



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Électrotechnique

Machines électriques

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Tourqui Alaa Eddine

Mounir Bousarai

Le : **mardi 3 juin 2025**

Diagnostic de défaut de roulement dans les moteurs asynchrones

Jury :

M.	GHOGGAL Adel	Pr	Université de Biskra	Président
M.	YAHIA Khaled	Pr	Université de Biskra	Examineur
M.	SAHRAOUI Mohamed	Pr	Université de Biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Électrotechnique

Machine électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Diagnostic de défaut de roulement dans les moteurs asynchrones

Le : mardi 3 juin 2025

Présenté par :

Tourqui Alaa Eddine

Mounir Bousarai

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. SAHRAOUI Mohamed

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions avant tout Dieu, Le Tout-Puissant, de nous avoir comblés de ses bienfaits. C'est grâce à Sa force et à Sa guidance que nous avons pu mener à bien ce mémoire, avec persévérance et détermination.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, **Pr. Mohamed SAHRAOUI**, pour la qualité de son suivi, la richesse de ses conseils, ainsi que le temps et l'attention qu'il nous a consacrés tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail et pour leurs observations constructives.

Nous souhaitons aussi remercier chaleureusement toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué, par leur aide, leur soutien ou leurs encouragements, à l'aboutissement de ce projet.

Enfin, à ceux que nous n'avons pas cités nommément, qu'ils trouvent dans ces mots l'expression de notre reconnaissance sincère et de notre gratitude profonde

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

À nos mères, pour leur amour inconditionnel, leurs prières et leur soutien sans faille.

À nos pères, pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leur confiance en nous.

À nos frères et sœurs, pour leur présence, leur affection et leur compréhension.

À nos familles, pour leur appui moral tout au long de ce parcours.

À nos amis, pour leurs encouragements, leur aide et les bons moments partagé

CHAPITRE – I - Généralités sur le diagnostic et la maintenance des moteurs asynchrones, et leur défaillances

1. Introduction.....	13
2. Diagnostic et surveillance.....	13
2. 1 Surveillance.....	13
2. 2 Le diagnostic.....	13
2. 3 Défaut, panne, défaillance.....	14
2. 4 Identification du défaut.....	14
2. 5 Fiabilité.....	14
2. 6 Sécurité.....	14
2. 7 Détection.....	14
2. 8 Supervision.....	14
2. 9 Perturbation.....	14
2. 10 Symptôme.....	14
2. 11 Dysfonctionnement.....	15
2. 12 Résidu.....	15
3. Terminologie relative à la maintenance et au diagnostic.....	15
3. 1 Définition de la maintenance.....	15
3. 2 Maintenabilité.....	16
3. 3 Maintenance corrective.....	16
3. 4 Maintenance préventive.....	16
3. 5 Maintenance conditionnelle.....	17
4. Constitution de la machine asynchrone.....	17
4.1 Introduction.....	17
4. 2 Le stator.....	18
4. 3 Le rotor à cage.....	18
4. 4 Les paliers.....	19
4. 5 Principe de fonctionnement des moteurs asynchrones.....	19

5. Les défauts dans les machines asynchrones.....	20
5.1 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	20
A. Défauts internes.....	21
B. Défauts externes.....	21
5.2 Principaux défauts des entraînements électriques.....	21
5.2.1 Défauts d'ordre mécanique.....	22
A. Défauts de flasque.....	22
B. Défauts de l'arbre.....	23
5.3 Défauts au stator.....	23
5.3.1 Court-circuit entre spires de la même phase.....	23
5.3.2 Court-circuit entre phases.....	23
5.4 Défauts au rotor.....	24
5.4.1 Défaillances du circuit magnétique.....	24
5.4.2 Défaillances des conducteurs.....	24
6. Excentricité.....	24
6.1 Types d'excentricité.....	25
A. Excentricité statique.....	25
B. Excentricité dynamique.....	25
7. Conclusion.....	25

