, associée au cosinus, et une partie imaginaire, associée au sinus.

La partie réelle, appelée transformée en cosinus, est donnée par :

$$F_e(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.13})$$

La partie imaginaire, associée à la transformée en sinus, est donnée par :

$$F_s(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, la TFD permet d'analyser le contenu fréquentiel d'un signal discret. Elle constitue un outil important dans le traitement du signal, notamment pour l'étude spectrale des courants statoriques utilisés dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones.

II.2.2 Transformée de Fourier rapide

La transformée de Fourier rapide, généralement notée FFT ou TFR, est un algorithme permettant de calculer efficacement la transformée de Fourier discrète. Cet algorithme a été développé et présenté par J. W. Cooley et J. W. Tukey en 1965. Il permet de réduire considérablement le temps de calcul par rapport à la méthode directe de la TFD.

L'algorithme de base de la FFT est particulièrement efficace lorsque le nombre de points (N) est une puissance de deux. Dans ce cas, le calcul de la TFD, qui nécessite environ (N^2) opérations, peut être réduit à un nombre d'opérations de l'ordre de $\left(\frac{N}{\log_2(N)}\right)$. Le gain en temps de calcul peut donc s'écrire sous la forme du rapport suivant :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.15})$$

Ainsi, la FFT constitue un outil fondamental en traitement numérique du signal. Dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones, elle est utilisée pour analyser le spectre du courant statorique et mettre en évidence les composantes fréquentielles caractéristiques des défauts.

II.3 Méthodes de diagnostic des défauts

Les méthodes d'analyse du signal reposent sur l'identification de caractéristiques fréquentielles permettant de distinguer l'état sain de l'état défaillant d'un système. Elles consistent, dans un premier temps, à étudier les signaux mesurés dans le domaine fréquentiel

afin d'analyser leur contenu spectral, leur variance ainsi que leurs principales composantes caractéristiques.

Lorsqu'un défaut apparaît dans une machine, il peut entraîner plusieurs manifestations observables, notamment une augmentation du bruit, un échauffement, des vibrations ou des variations des grandeurs électriques et mécaniques. Ces phénomènes se traduisent généralement par une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des signaux mesurés.

La littérature propose plusieurs techniques de détection des défauts basées sur le traitement du signal [27], [28]. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux méthodes les plus utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.

II.3.1 Analyse temps-fréquence et temps-échelle

Dans les systèmes industriels, les signaux non stationnaires sont fréquemment rencontrés, mais leur analyse reste relativement complexe. Dans le cas d'une machine asynchrone, certaines conditions de fonctionnement peuvent entraîner des variations du couple de charge au cours du temps. Ces variations modifient les grandeurs mesurées, notamment le courant statorique, ce qui rend les méthodes classiques d'analyse fréquentielle parfois insuffisantes. Pour cette raison, des techniques d'analyse temps-fréquence et temps-échelle ont été développées afin de mieux suivre l'évolution temporelle des composantes spectrales.

II.3.1.1 Analyse temps-fréquence

Dans certaines applications, le courant statorique d'un moteur asynchrone peut être considéré comme un signal non stationnaire, notamment lorsque le couple de charge varie au cours du temps. Dans ce cas, les méthodes reposant uniquement sur la transformée de Fourier ne permettent pas toujours de représenter correctement l'évolution du signal, car elles fournissent une information globale en fréquence sans indiquer précisément l'instant d'apparition des composantes spectrales.

Parmi les méthodes d'analyse temps-fréquence, la distribution de Wigner-Ville fournit une représentation de l'énergie du signal dans le plan temps-fréquence [25]. Toutefois, cette méthode présente certaines limites, notamment un temps de calcul relativement élevé et une interprétation parfois difficile de la représentation obtenue, ce qui peut compliquer la détection des défauts.

Afin d'améliorer la détection des défauts, des méthodes d'analyse temps-fréquence adaptatives ont été proposées, notamment pour identifier les cassures de barres rotoriques et les défauts de roulements. Le principe consiste à convertir le courant statorique en une représentation temps-fréquence permettant de suivre l'évolution des composantes spectrales

au cours du temps, comme l'illustre la Figure II.1. Une analyse statistique du spectre obtenu est ensuite réalisée afin de distinguer l'état sain de l'état défaillant du moteur.

Chaque machine possédant ses propres caractéristiques géométriques et électriques, l'approche adoptée peut nécessiter une phase d'apprentissage. Au cours de cette étape, l'algorithme apprend le comportement normal du moteur avant d'être utilisé pour la détection réelle des défauts [19].

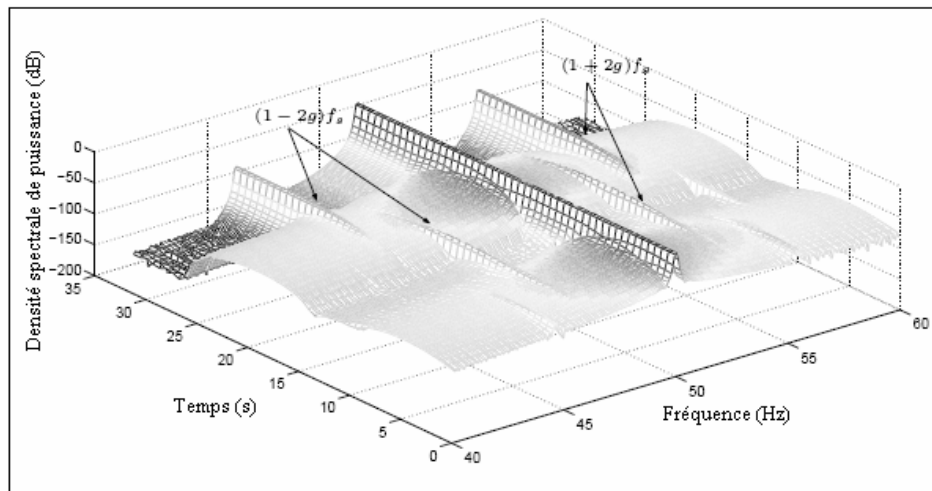


Fig. II.1: Analyse temps-fréquence du courant statorique sous variation du couple de charge, dans le cas d'un défaut de cassure de barre rotorique

II.3.2 Analyse temps-échelle

L'analyse temps-échelle permet de mettre en évidence les phénomènes présents dans un signal à différentes échelles de fréquence. Elle repose principalement sur la transformée en ondelettes, qui consiste à décomposer le signal à l'aide de fonctions analysantes issues d'une ondelette mère. Cette ondelette mère est une fonction oscillante de moyenne nulle, à partir de laquelle sont générées des ondelettes dilatées ou contractées selon l'échelle considérée.

Cette méthode utilise un fenêtrage de taille variable, ce qui constitue un avantage important par rapport aux méthodes classiques à fenêtre fixe. L'un des principaux avantages de la transformée en ondelettes est sa capacité à réaliser une analyse locale du signal. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones, notamment lorsque le signal étudié présente des transitoires ou des variations rapides.

Dans ce contexte, l'analyse par ondelettes permet d'améliorer l'étude du courant statorique durant les phases de démarrage, de variation de charge ou de fonctionnement à vitesse variable. Ainsi, les ondelettes constituent un outil efficace pour l'analyse temps-échelle des signaux non stationnaires. Elles sont particulièrement adaptées au diagnostic des défauts des machines électriques, car elles permettent de localiser les

composantes caractéristiques des défauts à la fois dans le temps et dans l'échelle fréquentielle [29].

II.3.3 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est l'une des méthodes les plus utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Elle permet de détecter plusieurs anomalies, telles que les ruptures de barres rotoriques, les défauts de roulements, les défauts d'excentricité et les courts-circuits dans les enroulements statoriques.

Le principe de cette méthode repose sur l'apparition de composantes fréquentielles caractéristiques lorsqu'un défaut affecte la machine. La surveillance consiste alors à appliquer la transformée de Fourier aux grandeurs mesurées, puis à identifier les fréquences parasites représentant la signature fréquentielle du défaut.

Les grandeurs analysées peuvent être électriques, comme les courants de ligne, ou mécaniques, telles que les vibrations et le couple électromagnétique [9]. Cette méthode est simple, rapide et peu coûteuse, car elle nécessite seulement un capteur de courant ou de vibrations. Toutefois, l'interprétation des résultats demande souvent une bonne connaissance du comportement fréquentiel de la machine [29].

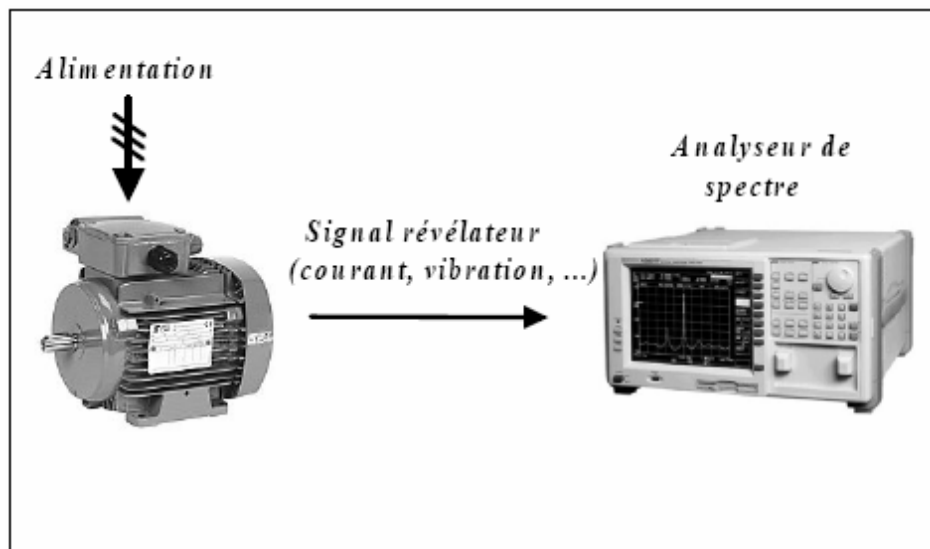


Fig. II.2: Principe de surveillance par analyse spectrale

II.3.4 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

L'analyse du vecteur de Park constitue une méthode efficace pour étudier le comportement des machines asynchrones triphasées. Cette approche repose sur une représentation bidimensionnelle des grandeurs électriques, permettant de transformer les courants statoriques triphasés en deux composantes orthogonales dans le repère de Park

[30]. À partir des courants de phase $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$ et $i_{sc}(t)$, les composantes du vecteur de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ sont :

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \quad (\text{II.16})$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \quad (\text{II.17})$$

La Figure II.3 représente le tracé de $i_q(t)$ en fonction du courant $i_d(t)$ dans le cas d'un rotor sain et d'un rotor défaillant : une barre cassée, deux barres cassées ou une portion d'anneau de court-circuit rompue.

L'apparition d'un défaut rotorique entraîne un élargissement du contour du cercle de Park. Cette variation permet d'établir un diagnostic en comparant la représentation obtenue à celle correspondant à l'état sain. Cette méthode fournit des résultats satisfaisants lorsque la machine fonctionne à son couple nominal. En revanche, en fonctionnement à vide, la détection des défauts devient moins efficace, car l'épaississement du contour reste très faible [31].

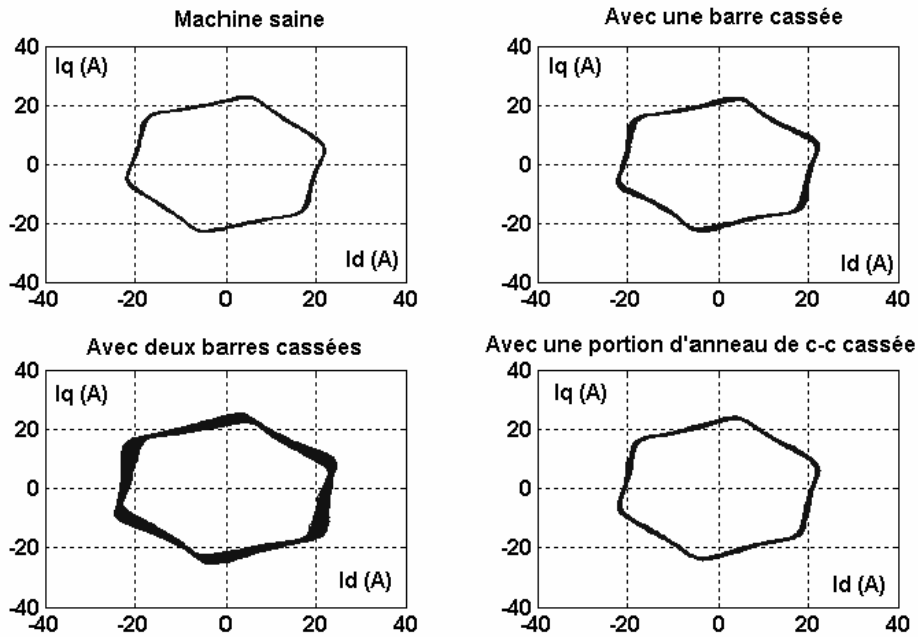


Fig. II.3: Vecteur de Park des courants statoriques (résultats expérimentaux)

II.3.5 Technique additionnelle

J. Milimonfared [32] a proposé une technique complémentaire pour détecter les barres cassées dans les moteurs asynchrones. Cette méthode repose sur un essai d'ouverture des phases lorsque la machine fonctionne à vide.

Le principe consiste à déconnecter les trois phases statoriques de la source d'alimentation. Après cette déconnexion, les courants induits dans le rotor créent des tensions dans les enroulements statoriques. Dans le cas d'un rotor sain, la force magnétomotrice due aux courants rotoriques reste principalement sinusoïdale. Les tensions induites au stator contiennent alors peu d'harmoniques significatives, à l'exception de l'harmonique fondamental et de celles liées à l'encoche rotorique.

En revanche, lorsque la cage rotorique comporte une ou plusieurs barres cassées, la tension induite dans les enroulements statoriques se déforme. Cette déformation entraîne l'apparition de composantes harmoniques supplémentaires, caractéristiques du défaut rotorique [7].

Les Figures II.4 et II.5 présentent respectivement les tensions composées et les spectres fréquentiels de la tension composée (U_{ab}) aux bornes de la machine après déconnexion de la source d'alimentation. Les cas étudiés correspondent à une machine saine, à une machine avec une barre cassée et à une machine avec deux barres cassées.

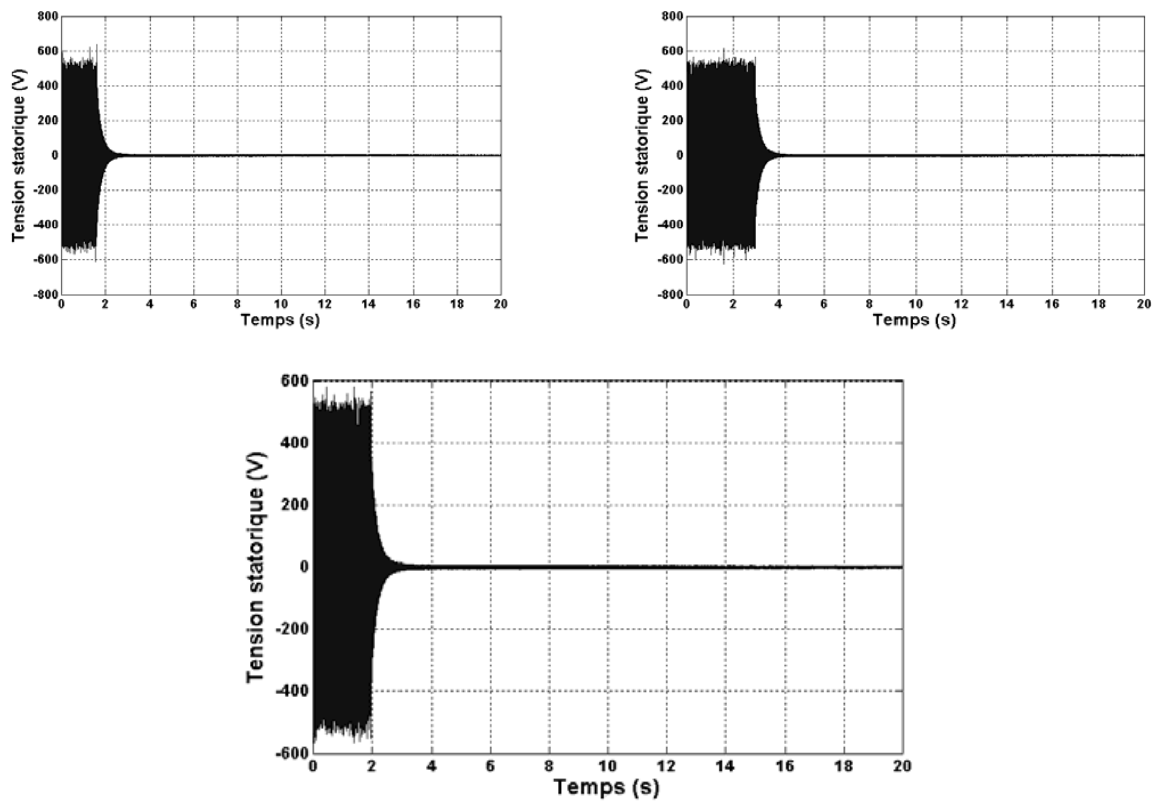


Fig. II.4: Tension composée U_{ab} après déconnexion de la source d'alimentation (résultats expérimentaux avec variateur de vitesse) : a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées

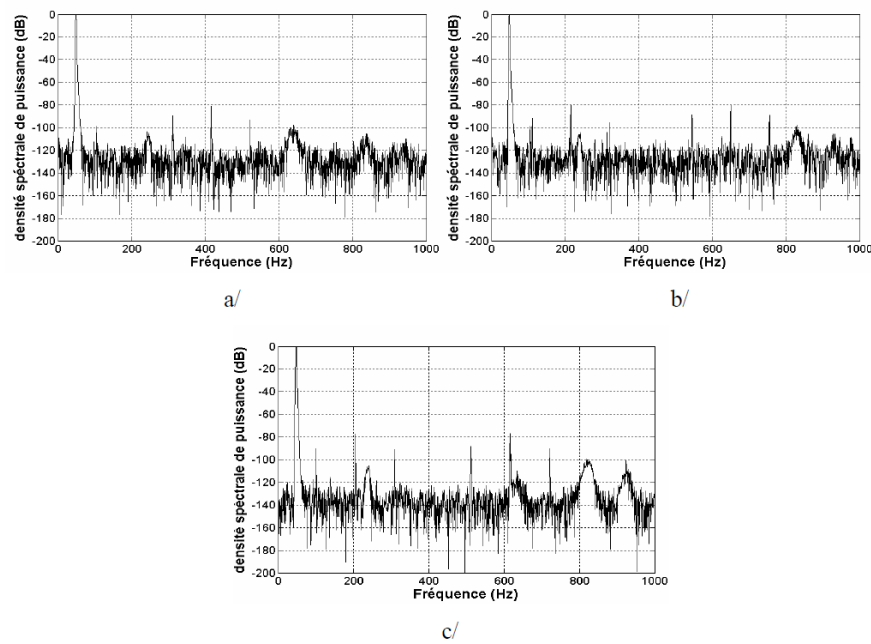


Fig. II.5: Spectre de la tension composée U_{ab} après déconnexion de la source d'alimentation (résultats expérimentaux) : a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées

Comme prévu, l'amplitude des composantes harmoniques d'ordre $(6m \mp 1)$ ($m=0, 1, 2, \dots$) augmente avec l'apparition d'une défaillance dans la cage rotorique. Toutefois, la quantification du défaut reste délicate, car le spectre obtenu dans le cas d'un rotor sain peut également contenir des composantes harmoniques de mêmes fréquences.

Cette méthode présente toutefois un intérêt important, car elle permet de réduire l'influence de certaines perturbations liées à la source d'alimentation, notamment les harmoniques temporelles et les déséquilibres de tension. De plus, elle nécessite peu de points pour le calcul de la transformée de Fourier, car seules les premières périodes de la tension composée sont utilisées afin de considérer le signal comme quasi stationnaire.

Cependant, cette méthode présente une limite importante : elle ne peut pas être utilisée directement sur des machines intégrées à une chaîne de production, car elle nécessite la coupure de l'alimentation. Elle peut toutefois être utile dans les entreprises de fabrication de machines électriques, notamment pour le contrôle et le diagnostic en fin de chaîne de production. La détection précoce d'un défaut naissant par cette méthode reste néanmoins difficile.

II.3.6 Diagnostic de défaut par le suivi des grandeurs mesurables

Dans la pratique actuelle, l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables est largement utilisée pour le diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones.

Cette approche repose sur l'exploitation des signaux accessibles au cours du fonctionnement de la machine. Les principales grandeurs pouvant être mesurées sont :

- Les courants statoriques absorbés
- La tension d'alimentation
- Le couple électromagnétique
- La vitesse de rotation rotorique
- Les signaux vibratoires.

II.3.6.1 Analyse fréquentielle des courants statoriques

L'analyse fréquentielle des courants statoriques est une méthode largement utilisée pour diagnostiquer les défauts dans les machines asynchrones, car le spectre résultant permet d'obtenir des informations pertinentes sur les anomalies d'origine électrique, magnétique et rotorique.

Pour détecter les défauts de la cage rotorique, il suffit d'analyser l'amplitude des composantes fréquentielles caractéristiques, situées autour de la fréquence fondamentale et données par $(1 \mp 2kg)f$: cette analyse permet d'évaluer l'état du rotor. L'augmentation de l'amplitude de ces composantes latérales est généralement un indicateur de la présence d'un défaut au niveau de la cage d'écureuil.

Pour illustrer, la figure II.6 donne le spectre du courant statorique obtenu pour une machine en rotation avec un rotor sain puis un rotor défectueux. La comparaison des deux spectres met en évidence une augmentation importante de l'amplitude des composantes caractéristiques en cas défectueux, ce qui valide l'efficacité de l'analyse spectrale pour la détection des défauts rotoriques [33].

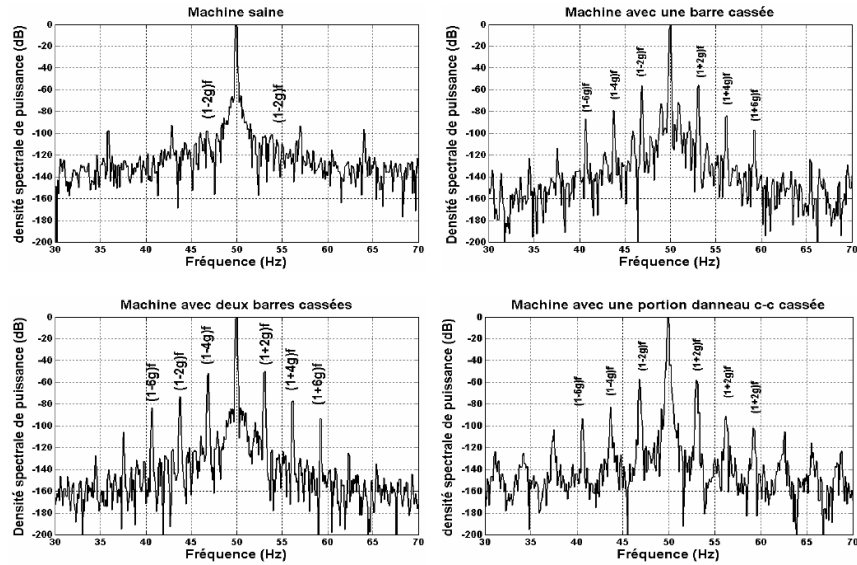


Fig. II.6: Spectre du courant statorique (résultats de simulation)

II.3.6.2 Analyse fréquentielle du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation

En présence d'une rupture de barre rotorique, des composantes fréquentielles supplémentaires apparaissent dans les spectres de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique aux fréquences $2kgf_s$. Cependant, il a été constaté que l'analyse de ces composantes fournit des informations moins pertinentes sur le défaut rotorique que l'analyse des composantes présentes dans le spectre du courant statorique. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de leurs amplitudes est généralement moins significative.

Par ailleurs, l'acquisition de ces deux signaux nécessite un équipement de mesure relativement coûteux par rapport à un simple capteur de courant, ce qui limite leur utilisation pratique dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones. Certains systèmes permettent d'estimer le couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesurés sur la machine, mais cette méthode reste moins efficace que l'analyse directe du courant statorique.

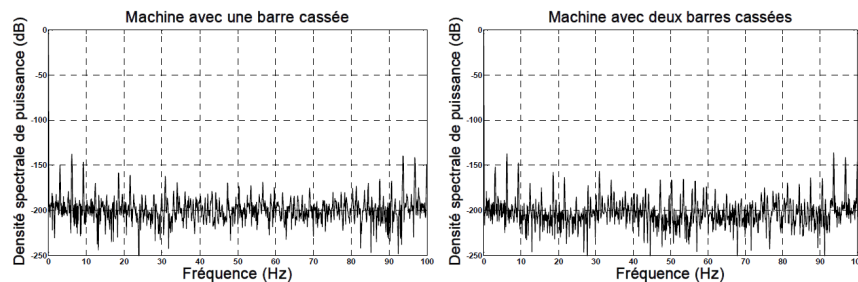


Fig. II.7: Spectre du couple électromagnétique (résultats de simulation)

II.3.6.3 Analyse spectrale de la puissance instantanée

L'analyse du courant seul peut être moins informative que celle de la puissance instantanée d'une phase, définie comme le produit de la tension d'alimentation par le courant absorbé par le moteur [34]. En effet, le spectre de la puissance instantanée fait apparaître, en plus des composantes principales du signal, une composante additionnelle située à la fréquence du défaut. Cette puissance s'exprime par la relation suivante :

$$p_s(t) = p_{s0}(t) + \frac{mV_{LL}I_L}{2} \left[\cos \left((2\omega_s - \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right) + \cos \left((2\omega_s + \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right) + 2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \cos \left(\omega_f t \right) \right] \quad (\text{II.18})$$

avec :

$$p_{s0} = V_{LL}I_{LL} \left[\cos \left(2\omega_s t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right) + \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

Dans cette expression, $P_s(t)$ représente la puissance instantanée d'une phase statorique, m l'indice de modulation, V_{LL} la valeur RMS de la tension entre phases, I le courant de ligne et ω_f la pulsation d'oscillation (pulsation de défaut) exprimée en radians par seconde. Les termes ω_s et φ représentent respectivement la pulsation des courants d'alimentation, exprimée en radians par seconde, et l'angle de déphasage entre le courant absorbé par le moteur et la tension.

La figure II.8 met en évidence la présence de composantes basses fréquences lorsque la cage rotorique de la machine est défectueuse, pour des essais réalisés à charge nominale. Comme ces composantes se situent dans une bande fréquentielle limitée, leur détection devient plus aisée, ce qui améliore l'efficacité du diagnostic. Par ailleurs, l'analyse de la puissance instantanée peut également être utilisée pour le diagnostic des défauts mécaniques ainsi que des courts-circuits entre spires statoriques [35].