CHAPITRE – II - Les défauts de roulement et méthodes de détection

1. Introduction.....	26
2. Définition du roulement.....	26
3. Constitution d'un roulement.....	27
3.1 La bague extérieure.....	27
3.2 La bague intérieure.....	27

3.3 Billes	27
3.4 La cage.....	27
4. Classement et différents types de roulement.....	28
4. 1 Roulement rigide à une seule rangée de billes (contact radial)	28
4. 2 Roulement à contact oblique à une rangée de billes.....	29
4. 3 Roulement à contact oblique sur deux rangées de billes.....	29
4. 4 Roulement à rotule sur deux rangées de billes.....	30
4. 5 Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques.....	30
4. 6 Roulement à rouleaux coniques.....	31
5. Causes et types de défaillances des roulements.....	31
5.1 Causes principales des défaillances.....	31
5.2 Types de défaillances des roulements.....	32
5.2.1 Grippage.....	32
5.2.2 La corrosion.....	33
5.2.3 Usure.....	33
5.2.4 La fissuration des bagues.....	33
5.2.5 L'écaillage.....	34
6. Méthodes de Détection Les Défauts Roulements.....	35
6.1 Technique mécanique.....	35
6.1.1 Diagnostique par mesure de la température.....	36
6.2 Technique magnétique et électrique.....	36
6.2.1 Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	36
6.2.2 Diagnostique par l'analyse du courant statorique.....	36
7. Conclusion.....	37

CHAPITRE – III - application de l'Analyse vibratoire pour diagnostic Des défauts de roulements

1. Introduction.....	38
2. Banc d'essai des roulements "Bearing Data Center"	38
3. Fréquences de rotation caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistants.....	39
4. Fréquence de défauts (K) défini.....	40
5.Comparaison Fréquences caractéristiques théoriques éta sain et défaut de la bague intérieur	42
5.1 Défaut de la bague extérieure.....	42
5.2 Défaut de la bague intérieure.....	42
5.3 Défaut de Bille.....	43
6. Interprétation.....	43
7.Analyse du niveau global du spectre vibratoire).....	44
7.1 Empreinte spectrale globale du défaut de la bague extérieure	44
7.2 Empreinte spectrale globale du défaut de la bague intérieure	45
7.3 Empreinte spectrale globale du défaut des Billes	47
8. Organigramme de la méthodologie de détection des défauts de roulements par analyse vibratoire.....	48
9. Test de la méthode proposée.....	50
10.Conclusion.....	51
Conclusion Générale.....	52
Bibliographie.....	53

Listes figures

CHAPITRE – I - :

Figure	Titre	Page
1	Formes de la maintenance	14
2	Flasque Palier	18
3	<i>Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances</i>	19

CHAPITRE – II - :

Figure	Titre	Page
4	Constitution d'un Roulement billes	26
5	Roulement à bille à contact radial.	27
6	Roulement à contact oblique	28
7	Roulement à rotule sur deux rangées de billes	29
8	Roulement à rouleaux conique	30
9	Grippage d'une bague	31
10	Corrosion sur une piste de roulement	32
11	Ecaillage par (A) fatigue et (B) superficiel de la bague interne	33

CHAPITRE – III - :

Figure	Titre	Page
12	Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center »	37
13	Spectre état sain et défaut bague extérieure : 3HP – 0.014 inch.	43
14	Spectre état sain et défaut bague intérieure : 3HP – 0.014 inch.	44
15	Spectre état sain et défaut de la bille : 3HP – 0.014 inch	46
16	Organigramme des étapes de détection des défauts de roulement	48

Liste des tableaux

CHAPITRE – III - :

Tableau	Titre	Page
1	Fréquences de rotation de roulement avec les différents couples et les vitesses	38
2	La géométrie du roulement (en inch).	39
3	Les valeurs du coefficient K_{def} pour chaque type de défaut de roulement.	40
4	Fréquences caractéristiques pour les différents défauts de roulement($K*Fr$).	40
5	Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bague extérieure	41
6	Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bague intérieure	41
7	Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bille	42

Résumé

Les roulements constituent des éléments essentiels dans les machines tournantes et jouent un rôle crucial dans le maintien de la performance industrielle. Avec l'évolution des politiques de maintenance prédictive, la surveillance de leur état est devenue une nécessité incontournable afin d'éviter les pannes imprévues. Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts de roulements dans les machines asynchrones en se basant sur l'analyse vibratoire.