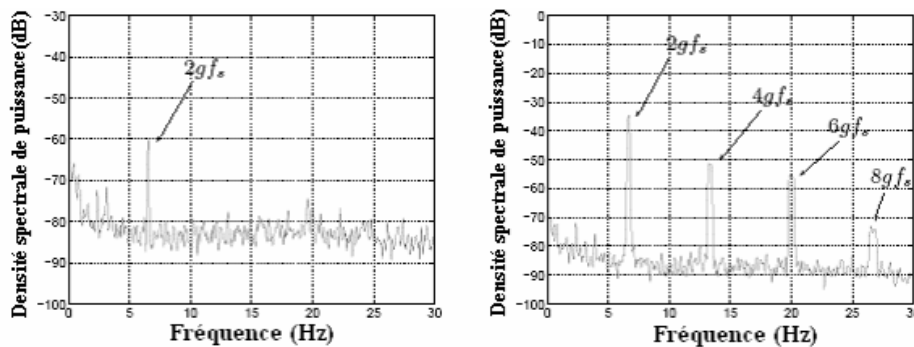


Fig. II.8: Spectre de la puissance instantanée [10] : a) rotor sain, b) rotor avec barre cassée

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques rappels relatifs au traitement du signal, notamment les estimateurs classiques de la densité spectrale de puissance d'un signal temporel. Nous avons ensuite abordé les principales techniques de diagnostic appliquées aux procédés industriels, en particulier celles utilisées pour la machine asynchrone à cage d'écureuil, tout en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites.

Il a été montré que la détection d'un défaut, qu'il soit d'origine mécanique ou électrique, repose principalement sur le suivi de l'amplitude de certaines composantes caractéristiques du spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable, généralement à l'aide de la transformée de Fourier rapide. Toutefois, lorsque le signal analysé est non stationnaire, notamment en présence d'une variation de la vitesse rotorique, les méthodes temps-fréquence et temps-échelle constituent des outils plus adaptés et plus efficaces pour la détection des défauts.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons à la surveillance des amplitudes des composantes caractéristiques des grandeurs mesurables, en particulier le courant statorique, pour la détection des défauts rotoriques, tout en tenant compte de l'influence des harmoniques d'espace.

Étude expérimentale à présence des défauts d'excentricité dynamique par analyse spectrale

III.1 Introduction

Les défauts mécaniques dans les machines électriques peuvent apparaître suite à la défaillance de certains éléments mécaniques, tels que les engrenages et les roulements. Ces défauts sont fréquents dans les machines électriques et peuvent représenter environ 50 % à 60 % de l'ensemble des défauts. Parmi les défauts les plus critiques et les plus sévères, on distingue notamment les défauts de roulements ainsi que l'excentricité entre le stator et le rotor [?]. Les défauts de roulements, dus à la fatigue mécanique ou à la non-uniformité de l'entrefer, provoquent une perturbation de la coaxialité entre l'axe du stator et l'axe de rotation du rotor. Environ 80 % des défauts mécaniques conduisent à l'apparition d'une excentricité [?]. Il convient également de noter que l'excentricité peut résulter des opérations de fabrication et d'assemblage (ES). On distingue généralement trois types d'excentricité : l'excentricité statique, l'excentricité dynamique et l'excentricité mixte. La figure III.1 présente les coupes transversales d'un moteur asynchrone dans différents cas d'excentricité.

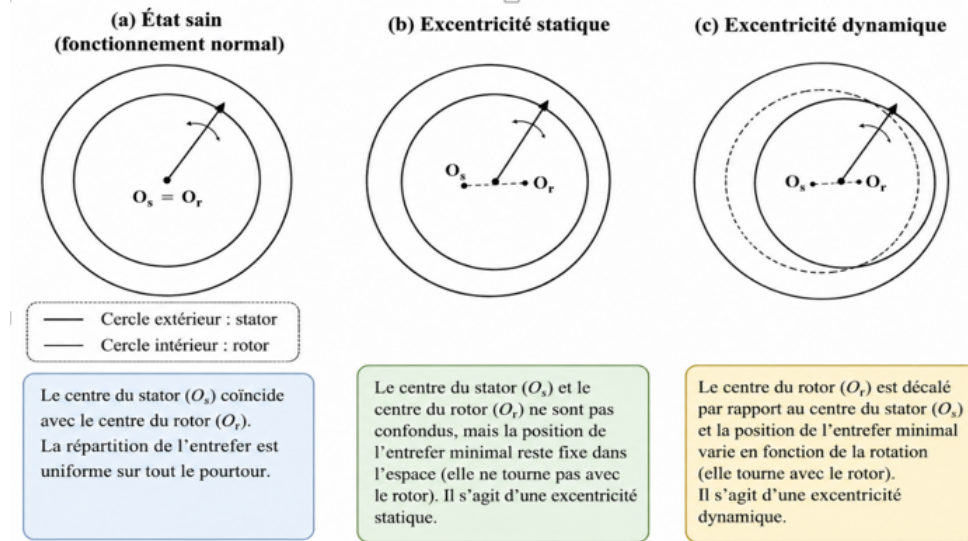


Fig. III.1: Coupe transversale d'un moteur asynchrone : (a) état sain, (b) excentricité statique, (c) excentricité dynamique.

Dans le cas de l'excentricité statique, illustré à la figure 22 (b), l'axe de symétrie du rotor coïncide avec son axe de rotation, tandis que l'axe de symétrie du stator est décalé par rapport à cet axe. Dans ce cas, la répartition de l'entrefer est non uniforme, mais la position de l'entrefer minimal reste fixe.

Dans le cas de l'excentricité dynamique, représenté à la figure 22(c), seul l'axe de symétrie du rotor est décalé par rapport à son axe de rotation, lequel coïncide avec l'axe de symétrie du stator. En ce qui concerne l'excentricité mixte, les axes de symétrie et de rotation du rotor sont tous les deux décalés par rapport à l'axe du stator.

L'excentricité de l'entrefer dans les moteurs asynchrones est généralement détectée par l'analyse du spectre du courant de ligne statorique [?, ?, ?, ?]. Afin de diagnostiquer l'excentricité statique et l'excentricité dynamique à partir du spectre fréquentiel du courant statorique, deux paramètres fondamentaux doivent être déterminés. Le premier est la fréquence des composantes latérales dues au défaut, utilisée comme signature fréquentielle pour le diagnostic. Le second est l'amplitude de ces composantes latérales, considérée comme un indicateur de la présence et de la sévérité du défaut [?, ?, ?].

Bien que les méthodes basées sur des modèles à paramètres concentrés et des méthodes analytiques soient capables de calculer correctement le premier paramètre, la comparaison des résultats de simulations et expérimentaux montre de grandes différences entre le second paramètre dans ces méthodes [?, ?]. La raison de ces différences considérables est les simplifications et les approximations utilisées dans les méthodes de modélisation mentionnées. Il est à noter que le type d'excentricité et la variation de la charge affectent également considérablement les paramètres mentionnés ci-dessus. Par conséquent, un diagnostic complet de l'excentricité d'un moteur dépend de la reconnaissance du type

d'excentricité et de la détermination précise de son pourcentage dans différentes charges.

III.2 Étude expérimentale du défaut d'excentricité dynamique

Cette partie présente l'étude expérimentale réalisée dans le but de vérifier et de valider les résultats théoriques et de simulation obtenus dans les chapitres précédents.

Nous commencerons par étudier le comportement de la machine asynchrone à l'état sain, afin d'obtenir les signaux temporels et fréquentiels de référence. Ces signaux serviront ensuite de base de comparaison pour analyser l'influence des défauts sur le comportement de la machine. Dans une deuxième partie, l'étude est consacrée au défaut mécanique d'excentricité dynamique avec un taux de 50 %. Les essais sont réalisés pour trois niveaux de charge :

- Faible charge : 30 %;
- Moyenne charge : 50 %;
- Forte charge : 75 %.

L'objectif principal de cette étude est de comparer les signatures spectrales de la machine saine avec celles obtenues en présence d'un défaut d'excentricité dynamique de 50%, afin de mettre en évidence l'influence de ce défaut sur le courant statorique.

III.2.1 Description du banc d'essai

L'objet de cette partie est de vérifier expérimentalement certaines propriétés établies pour une machine présentant un défaut mécanique d'excentricité dynamique. Les propriétés concernent principalement les courants absorbés, la vitesse de rotation, le couple développé par la machine, ainsi que les signatures fréquentielles obtenues par analyse spectrale.

Le banc d'essai installé à cet effet comprend les équipements nécessaires à l'étude expérimentale de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

La machine utilisée est une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Elle est analysée selon deux états de fonctionnement :

- Une machine saine, dont les signaux sont utilisés comme référence pour la détection des défauts ;
- Une machine présentant un défaut d'excentricité dynamique de 50 %.

Les essais expérimentaux sont réalisés pour trois niveaux de charge : 30 %, 50 % et 75 % de la charge nominale.



Fig. III.2: Machine asynchrone utilisée dans le banc d'essai.

Les caractéristiques principales de la machine asynchrone étudiée sont données dans le tableau suivant :

Tab. III.1: Caractéristiques principales de la machine asynchrone à cage.

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	5,5 kW
Tension nominale	400 V
Courant nominal	10,5 A
Vitesse nominale	1455 tr/min
Facteur de puissance	0,87
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	48
Nombre de barres rotoriques	28

La machine utilisée a été choisie en fonction des objectifs de l'étude expérimentale, notamment le diagnostic du défaut d'excentricité dynamique. Le modèle détaillé dans les chapitres précédents s'appuie sur les caractéristiques techniques de cette machine.

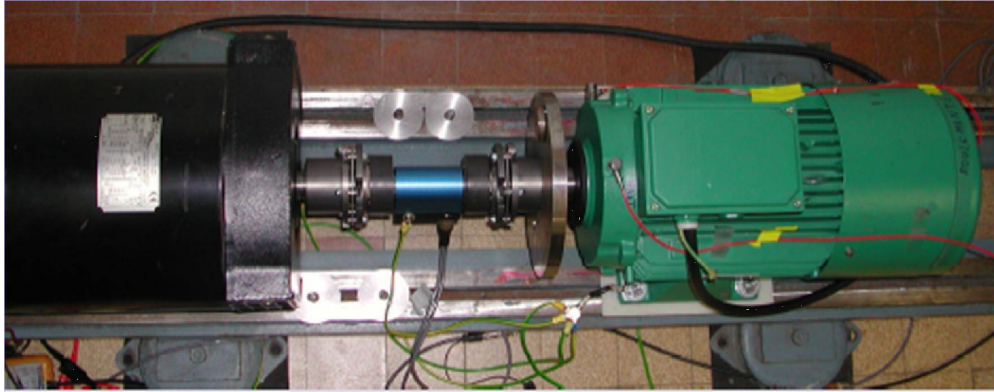


Fig. III.3: Vue générale du banc d'essai.

Génératrice à courant continu

Pour obtenir un fonctionnement en charge, nous avons utilisé une génératrice à courant continu afin d'obtenir un couple résistant. Cette génératrice permet de faire fonctionner la machine asynchrone sous différents niveaux de charge.

Génératrice tachymétrique

Le capteur tachymétrique est installé directement sur l'arbre de la machine afin de capter le signal de vitesse de rotation. Cette mesure permet de suivre l'évolution de la vitesse dans les deux cas étudiés : machine saine et machine avec une excentricité dynamique de 50%.

Capteurs de courant et de tension

Les capteurs de courant et de tension utilisés sont des capteurs à effet Hall. Ces capteurs permettent de mesurer les signaux électriques, qui sont ensuite analysés dans les domaines temporel et fréquentiel. Pour utiliser correctement ces capteurs, il est nécessaire de connaître leurs caractéristiques, notamment les valeurs maximales du courant et de la tension à mesurer.

À cette fin, un conditionnement du signal est recommandé afin de protéger les capteurs et d'obtenir des signaux exploitables.

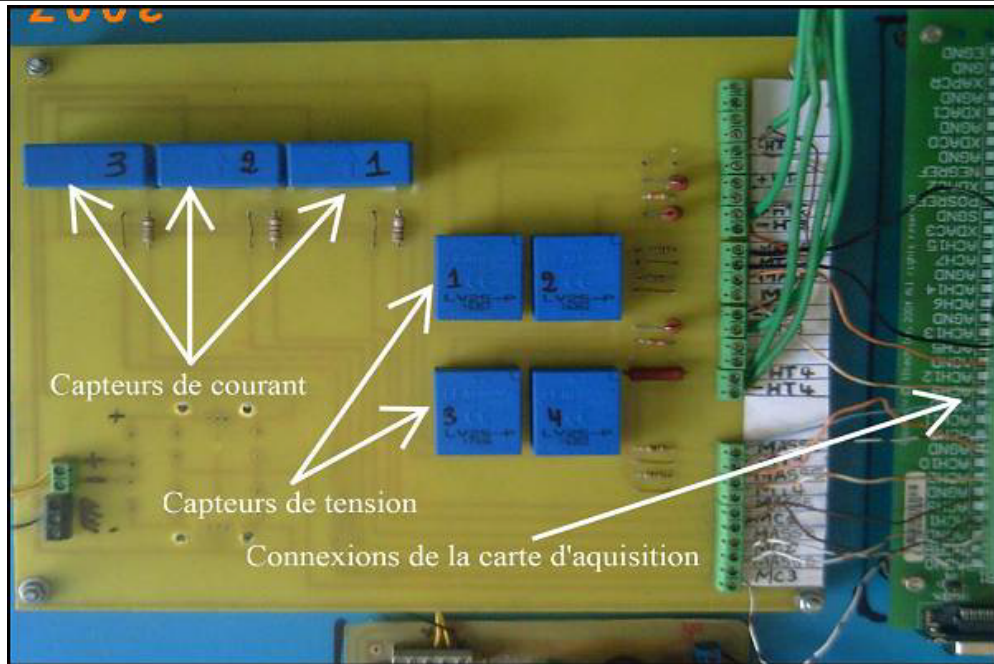


Fig. III.4: Carte pour le conditionnement des signaux

Carte d'acquisition

La carte d'acquisition permet de capter les signaux délivrés par les capteurs et de les transmettre à l'ordinateur pour un traitement numérique. Les signaux enregistrés peuvent ensuite être traités à l'aide de différents logiciels, notamment MATLAB, afin d'effectuer l'analyse spectrale.

Les principales opérations réalisées sont :

- La variation de la fréquence d'échantillonnage ;
- La variation du nombre de points à relever ;
- L'enregistrement des fichiers de données ;
- La visualisation des signaux en temps réel ;
- Le relevé de plusieurs signaux simultanément ;
- L'analyse fréquentielle.

Le montage expérimental permet de mesurer :

- Les trois courants de phase statorique ;
- Les trois tensions statoriques ;
- La vitesse de rotation.

III.2.2 Acquisition des signaux

Pour améliorer la résolution fréquentielle et éviter les interférences entre les composantes harmoniques, il est important de bien choisir les paramètres d'acquisition des signaux.

Dans notre travail, les signaux sont relevés pour la machine saine et pour la machine avec défaut d'excentricité dynamique de 50 %.

Chaque cas est étudié sous trois niveaux de charge :

- Faible charge : 30 %;
- Moyenne charge : 50 %;
- Forte charge : 75 %.

Les signaux obtenus sont ensuite traités par analyse spectrale afin d'extraire les composantes fréquentielles caractéristiques du défaut d'excentricité dynamique.

III.2.3 Étude pratique des défauts mécaniques

Les essais expérimentaux relatifs aux défauts étudiés sont réalisés au laboratoire LAPLACE de l'ENSEEIH à Toulouse. Le banc d'essai utilisé permet d'analyser les défauts d'excentricité dynamique dans une machine asynchrone à cage.

Pour cette étude, nous disposons de deux machines : une machine saine et une machine présentant une excentricité dynamique de 50 %. Ces machines possèdent une puissance nominale de 5,5 kW et un couple nominal de 35 N.m. Elles sont alimentées par un variateur de vitesse industriel fonctionnant en boucle ouverte.

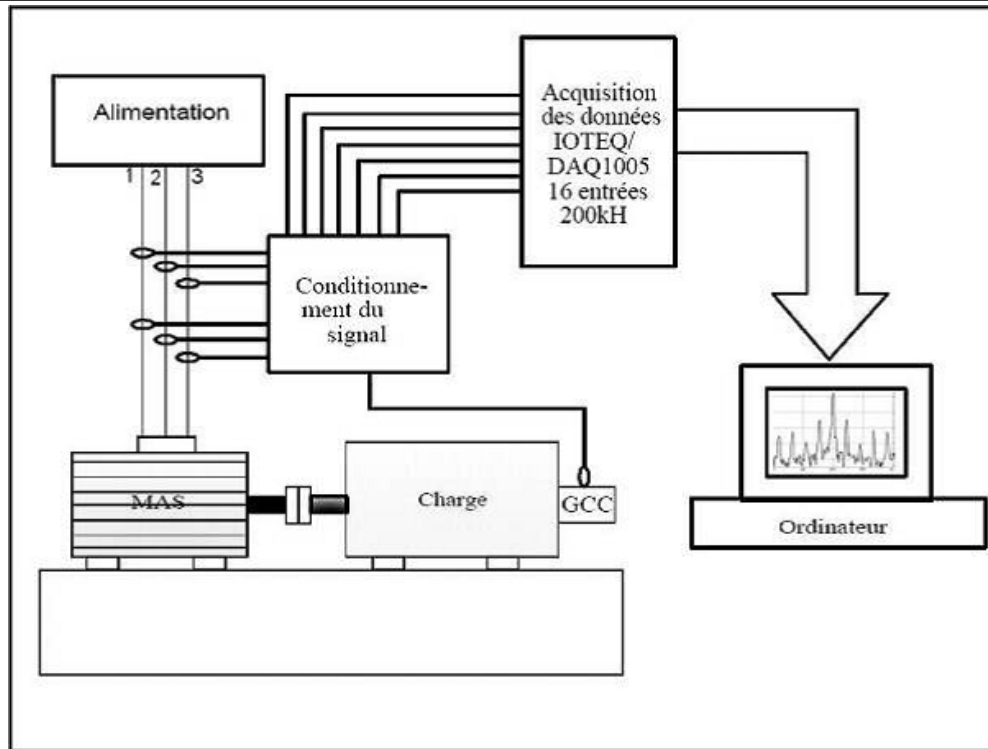


Fig. III.5: Schéma de montage

Chaque machine est accouplée séparément à une génératrice à courant continu alimentant une charge résistive. Des capteurs sont utilisés pour mesurer les différentes grandeurs nécessaires à l'analyse, à savoir les trois tensions, les trois courants de ligne, la vitesse de rotation, le couple et les vibrations. Ces signaux sont ensuite transmis vers un ordinateur équipé de deux cartes d'acquisition.

Afin de prendre en compte les commutations du variateur de vitesse, qui fonctionne avec une fréquence de découpage de 3 kHz, la fréquence d'acquisition des signaux mesurés a été fixée à 25,6 kHz.

III.2.4 Étude de l'excentricité dynamique

Afin de créer une excentricité dynamique de 50 %, les roulements à billes d'origine sont remplacés par des roulements ayant le même diamètre extérieur, mais un diamètre intérieur plus important. Cette modification permet l'insertion de bagues en bronze spécialement usinées.

Ces bagues possèdent un diamètre extérieur correspondant au diamètre intérieur des nouveaux roulements, tandis que leur diamètre intérieur est adapté au diamètre de l'arbre. Les surfaces intérieure et extérieure des bagues sont usinées de façon non concentrique, ce qui permet d'introduire une excentration de l'alésage de 0,15 mm.

Après l'alignement des bagues excentrées sur l'arbre, les nouveaux roulements à

billes sont montés de manière à garantir une direction uniforme de l'excentricité. Étant donné que l'entrefer nominal de la machine étudiée est de 0,4 mm, cette excentrication permet d'obtenir une excentricité dynamique de 50 % entre le rotor et le stator.

Les signatures du courant et de la tension relevée en charge sont présentées aux figures 26 et 27.

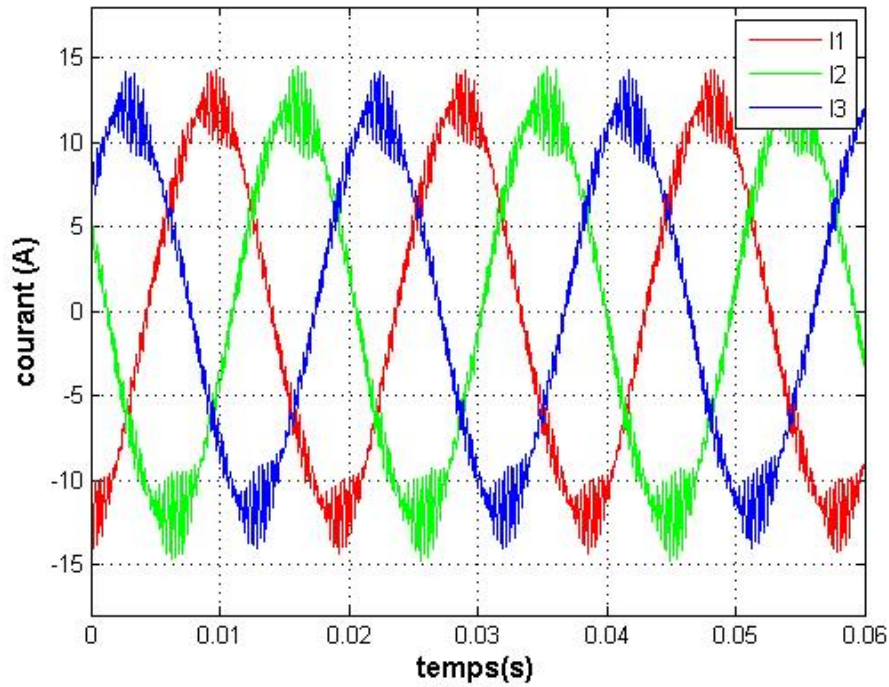


Fig. III.6: Courants statoriques à la sortie du variateur

Les courants statoriques I_1 , I_2 et I_3 représentent les courants absorbés par les trois phases de la machine asynchrone. Ces courants sont déphasés entre eux de 120° .

Les relations des courants statoriques sont :

$$\begin{cases} I_1 = I_m \sin(2\pi f_s t) \\ I_2 = I_m \sin\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_3 = I_m \sin\left(2\pi f_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$f_s = 50 \text{ Hz}, \quad T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$$

Le courant nominal de la machine est :

$$I_n = 10.5 \text{ A}$$

La valeur maximale du courant est :

$$I_m = I_n \sqrt{2} = 10.5 \times \sqrt{2} = 14.85 \text{ A}$$

Donc les expressions numériques des courants est :

$$\begin{cases} I_1(t) = 14.85 \sin(2\pi \times 50 \times t) \\ I_2(t) = 14.85 \sin\left(2\pi \times 50 \times t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_3(t) = 14.85 \sin\left(2\pi \times 50 \times t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

La valeur efficace de chaque courant est calculée par :

$$I_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k I^2(k)} \quad (\text{III.21})$$

Pour les trois courants statoriques :

$$\begin{cases} I_{(1,m)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k I_1^2(k)} \\ I_{(2,m)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k I_2^2(k)} \\ I_{(3,m)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k I_3^2(k)} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec

$$N = 507904$$

(nombre de point).

La conversion par rapport au courant nominal est donnée par

$$I(A) = I_{\text{mesuré}} \times I_n$$

Avec :

$$I_n = 10.5 \text{ A}$$

Le temps d'acquisition est calculé par :

$$t = \frac{k}{F_{\text{ech}}} = \frac{k}{25600}$$

Avec :

$$F_{\text{ech}} = 25600 \text{ Hz}$$

(fréquence d'échantillonnage).

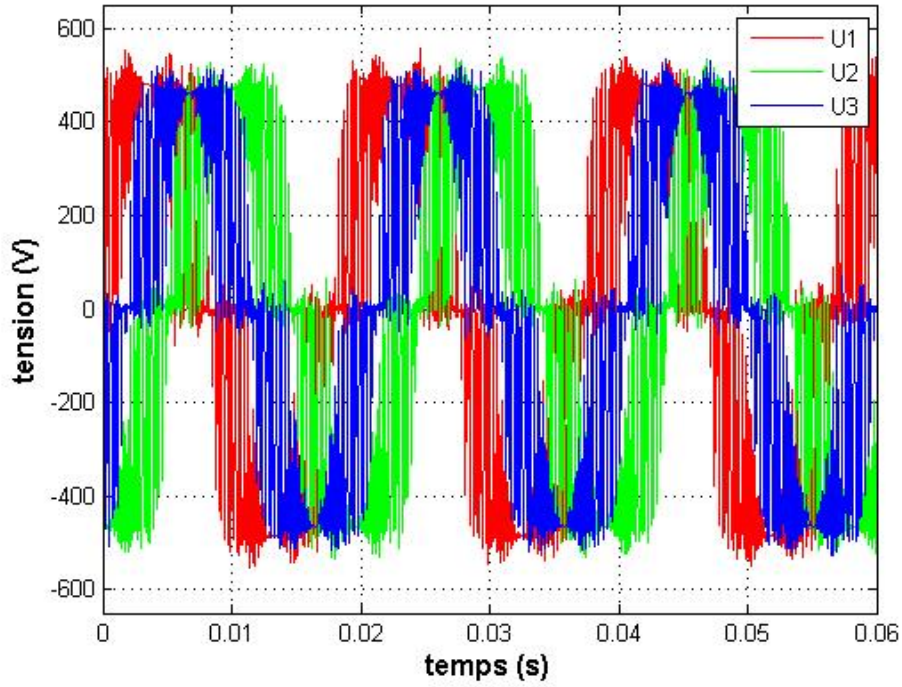


Fig. III.7: Tension composée à la sortie du variateur

Les tensions U_1 , U_2 et U_3 représentent les tensions mesurées à la sortie du variateur. Elles sont également déphasées entre elles de 120° . La forme de la tension n'est pas parfaitement sinusoïdale à cause des commutations du variateur de vitesse.

Les relations des tensions sont :

$$\begin{cases} U_1(t) = U_m \sin(2\pi f_s t) \\ U_2(t) = U_m \sin\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_3(t) = U_m \sin\left(2\pi f_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$f_s = 50 \text{ Hz}, \quad T = \frac{1}{f_s} = 0.02 \text{ s}$$

La tension nominale de la machine est :

$$U_n = 400 \text{ V}$$

La valeur maximale de la tension est :

$$U_m = U_n \sqrt{2} = 400 \times \sqrt{2} = 565.68 \text{ V}$$

Donc les expressions numériques des tensions est :

$$\begin{cases} U_1(t) = 565.68 \sin(2\pi \times 50 \times t) \\ U_2(t) = 565.68 \sin\left(2\pi \times 50 \times t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_3(t) = 565.68 \sin\left(2\pi \times 50 \times t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

La valeur efficace de chaque tension est calculée par :

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k U^2(k)}$$

Donc :

$$\begin{cases} U_{(1,eff)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k U_1^2(k)} \\ U_{(2,eff)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k U_2^2(k)} \\ U_{(3,eff)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k U_3^2(k)} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

La conversion par rapport à la tension nominale est donnée par :

$$U(V) = U_{\text{mesuré}} \times U_n$$

Le temps d'acquisition est calculé par :

$$t = \frac{k}{F_{ech}} = \frac{k}{25600}$$

La conséquence directe d'un entrefer irrégulier est la modification de la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer. Ainsi, les grandeurs dépendant de la densité du flux d'entrefer sont également affectées. Il convient notamment de souligner les effets suivants :

- L'attraction magnétique asymétrique génère une force radiale qui tend à accentuer davantage l'excentricité du rotor. En effet, cette attraction est plus importante dans

la direction où l'entrefer est le plus faible, car la densité du flux magnétique y est plus élevée ;

- Les vibrations et le bruit de la machine augmentent en raison de la répartition non uniforme du flux d'entrefer et du déséquilibre de l'attraction magnétique ;
- Des fréquences caractéristiques apparaissent dans le spectre du courant statorique ;
- Les oscillations du couple électromagnétique ainsi que sa valeur moyenne peuvent augmenter.