Une base de données issue du (Bearing Data Center) a été exploitée pour extraire les signaux vibratoires enregistrés dans différentes conditions de fonctionnement (normales et défectueuses). Des traitements préliminaires ainsi qu'une analyse fréquentielle ont été appliqués à ces signaux en vue d'extraire les indicateurs représentatifs de l'état du roulement.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la détection et la classification des défauts à travers une analyse avancée des signaux, et de déterminer les caractéristiques les plus pertinentes pour identifier les dégradations. Les résultats obtenus démontrent que l'analyse vibratoire constitue un outil efficace et précis pour le diagnostic des roulements, permettant d'atteindre des taux de classification élevés, ce qui confirme la pertinence de cette approche dans un cadre industriel réel.

ملخص

تُعد الدحاريج من العناصر الحيوية في الآلات الدوارة، وتلعب دورًا محوريًا في ضمان استمرارية الأداء الصناعي. ومع ازدياد الاعتماد على الصيانة التنبؤية، أصبحت مراقبة حالتها ضرورة أساسية لتفادي الأعطال المفاجئة. يندرج العمل المقدم في هذه المذكرة ضمن إطار تشخيص أعطاب الدحاريج في المحركات غير المتزامنة بالاعتماد على تحليل الاهتزازات

تم استخدام قاعدة بيانات من مركز بيانات الدحاريج (Bearing Data Center) لاستخلاص الإشارات الناتجة عن الاهتزازات في حالات تشغيل متعددة (سليمة ومعطوبة). وقد تم تطبيق المعالجات المسبقة وتحليل الترددات على هذه الإشارات، بالاعتماد على أدوات تحليل متقدمة لاستخراج المؤشرات المُمثلة لحالة العطب.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين قدرة الكشف والتصنيف لأنواع الأعطاب من خلال معالجة الإشارات وتحليلها، وتحديد الخصائص الأكثر دلالة على وجود الخلل. وأظهرت النتائج أن تحليل الإشارات الاهتزازية يوفر وسيلة فعّالة ودقيقة لتشخيص الأعطال، مما يدعم اعتماد هذه المنهجية في سياقات صناعية حقيقية

summary

Bearings are essential components in rotating machines and play a crucial role in maintaining industrial performance. With the evolution of predictive maintenance policies, monitoring their condition has become essential to avoid unforeseen breakdowns. This work is part of the diagnostics of bearing defects in asynchronous machines based on vibration analysis.

A database from the Bearing Data Center was used to extract vibration signals recorded under various operating conditions (normal and defective). Preliminary processing and frequency analysis were applied to these signals to extract indicators representative of the bearing's condition.

The main objective of this study is to improve defect detection and classification through advanced signal analysis and to determine the most relevant characteristics for identifying degradation. The results obtained demonstrate that vibration analysis constitutes an effective and precise tool for the diagnosis of bearings, making it possible to achieve high classification rates, which confirms the relevance of this approach in a real industrial setting.

Introduction générale

Les moteurs asynchrones constituent des actionneurs électriques incontournables dans une multitude d'applications industrielles, appréciés pour leur robustesse, leur simplicité de conception et leur coût relativement modéré. Leur fiabilité est un facteur clé pour assurer la continuité de la production et la sécurité des opérations. Cependant, comme tout équipement électromécanique, ils sont sujets à diverses défaillances susceptibles d'altérer leurs performances, voire de provoquer des arrêts de production coûteux et imprévus.