III.2.5 Étude de la vitesse rotorique

Dans cette partie, nous étudions la vitesse de rotation rotorique de la machine asynchrone à cage dans deux états de fonctionnement : l'état sain et l'état avec défaut d'excentricité statique. L'analyse est réalisée pour trois niveaux de charge : faible (30%), moyenne (50%) et forte (75%).

L'objectif de cette étude est de comparer les courbes de vitesse rotorique dans les deux cas, puis d'analyser les valeurs moyennes après élimination des ondulations afin de mettre en évidence l'effet du défaut sur le comportement mécanique de la machine.

Relations utilisées pour le calcul de la vitesse rotorique

La vitesse synchronisme est donnée par la relation :

$$N_s = \frac{60f_s}{P} = 1500 \text{ tr/min}$$

La vitesse rotorique de l'unité réduite (pu) vers (tr/min) est donnée :

$$N_r(\text{tr/min}) = K \times N_r$$

Coefficient de conversion est calculé par :

$$K = \frac{N_s}{\max(N_r)}$$

Donc :

$$N_r(\text{tr/min}) = N_r \times \frac{1500}{\max(N_r)} \quad (\text{III.25})$$

Cette relation permet d'obtenir les vitesses rotoriques en (tr/min), avec une valeur maximale proche de la vitesse synchrone $N_s = 1500 \text{ tr/min}$.

CHAPITRE III. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE À PRÉSENCE DES DÉFAUTS D'EXCENTRICITÉ DYNAMIQUE PAR ANALYSE SPECTRALE

Les signaux de vitesse rotorique sont d'abord représentés dans leur forme brute, c'est-à-dire sans élimination des ondulations. Les trois courbes correspondent aux trois niveaux de charge : 30 %, 50 % et 75 %.

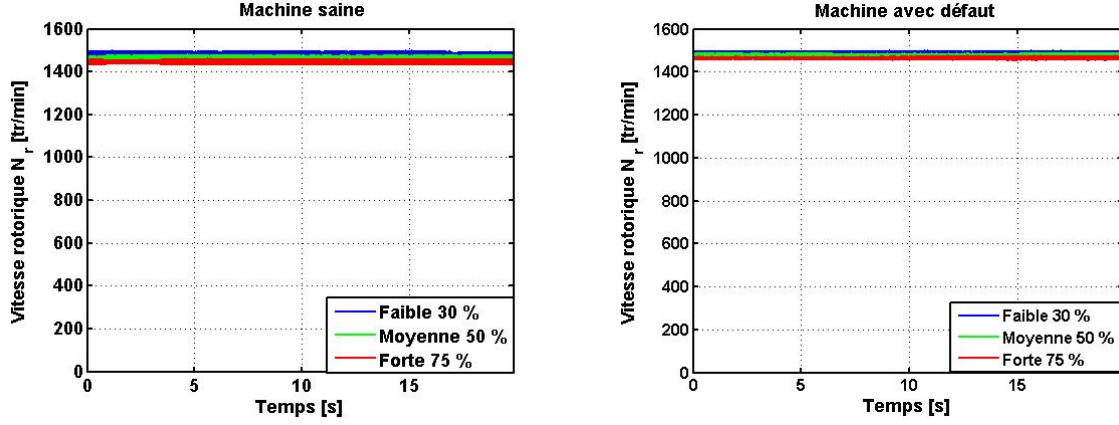


Fig. III.8: Vitesse de rotation rotorique (saine et avec défaut)

À partir des deux figures précédentes, on remarque que la vitesse rotorique diminue progressivement lorsque la charge augmente. Cette diminution est observée dans le cas de la machine saine ainsi que dans le cas de la machine avec défaut.

Cette évolution est expliquée par l'augmentation du glissement lorsque la charge augmente.

Le glissement est donné par :

$$g(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (\text{III.26})$$

Lorsque la charge augmente, le glissement augmente, donc la vitesse rotorique diminue :

$$\text{Charge augmente} \implies g \text{ augmente} \implies N_r \text{ diminue}$$

Pour la machine saine :

$$\begin{cases} g(30\%) = \frac{1500 - 1485.24}{1500} \times 100 = 0.98\% \\ g(50\%) = \frac{1500 - 1465.87}{1500} \times 100 = 2.28\% \\ g(75\%) = \frac{1500 - 1447.72}{1500} \times 100 = 3.49\% \end{cases}$$

Pour la machine avec défaut :

$$\begin{cases} g(30\%) = \frac{1500 - 1477.00}{1500} \times 100 = 1.53\% \\ g(50\%) = \frac{1500 - 1455.56}{1500} \times 100 = 2.96\% \\ g(75\%) = \frac{1500 - 1435.35}{1500} \times 100 = 4.31\% \end{cases}$$

Dans le cas de la machine saine, les courbes restent plus proches de la vitesse synchrone. Dans le cas de la machine avec défaut, les courbes présentent une diminution supplémentaire de la vitesse rotorique, ce qui montre l'influence du défaut d'excentricité statique sur le comportement mécanique de la machine.

III.2.5.1 Élimination des ondulations pour la machine saine et avec défaut

Les courbes instantanées de la vitesse rotorique présentent des ondulations dues aux variations du couple mécanique et aux phénomènes dynamiques de la machine. Afin d'obtenir des courbes plus lisses et de déterminer les valeurs moyennes de la vitesse, on applique un filtre moyennneur.

Le filtre moyennneur utilisé est défini par :

$$N_r(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} N_r(i - k) \quad (\text{III.27})$$

Où $M = 1000$ représente la longueur de la fenêtre de filtrage.

Après filtrage, la valeur moyenne de la vitesse rotorique est calculée par :

$$\overline{N_r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_r(i)$$

Pour la machine saine :

- $\overline{N_r}(30\%) = 1485.23 \text{ tr/min}$;
- $\overline{N_r}(50\%) = 1465.86 \text{ tr/min}$;
- $\overline{N_r}(75\%) = 1447.72 \text{ tr/min}$.

Pour la machine avec défaut :

- $\overline{N_r}(30\%) = 1477.00 \text{ tr/min}$;
- $\overline{N_r}(50\%) = 1455.56 \text{ tr/min}$;
- $\overline{N_r}(75\%) = 1435.35 \text{ tr/min}$.

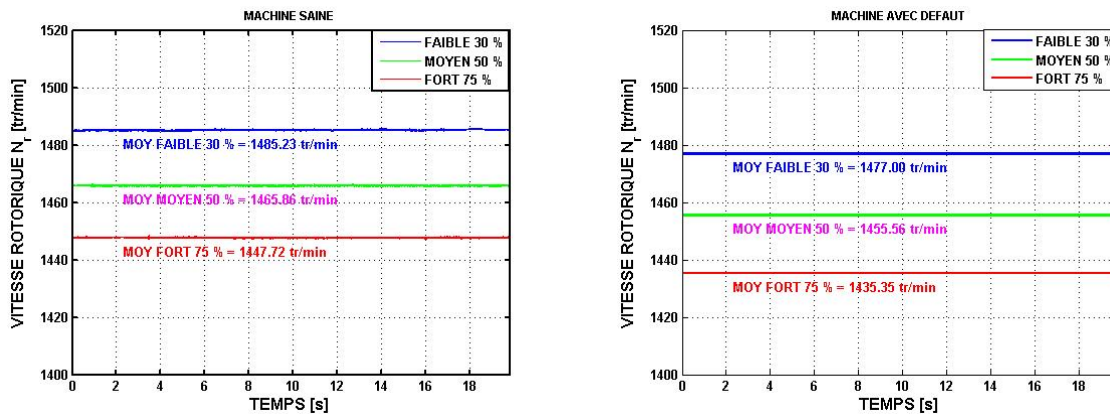


Fig. III.9: Vitesse rotorique moyenne après élimination des ondulations machine (saine et avec défaut)

On constate que les valeurs moyennes de la machine avec défaut sont inférieures à celles de la machine saine. Cette diminution est due à l'effet du défaut d'excentricité statique, qui perturbe le champ magnétique dans l'entrefer et entraîne une augmentation du glissement.

Interprétation des résultats

Les résultats montrent que la vitesse rotorique moyenne diminue lorsque la charge augmente. Cette diminution est due à l'augmentation du glissement.

Pour la machine saine, la vitesse moyenne passe de 1485.24 tr/min à 1447.72 tr/min lorsque la charge passe de 30 % à 75 %. Pour la machine avec défaut, elle passe de 1477.00 tr/min à 1435.35 tr/min pour les mêmes niveaux de charge.

III.2.6 Étude du couple mécanique

Après l'étude de la vitesse de rotation rotorique, l'analyse du couple mécanique constitue une étape importante pour évaluer le comportement de la machine asynchrone dans les deux états étudiés : machine saine et machine avec défaut. Le couple mécanique permet de caractériser l'effort électromécanique fourni par la machine pour différents niveaux de charge. Dans cette partie, trois niveaux de charge sont considérés : faible charge (30 %), charge moyenne (50 %) et forte charge (75 %).

L'objectif de cette étude est de calculer les valeurs moyennes du couple mécanique pour chaque niveau de charge, d'éliminer les ondulations présentes dans les signaux, puis de comparer les résultats obtenus entre la machine saine et la machine avec défaut.

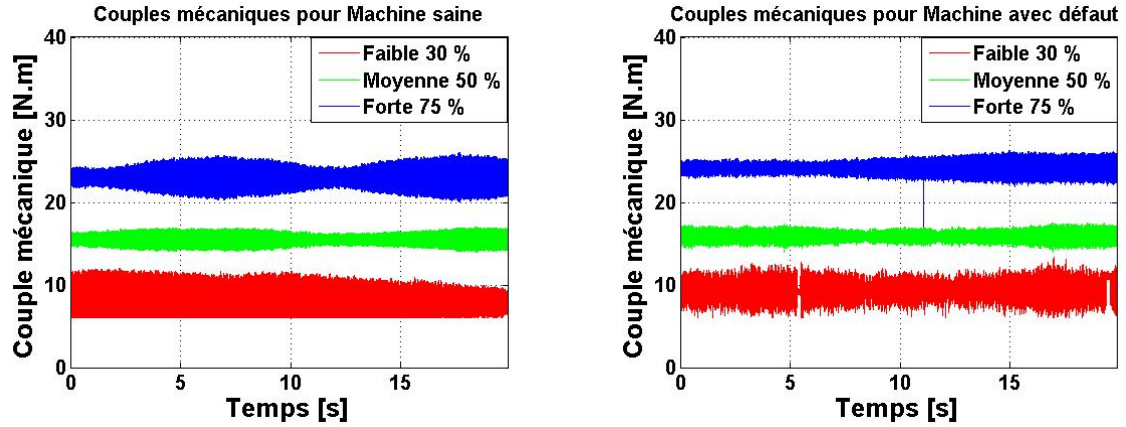


Fig. III.10: Courbes du couple mécanique pour la machine saine et la machine avec défaut (30 %, 50 %, 75 %).

Le couple mécanique est déterminé à partir de la puissance mécanique, de la charge appliquée, du rendement et de la vitesse rotorique. Il est donné par :

$$C = \frac{P_m \times (\text{charge}/100) \times \eta \times 60}{2\pi N_r} \quad (\text{III.28})$$

Avec :

$$P_m = 5500 \text{ W}, \quad \eta = 0.88$$

Ainsi, la relation numérique utilisée devient :

$$C = \frac{5500 \times (\text{charge}/100) \times 0.88 \times 60}{2\pi N_r}$$

Le couple mécanique est exprimé en Newton-mètre (N.m).

Pour machine saine :

$$\begin{cases} C(30\%) = 9.34 \text{ N.m} \\ C(50\%) = 15.77 \text{ N.m} \\ C(75\%) = 23.94 \text{ N.m} \end{cases}$$

Pour machine avec défaut :

$$\begin{cases} C(30\%) = 9.39 \text{ N.m} \\ C(50\%) = 15.88 \text{ N.m} \\ C(75\%) = 24.15 \text{ N.m} \end{cases}$$

Tab. III.2: Comparatif entre machine saine et avec défaut (N_r, g, C_n).

Machine	Saine			Avec défaut (DE) 50%		
	30%	50%	75%	30%	50%	75%
Vitesses (tr/min)	1485.24	1465.87	1447.72	1477.00	1455.56	1435.35
Glissement (%)	0.98	2.28	3.49	1.53	2.96	4.31
Couples (N.m)	9.34	15.77	23.94	9.39	15.88	24.15

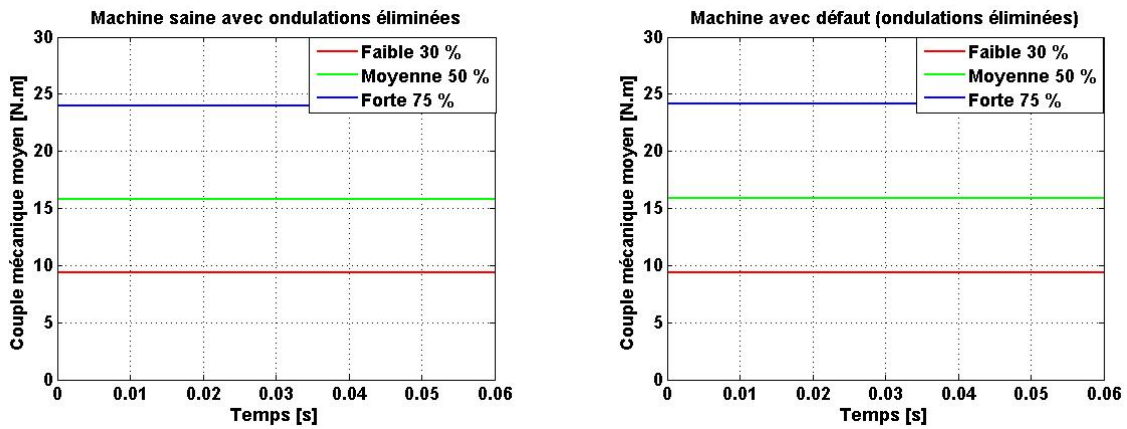


Fig. III.11: Valeurs moyennes du couple mécanique après élimination des ondulations

La comparaison entre les valeurs moyennes du couple mécanique de la machine saine et celles de la machine avec défaut est présentée dans le tableau suivant.

L'écart entre les deux états de la machine est calculé par :

$$\Delta C = C_{\text{défaut}} - C_{\text{saine}}$$

Le taux d'augmentation est calculé par :

$$\text{Augmentation}(\%) = \frac{C_{\text{défaut}} - C_{\text{saine}}}{C_{\text{saine}}} \times 100$$

Exemple :

$$\Delta C = 9.39 - 9.34 = 0.05 \text{ N.m}$$

$$\text{Augmentation} = \frac{0.05}{9.34} \times 100 = 0.54\%$$

Tab. III.3: Évolution des couples mécanique en fonction de la charge appliqué

2*Machine	Saine			Avec défaut (DE) 50%		
	30%	50%	75%	30%	50%	75%
Couples (N.m)	9.34	15.77	23.94	9.39	15.88	24.15
Écart ΔC (N.m)	0.05	0.11	0.21	0.05	0.11	0.21
Augmentation (%)	0.54	0.70	0.88	0.54	0.70	0.88

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que le couple mécanique augmente avec l'augmentation du niveau de charge. Cette évolution est logique, car lorsque la charge appliquée à la machine augmente, le moteur doit fournir un effort mécanique plus important pour maintenir son fonctionnement.

On remarque également que, pour chaque niveau de charge, le couple mécanique de la machine avec défaut est légèrement supérieur à celui de la machine saine. Cette augmentation est due à la diminution de la vitesse rotorique dans le cas de la machine avec défaut.

Le couple est inversement proportionnel à la vitesse rotorique N_r . Ainsi, lorsque la vitesse rotorique diminue, le couple mécanique augmente légèrement.

La comparaison montre que l'écart entre la machine saine et la machine avec défaut devient plus important lorsque la charge augmente. Comme le montre le tableau ci-dessus.

Cette évolution montre que l'effet du défaut devient plus visible lorsque la machine fonctionne sous une charge plus élevée. Le défaut provoque une diminution de la vitesse rotorique, une augmentation du glissement et, par conséquent, une légère augmentation du couple mécanique moyen.

En résumé, l'étude du couple mécanique confirme les résultats obtenus lors de l'analyse de la vitesse rotorique. La présence du défaut modifie le comportement mécanique de la machine, surtout lorsque la charge augmente. Les valeurs moyennes du couple mécanique avec élimination des ondulations permettent donc de mettre en évidence l'influence du défaut sur le fonctionnement de la machine asynchrone.

III.3 Application de l'analyse spectrale au diagnostic de défauts des machines asynchrones

Cette méthode est généralement utilisée pour le diagnostic des défauts dans les systèmes électromécaniques. Les défauts se manifestent par l'apparition de composantes fréquentielles supplémentaires et/ou par l'augmentation de l'amplitude de certaines

composantes du spectre du courant statorique, de la puissance électrique instantanée ou de la tension induite après la déconnexion de la machine asynchrone de son alimentation.

Les techniques de traitement numérique du signal, reposant principalement sur l'utilisation de capteurs de courant, de tension et, dans certains cas, de vitesse, sont considérées comme des solutions économiques et rapides. Cela explique leur large utilisation dans le domaine industriel.

III.3.1 Analyse de la machine saine sous différents niveaux de charge

Dans le cas d'une machine considérée comme saine, l'analyse spectrale permet d'établir le spectre de référence. Théoriquement, aucune composante de défaut ne devrait apparaître, mais les imperfections physiques inhérentes à la fabrication introduisent de légères signatures.

- **A. Sous charge faible (30%) :**

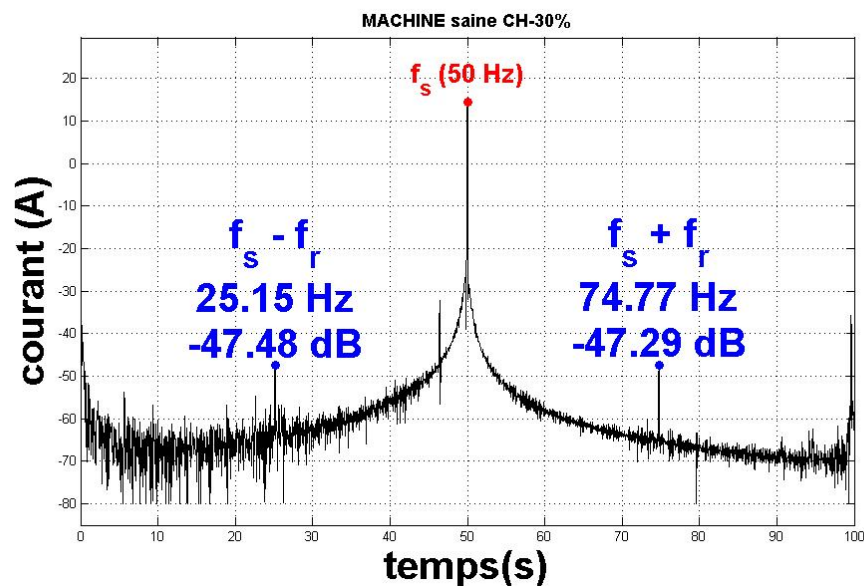


Fig. III.12: Spectre MCSA de la machine saine sous charge faible (30%).

À un niveau de charge de 30% (Figure 33), le glissement est minimal. Les composantes de bandes latérales apparaissent aux fréquences fixes de 25.15 Hz avec une amplitude de -47.48 dB pour le côté gauche, et 74.77 Hz avec une amplitude de -47.29 dB pour le côté droit. Ces pics de faible amplitude représentent l'excentricité naturelle du moteur.

- **B. Sous charge moyenne (50%)**

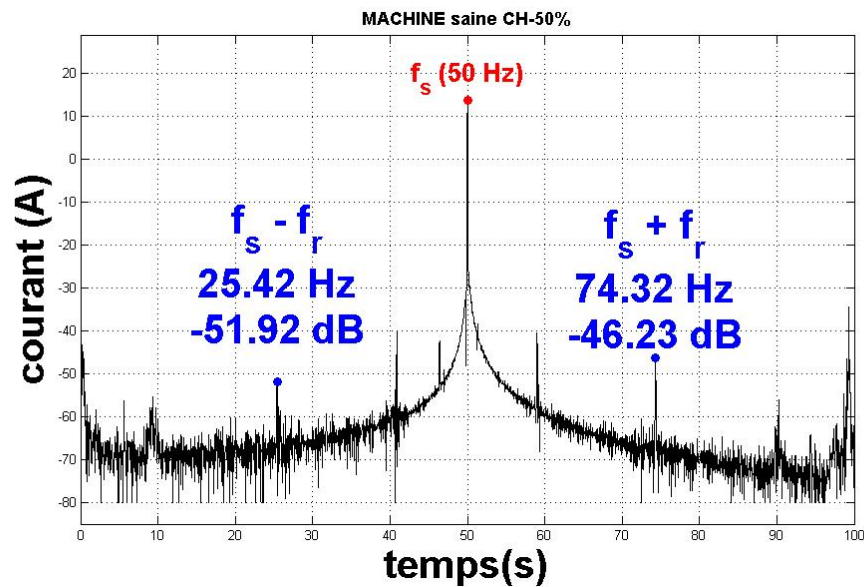


Fig. III.13: Spectre MCSA de la machine saine sous charge moyenne (50%).

En augmentant la charge à 50% (Figure 34), le moteur ralentit légèrement, ce qui fait varier le glissement. Cette modification physique déplace les bandes latérales de référence vers 25.42 Hz avec une atténuation de l'amplitude à -51.92 dB à gauche, tandis que la bande droite se stabilise à 74.32 Hz avec une amplitude de -46.23 dB.

• C. Sous charge forte (75%) :

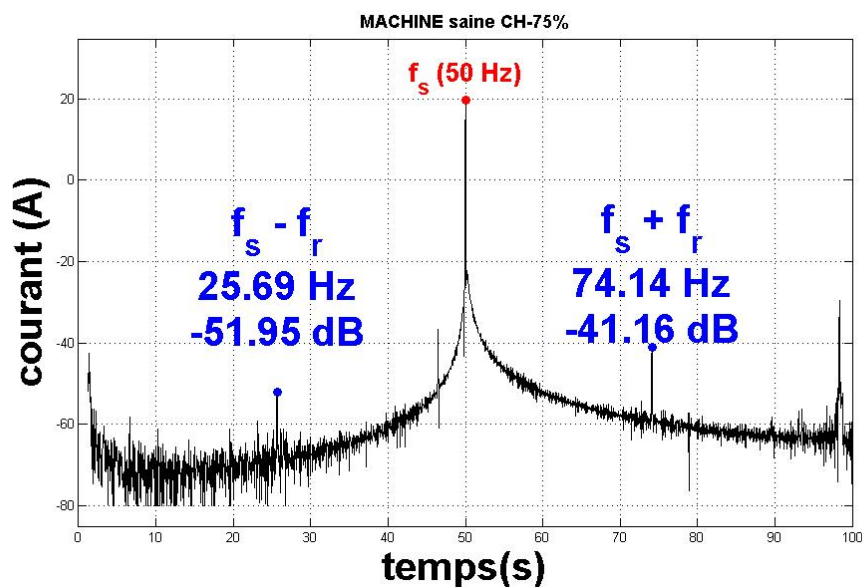


Fig. III.14: Spectre MCSA de la machine saine sous charge forte (75%).

Sous une charge forte de 75% (Figure 35), l'effet du glissement est maximal parmi les cas testés. Les fréquences caractéristiques se déplacent davantage pour s'établir à 25.69

Hz avec une amplitude de -51.95 dB pour la bande gauche, et à 74.14 Hz avec une amplitude de -41.16 dB pour la bande droite.

III.3.2 Analyse de la machine avec défaut d'excentricité sous différents niveaux de charge

L'introduction d'un défaut d'excentricité dynamique (DE) de 50% modifie la perméance de l'entrefer et crée une force magnétique radiale déséquilibrée (UMP). Cette anomalie se manifeste par une augmentation flagrante de l'amplitude des pics découverts précédemment.

- **A. Sous défaut avec charge faible (30%) :**

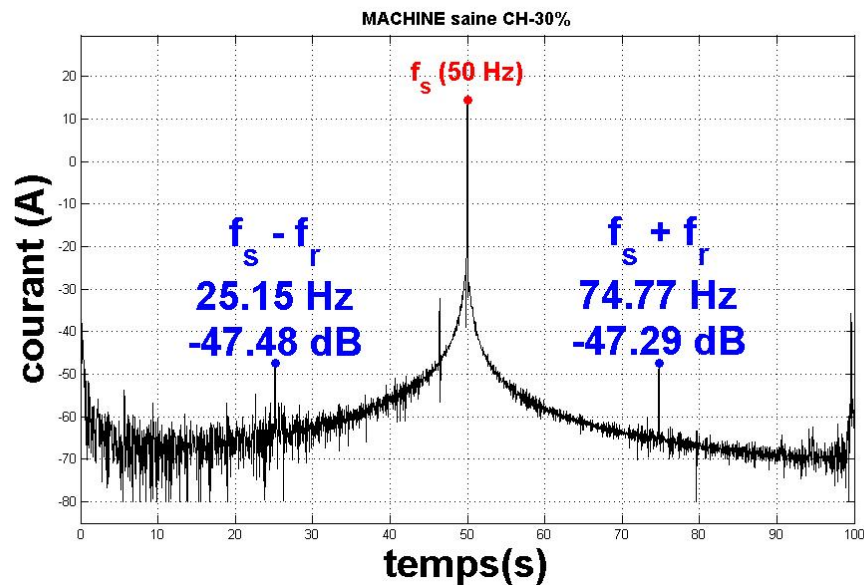


Fig. III.15: Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge faible (30%).

La Figure III.14 met en évidence l'impact du défaut à faible charge. Les fréquences restent calées à 25.15 Hz et 74.77 Hz. Cependant, l'amplitude du pic gauche subit une élévation claire, grimant à -41.22 dB (soit une hausse de 6.26 dB par rapport à l'état sain). Le pic droit augmente également pour atteindre -42.10 dB.

- **B. Sous défaut avec charge moyenne (50%) :**

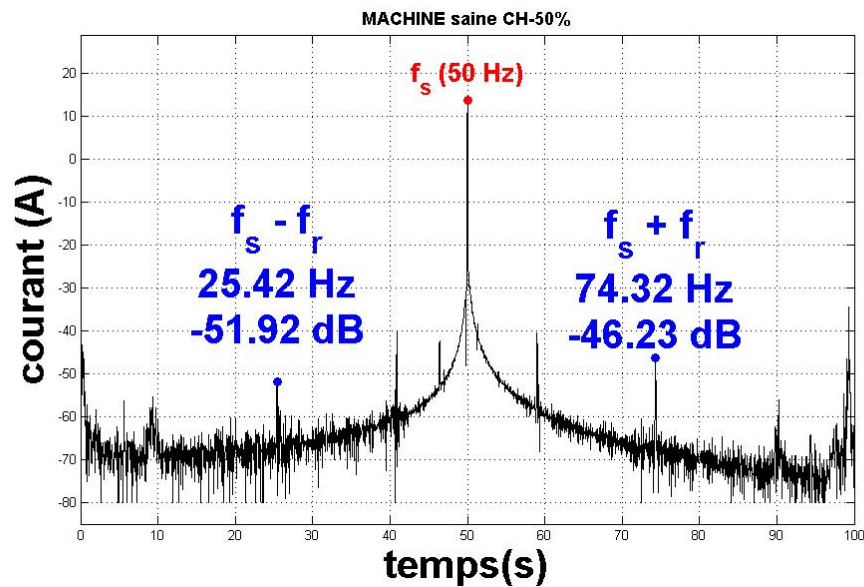


Fig. III.16: Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge moyenne (50%).

En présence d'une charge de 50% (Figure 37), le comportement de la machine défaillante devient très prononcé. La composante gauche se situe à 25.44 Hz et subit une augmentation remarquable, atteignant -39.69 dB (une hausse de 12.23 dB par rapport à la référence saine). La composante droite locale se fixe à 74.32 Hz avec une amplitude de -42.81 dB.

• C. Sous défaut avec charge forte (75%) :

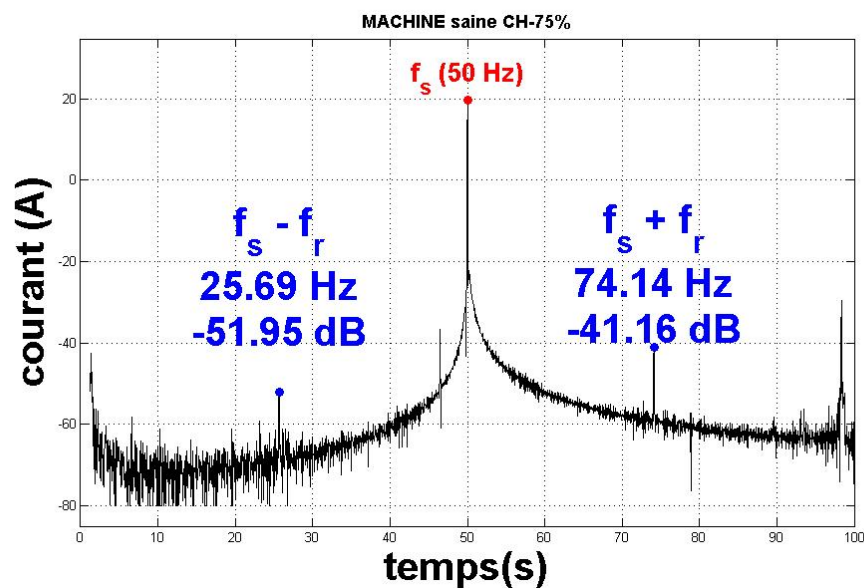


Fig. III.17: Spectre MCSA de la machine avec défaut sous charge forte (75%).

La Figure 38 illustre la sévérité maximale du défaut combiné à une forte charge. La composante spectrale gauche à 25.65 Hz grimpe drastiquement à -39.69 dB, ce qui représente un écart de diagnostic de 12.26 dB par rapport à l'état sain. De son côté, la composante droite s'établit à 74.16 Hz avec une amplitude de -41.09 dB. Cette forte élévation confirme que les contraintes mécaniques liées à la charge amplifient la visibilité de la signature du défaut d'excentricité.

Tab. III.4: Résultat comparatif ($f_s \mp f_r$) d'analyse spectrale de deux machines saine et avec défaut pour plusieurs charges 30%, 50% et 75%.

Machines	Saine			Avec défaut		
Charges	30%	50%	75%	30%	50%	75%
f_r (Hz)	24.85	24.58	24.31	24.85	24.56	24.35
Glissement (%)	0.60	1.68	2.76	0.60	1.76	2.60
Vitesses N_r (tr/min)	1491.00	1474.80	1458.60	1491.00	1473.60	1461.00
$f_s - f_r$ (Hz/dB)	25.15 Hz / -47.48 dB	25.42 Hz / -51.92 dB	25.69 Hz / -51.95 dB	25.15 Hz / -41.22 dB	25.44 Hz / -39.69 dB	25.65 Hz / -39.69 dB
$f_s + f_r$ (Hz/dB)	74.77 Hz / -47.29 dB	74.32 Hz / -46.23 dB	74.14 Hz / -41.16 dB	74.77 Hz / -42.10 dB	74.32 Hz / -42.81 dB	74.16 Hz / -41.09 dB

III.4 Influence de la variation de charge sur le diagnostic (Superposition et Comparaison)

L'un des apports majeurs de ce travail de fin d'études réside dans l'étude unifiée et comparative à travers la superposition directe des spectres. En pratique, un diagnostic basé sur la simple lecture isolée d'un spectre peut induire des conclusions totalement erronées. En effet, comme le niveau de charge et le degré d'excentricité dynamique provoquent tous les deux des variations d'amplitude et des décalages fréquentiels similaires, la superposition spectrale (Machine Saine vs Machine Défaillante) pour un même point de fonctionnement devient une nécessité absolue pour isoler la signature réelle du défaut.

Dans cette section, nous exploitons les capacités graphiques de nos algorithmes développés sous MATLAB pour superposer le spectre de la machine saine (représenté en noir) et celui de la machine avec défaut d'excentricité (représenté en rouge), et ce, pour les trois niveaux de charge (faible, moyenne et forte).

III.4.1 Analyse, calcul et superposition sous charge faible (30%)

Le premier scénario correspond à un régime de fonctionnement à faible charge. À ce point de fonctionnement, les paramètres extraits de nos simulations pour les deux machines sont identiques :

- Machine Saine : $N_r = 1491.00$ tr/min $g = 0.0060$ (0.60%)
- Machine avec Défaut 30% : $N_r = 1491.00$ tr/min $g = 0.0060$ (0.60%)

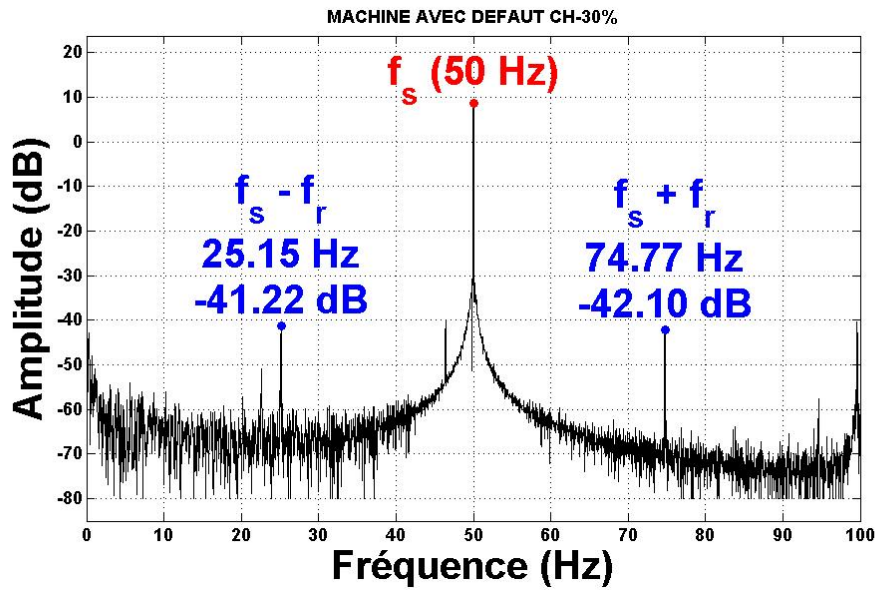


Fig. III.18: Superposition des spectres MCSA (Saine vs Défaut) à charge faible.

En analysant la Figure 39, nous observons une superposition de la composante fondamentale à 50 Hz. En introduisant ce glissement ($g = 0.60\%$) dans la loi théorique du défaut, les indicateurs se positionnent exactement aux fréquences de 25.15 Hz pour la bande latérale gauche ($f_s - f_r$) et 74.77 Hz pour la bande latérale droite ($f_s + f_r$).

La superposition révèle les amplitudes suivantes :

- Pour la bande gauche, l'amplitude passe de -47.48 dB (Saine) à -41.22 dB (Défaut), soit un écart de +6.26 dB.
- Pour la bande droite, l'amplitude passe de -47.29 dB (Saine) à -42.10 dB (Défaut), soit un écart de +5.19 dB.

Commentaire et interprétation :

À faible charge, la vitesse rotorique reste très proche de la vitesse de synchronisme (1500 tr/min), ce qui maintient les bandes latérales très près des fréquences théoriques à vide. L'écart d'amplitude reste modéré (autour de 6 dB) car à ce niveau de charge, les courants statoriques sont encore faibles, ce qui limite l'intensité de la force magnétique radiale déséquilibrée (UMP) provoquée par l'excentricité.

III.4.2 Analyse, calcul et superposition sous charge moyenne (50%)

Le deuxième scénario examine le comportement de la machine sous un régime de charge moyenne. L'augmentation du couple résistant modifie la vitesse et le glissement :

- Machine Saine : $N_r = 1474.80$ tr/min $g = 0.0168$ (1.68%)

- Machine avec Défaut : $N_r = 1473.60$ tr/min $g = 0.0176$ (1.76%)

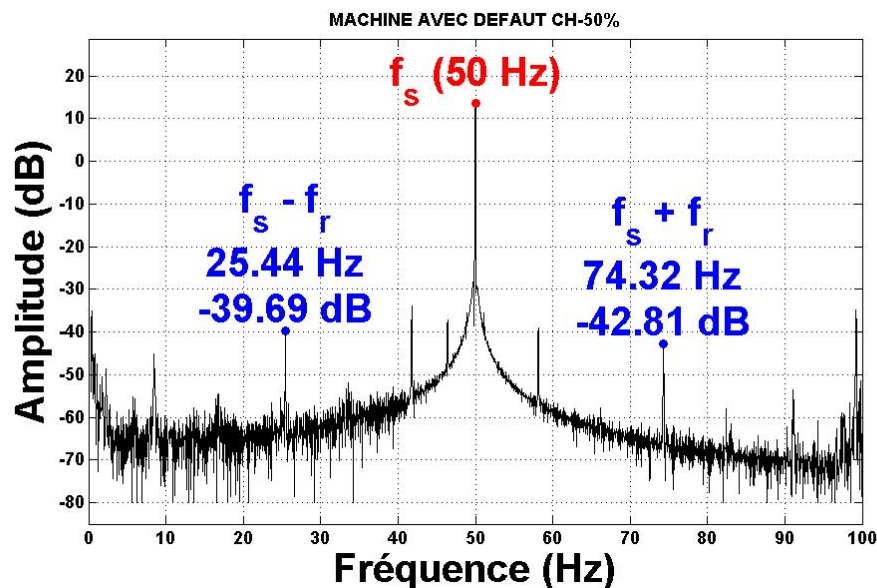


Fig. III.19: Superposition des spectres MCSA (Saine vs Défaut) à charge moyenne.

La Figure 40 met en évidence le déplacement des fréquences d'excentricité dû à l'augmentation du glissement. Pour la machine saine ($g = 1.68\%$), la bande gauche apparaît à 25.42 Hz (-51.92 dB). Pour la machine défaillante, l'augmentation légèrement supérieure du glissement ($g = 1.76\%$) déplace le pic à 25.44 Hz (-39.69 dB).

La superposition directe révèle une évolution majeure des amplitudes :

- La bande latérale gauche de la machine saine est à -51.92 dB, tandis qu'en présence de défaut, elle grimpe à -39.69 dB. L'écart de diagnostic (Δdb) atteint ici +12.23 dB.
- La bande latérale droite se fixe à 74.32 Hz pour les deux états, passant de -46.23 dB (Saine) à -42.81 dB (Défaut).

Commentaire et interprétation :

L'élévation de plus de 12 dB sur la bande latérale gauche constitue un indicateur hautement fiable. Nous remarquons une légère baisse de vitesse sur la machine défaillante 1473.60 tr/min par rapport à la machine saine 1474.80 tr/min. Ce phénomène physique s'explique par le fait que l'excentricité dynamique génère des forces de frottement magnétique et des couples pulsatoires additionnels qui augmentent légèrement les pertes mécaniques, ralentissant ainsi le rotor. III.5.3. Analyse, calcul et superposition sous charge forte (75

Le dernier scénario étudie la machine poussée à un régime de charge élevée. Les contraintes mécaniques sur l'arbre atteignent leur paroxysme :

- Machine saine : $N_r = 1458.60$ tr/min | $g = 0.0276$ (2.76)
- Machine avec défaut : $N_r = 1461.00$ tr/min | $g = 0.0260$ (2.60)

Figure 40 : Superposition des spectres MCSA de la machine (saine vs défaut) à charge forte.

D'après la Figure 40, le glissement important décale davantage les bandes latérales. Pour la machine saine, les bandes se situent à 25.69 Hz (-51.95 dB) et 74.14 Hz (-41.16 dB). Pour la machine présentant un défaut ($g = 2.60$)

La superposition montre un comportement critique :

- La composante gauche de la machine défaillante se maintient à une amplitude élevée de -39.69 dB, alors que celle de la machine saine est de -51.95 dB. L'écart atteint ainsi +12.26 dB.
- La composante droite présente une amplitude de -41.09 dB pour la machine défaillante contre -41.16 dB pour la machine saine.

Commentaire et interprétation :

Ce cas d'étude est le plus représentatif de la sévérité du défaut. L'écart de +12.26 dB observé sur la bande latérale gauche confirme que la composante ($f_s - f_r$) constitue l'indicateur le plus pertinent pour un diagnostic industriel fiable. On observe également que la machine présentant un défaut tourne légèrement plus vite (1461.00 tr/min) que la machine saine (1458.60 tr/min). Cette légère différence peut s'expliquer par les interactions complexes de la force magnétique radiale déséquilibrée (UMP) sous forte charge, susceptibles de modifier localement le couple électromagnétique moyen selon l'alignement des axes magnétiques.

III.5 . Conclusion

En conclusion, ce troisième chapitre a été consacré à la validation expérimentale de la technique d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) pour le diagnostic du défaut d'excentricité dynamique dans les machines asynchrones à cage d'écureuil.

Dans un premier temps, l'étude temporelle a permis de vérifier la cohérence physique ainsi que le comportement dynamique de la machine dans les états sain et défaillant. Dans un second temps, l'application de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) a démontré l'efficacité de l'analyse spectrale pour extraire les signatures fréquentielles caractéristiques du défaut. L'apparition et l'évolution des bandes latérales autour de la fréquence d'alimentation constituent des indicateurs particulièrement sensibles à la présence d'une excentricité dynamique.

L'analyse comparative réalisée sous trois niveaux de charge (30

La superposition des spectres des machines saine et défaillante a également mis en évidence l'importance de prendre en compte les conditions réelles de fonctionnement lors du

diagnostic. En effet, la variation de la charge influence simultanément la position fréquentielle et l'amplitude des composantes spectrales, ce qui montre qu'un diagnostic fondé uniquement sur un seuil d'amplitude peut conduire à des interprétations erronées.

Enfin, les résultats obtenus confirment que la surveillance de la composante fréquentielle gauche ($f_s - f_r$), associée à une connaissance précise du point de fonctionnement de la machine, constitue une méthode de diagnostic robuste, non invasive et particulièrement adaptée aux applications de maintenance prédictive des machines asynchrones.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié le diagnostic des défauts d'excentricité dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par l'analyse spectrale. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la maintenance prédictive des machines électriques, dont l'objectif principal est de détecter les défauts à un stade précoce afin d'éviter les arrêts imprévus, de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la disponibilité des équipements industriels.

La machine asynchrone à cage occupe une place prépondérante dans le domaine industriel grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction, son faible coût et sa fiabilité. Cependant, malgré ces avantages, elle reste soumise à plusieurs contraintes d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Parmi ces anomalies, l'excentricité de l'entrefer représente un défaut majeur, car elle provoque une non-uniformité de l'espace radial entre le stator et le rotor. Cette non-uniformité modifie la distribution du flux magnétique, engendre des forces radiales déséquilibrées (UMP), accroît les vibrations et peut conduire à une dégradation destructive de la machine.

Le travail mené tout au long de ce projet s'est articulé autour de trois grands axes :

Dans le **premier chapitre**, nous avons présenté les généralités sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous avons décrit sa constitution principale (stator, rotor et paliers) ainsi que son principe de fonctionnement basé sur la création d'un champ magnétique tournant. Nous avons également abordé les notions fondamentales de maintenance et de diagnostic, puis dressé une typologie des différents défauts (statoriques, rotoriques, de roulements et d'excentricité). Cette première étape a mis en évidence le fait que la compréhension de la structure interne et du comportement de la machine est indispensable pour cerner l'origine des défaillances et anticiper leurs conséquences.

Le **deuxième chapitre** a été consacré aux méthodes de diagnostic des défauts. Nous y avons exposé les outils essentiels du traitement du signal, en particulier la transformée de Fourier discrète et la transformée de Fourier rapide (FFT), qui permettent de transposer l'analyse du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Plusieurs techniques alternatives ont été examinées, telles que l'analyse temps-fréquence, l'analyse temps-échelle (ondelettes), l'analyse du vecteur de Park, ainsi que le suivi des grandeurs physiques telles que la vitesse, le couple et la puissance instantanée. Parmi ces approches, l'analyse spectrale du courant statorique (*Motor Current Signature Analysis* - MCSA) s'est imposée en raison de son

caractère non invasif, de sa simplicité de mise en œuvre et de sa remarquable efficacité.

Le **troisième chapitre** a porté sur la validation expérimentale du défaut d'excentricité dynamique. Les essais ont été réalisés sur un banc d'essai industriel équipé d'une machine de 5,5 kW. Deux états de fonctionnement ont été confrontés : une machine saine et une machine présentant un défaut d'excentricité dynamique de 50%, et ce, sous trois niveaux de charge distincts (30%, 50% et 75%).

Les conclusions majeures issues des mesures et des traitements spectraux sont les suivantes :

- **Comportement mécanique et temporel** : L'analyse cinématique a mis en évidence que l'augmentation de la charge provoque une chute de la vitesse rotorique et une élévation du glissement. En présence du défaut d'excentricité, la vitesse moyenne subit une diminution supplémentaire due aux couples de freinage d'origine magnétique, ce qui confirme l'impact direct du défaut sur le comportement mécanique global.
- **Évolution du couple résistant** : L'étude du couple mécanique a révélé que pour chaque point de fonctionnement, le couple de la machine défaillante est légèrement supérieur à celui de la machine saine (de l'ordre de 0,54% à 0,88%). Le couple étant inversement proportionnel à la vitesse rotorique ($C \propto 1/N_r$), la baisse de vitesse induite par l'excentricité se traduit par cette élévation du couple moyen.
- **Signatures fréquentielles caractéristiques** : L'application de la FFT aux courants statoriques a validé la loi théorique d'apparition des bandes latérales autour de la fréquence fondamentale, précisément aux fréquences harmoniques $f_{de} = f_s \pm f_r$. La comparaison directe des spectres montre une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes en présence du défaut, la composante gauche ($f_s - f_r$) s'affirmant comme l'indicateur le plus sensible et le plus fiable.
- **Influence de la charge sur la détectabilité** : Il a été rigoureusement démontré que la visibilité du défaut dépend du point de fonctionnement. À faible charge (30%), l'écart d'amplitude entre l'état sain et l'état défaillant reste modéré. En revanche, sous charge moyenne et forte, cet écart s'amplifie considérablement pour atteindre plus de 12 dB sur la composante gauche. L'augmentation de la charge exalte donc la signature spectrale de l'excentricité.

La technique de superposition spectrale développée sous MATLAB s'est avérée cruciale. Elle permet de s'affranchir des incertitudes en distinguant les composantes exclusivement liées à l'anomalie de celles induites par les imperfections intrinsèques de fabrication ou par le bruit de fond du variateur de vitesse industriel. Les résultats prouvent qu'un diagnostic robuste ne peut s'appuyer sur un simple seuil d'amplitude absolu, mais doit impérativement intégrer la connaissance de la charge et du glissement réel de la machine.

En somme, ce travail de fin d'études valide l'analyse spectrale du courant statorique comme une méthode non invasive, performante et parfaitement adaptée aux exigences industrielles de la maintenance prédictive.

Perspectives

Afin de prolonger et d'approfondir les investigations menées dans le cadre de ce mémoire, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées :

1. **Extension aux autres variantes d'excentricité** : Étendre l'approche expérimentale et l'analyse spectrale au diagnostic de l'excentricité statique et de l'excentricité mixte, afin d'établir un catalogue complet d'indicateurs capables de discriminer précisément la nature géométrique du défaut d'entrefer.
2. **Diagnostic multi-défauts combinés** : Étudier l'effet de la coexistence de l'excentricité avec d'autres défaillances fréquentes, telles que les cassures de barres rotoriques, les courts-circuits entre spires statoriques ou les défauts localisés de roulements, pour évaluer les risques d'interférences spectrales.
3. **Traitements avancés en régime non stationnaire** : Implémenter des outils avancés de traitement du signal (tels que la transformée en ondelettes discrète/continue ou la transformée de Hilbert-Huang) pour assurer une surveillance continue et fiable lors des régimes transitoires de démarrage ou lors des variations dynamiques de charge.
4. **Intelligence Artificielle et Automatisation** : Intégrer des algorithmes d'apprentissage automatique (*Machine Learning* ou réseaux de neurones profonds) alimentés par les caractéristiques spectrales extraites ($f_s \pm f_r$), en vue de développer un système expert d'aide à la décision capable de classifier automatiquement le type de défaut et de quantifier son degré de sévérité.

Bibliographie

- [1] J. Maitre, «Reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : application des modèles d'intelligence artificielle», Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, Mai 2017.
- [2] A. Medoued, «Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques», Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955 – Skikda, Algérie, Mars 2012.
- [3] A. H. Bonnett et G. C. Soukup, «Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, juillet/août 1992, pp. 921–937.
- [4] A. Abed, «Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, Mars 2002.
- [5] Electrical Academia, «Three-Phase Induction Motor Construction», disponible en ligne : <https://electricalacademia.com/induction-motor/three-phase-induction-motor-construction/>, [Consulté le 05 mars 2024].
- [6] I. Boldea et S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*, CRC Press LLC, chapitre 1, 2002.
- [7] G. Didier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, Octobre 2004.
- [8] SlideShare, «Induction Motors», disponible en ligne : <https://www.slideshare.net/slideshow/induction-motors-48218864/48218864>, [Consulté le 05 mars 2024].
- [9] B. Raison, «Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2000.
- [10] G. Didier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.

- [11] O. Ondel, «Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone», Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, 2006.
- [12] I. Boldea et S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*, Electric Power Engineering Series, CRC Press, 2001.
- [13] S. Hamdani, «Modélisation, détection et classification des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage», Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2001.
- [14] T. Boumegoura, «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic», Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, 2001.
- [15] A. H. Bonnett et G. C. Soukup, «Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, juillet/août 1992, pp. 921–937.
- [16] S. Belhamdi, «Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone», Thèse de magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2005.
- [17] H. Razik, «Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance», Faculté des Sciences, Nancy, CEDEX, juin 2002.
- [18] Z. Sara, «Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées», Mémoire de magister, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [19] B. Vaseghi, «Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spores», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 3 décembre 2009.
- [20] A. Ibrahim, «Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée», Thèse de doctorat, Université Jean Monnet – Saint-Étienne, France, 2009.
- [21] S. Bazi, «Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur», Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 08 décembre 2016.
- [22] A. Maghraoui et A. Deboucha, «Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage», Projet de fin d'études, Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, Algérie, 2005/2006.

- [23] M. Fenger, M. Susnik, P. Laderoute et W. T. Thomson, «Development of a Tool to Detect Faults in Induction Motors via Current Signature Analysis», *Iris Rotating Machine Conference*, Santa Monica, Canada, juin 2003.
- [24] S. Bazine, «Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut», Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle, Université de Poitiers, France, 2009.
- [25] S. A. S. Al Kazzaz et G. K. Singh, «Experimental Investigations on Induction Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using Digital Signal Processing Techniques», *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197–221, 2003.
- [26] G. Didier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, Octobre 2004.
- [27] B. Boashash, «The Relationship Between Instantaneous Frequency and Time-Frequency Representations», *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp. 1458–1462, 1993.
- [28] B. Ristic, «Kernel Design for Time-Frequency Signal Analysis Using the Radon Transform», *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp. 1996–2008, mai 1993.
- [29] W. J. Wang, «Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 192, no. 5, pp. 927–939, 1996.
- [30] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott et M. W. Madden, «Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, pp. 873–879, décembre 1988.
- [31] J. Salsona, «Effects of Rotor Bar and End Ring Faults over the Signals of a Position Estimation Strategy for Induction Motors», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, pp. 873–879, décembre 1988.
- [32] M. H. Benbouzid, «Induction Motors' Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 14, no. 1, janvier 1999.
- [33] B. Raison, «Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2000.
- [34] S. Bachir, «Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique», Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, décembre 2002.

- [35] J. Lesenne, F. Notelet et G. Séguier, *Introduction à l'électrotechnique approfondie*, Technique et Documentation, 1981.
- [36] H. Najjari, «Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park's Vector Pattern Learning Approach», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, mai/juin 2000.
- [37] J. Milimonfared, H. M. Kelk, S. Nandi et H. A. Toliyat, «A Novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction Motors», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1000–1006, septembre/octobre 1999.
- [38] H. Henao, G. A. Capolino et C. Martis, «On the Stray Flux Analysis for the Detection of the Three-Phase Induction Machine Faults», *Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting*, vol. 2, 2003.
- [39] M. Trzynadlowski et E. Ritchie, «Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors : A Case of Rotor Cage Faults», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 47, no. 5, pp. 1092–1099, octobre 2000.
- [40] S. F. Legowski, A. H. M. Sadrul Ula et A. M. Trzynadlowski, «Instantaneous Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 4, juillet/août 1996.
- [41] A. M. Trzynadlowski, «Diagnostic of Mechanical Abnormalities in Induction Motor Using Instantaneous Electric Power», *Proceedings of the International Electric Machines and Drives Conference*, 1997, pp. 91–93.
- [42] J. Faiz, B. M. Ebrahimi et M. B. B. Sharifian, «Finite Element Transient Analysis of an On-Load Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor with Static Eccentricity», *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, pp. 207–227, juin 2007.
- [43] B. Akin, U. Orguner, H. A. Toliyat et M. Rayner, «Low Order PWM Inverter Harmonics Contributions to the Inverter-Fed Induction Machine Fault Diagnosis», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 210–219, février 2008.
- [44] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin et H. A. Toliyat, «Finite Element Transient Analysis of Induction Motors under Mixed Eccentricity Fault», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 1, pp. 66–74, janvier 2008.
- [45] S. Nandi, R. M. Bharadwaj et H. A. Toliyat, «Performance Analysis of a Three-Phase Induction Motor under Mixed Eccentricity Condition», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 3, pp. 392–397, septembre 2002.

- [46] H. A. Toliyat, M. S. Arefeen et A. G. Parlos, «A Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 4, pp. 910–918, juillet 1996.
- [47] R. Cameron, W. T. Thomson et A. B. Dow, «Vibration and Current Monitoring for Detecting Air-Gap Eccentricity in Large Induction Motors», *IEE Proceedings B*, vol. 133, no. 3, pp. 155–163, mai 1986.
- [48] S. Saadi, «Diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette», Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie, 19 janvier 2017.