Parmi les composants critiques de ces machines, les roulements jouent un rôle essentiel en assurant le guidage en rotation de l'arbre et en supportant les charges mécaniques. Malgré la robustesse globale du moteur, les roulements représentent une source majeure de défaillances, souvent initiées par des contraintes d'opération, des problèmes de lubrification, de contamination ou des erreurs de montage. Une défaillance de roulement non détectée peut non seulement entraîner l'arrêt de la machine, mais aussi causer des dommages secondaires à d'autres composants tels que le stator ou le rotor, augmentant significativement les coûts de réparation et les temps d'indisponibilité.

Dans ce contexte, la maintenance et le diagnostic précoce des défauts revêtent une importance capitale. La mise en place de stratégies de maintenance efficaces, notamment la maintenance conditionnelle ou prédictive, permet d'anticiper les pannes en surveillant l'état de santé des composants. La détection précoce des défauts de roulements est donc un enjeu majeur pour optimiser la durée de vie des moteurs, réduire les coûts de maintenance et garantir la sécurité des installations.

Plusieurs techniques de diagnostic ont été développées et sont employées pour surveiller l'état des roulements dans les machines asynchrones. Celles-ci incluent des méthodes basées sur l'analyse des grandeurs mécaniques, comme la mesure de température ou, plus couramment, l'analyse vibratoire, ainsi que des approches basées sur les grandeurs électriques et magnétiques, telles que l'analyse du flux magnétique ou l'analyse du courant statorique (MCSA - Motor Current Signature Analysis). Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limites en termes de sensibilité, de complexité de mise en œuvre et de capacité à identifier des types de défauts spécifiques.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier spécifiquement la détection des défauts de roulements dans les machines asynchrones en se focalisant sur l'application et l'évaluation de l'analyse vibratoire. En nous appuyant sur des données expérimentales issues d'un banc d'essai reconnu ("Bearing Data Center") où des défauts contrôlés ont été introduits, nous chercherons à identifier les

Signatures spectrales caractéristiques associées à différents types et niveaux de dégradation des roulements, notamment au niveau de la bague intérieure, dans diverses conditions de charge.

Cette démarche vise à valider l'efficacité de l'analyse vibratoire comme outil de diagnostic pertinent pour la maintenance prédictive de ces composants critiques.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré comme suit :

Le Chapitre I introduit les généralités sur les moteurs asynchrones, les concepts fondamentaux du diagnostic et de la maintenance, ainsi qu'un panorama des différentes défaillances pouvant affecter ces machines.

Le Chapitre II se concentre spécifiquement sur les roulements : leur constitution, leur fonction, les causes et types de leurs défaillances, et présente les principales méthodes de détection existantes, qu'elles soient mécaniques, électriques ou magnétiques.

Le Chapitre III constitue la partie applicative de ce travail. Il détaille la méthodologie employée, basée sur l'analyse vibratoire des données expérimentales du "Bearing Data Center", et présente l'analyse des signatures spectrales obtenues pour des roulements sains et défectueux sous différentes charges.

Enfin, une Conclusion générale synthétisera les principaux résultats obtenus, soulignera l'apport de cette étude et proposera des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic et la maintenance des moteurs asynchrones, et leurs défaillances

I. 1. Introduction

Les moteurs asynchrones jouent un rôle essentiel dans les systèmes industriels en raison de leur robustesse, de leur simplicité de conception et de leur coût relativement faible. Toutefois, comme tout équipement électromécanique, ils sont sujets à diverses défaillances qui peuvent affecter leurs performances et entraîner des arrêts de production coûteux.

La maintenance et le diagnostic jouent un rôle clé dans la prévention et la réduction des pannes. Une bonne stratégie de maintenance permet non seulement d'améliorer la durée de vie du moteur, mais aussi d'optimiser son efficacité énergétique et d'éviter des réparations onéreuses.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des concepts fondamentaux de la maintenance appliquée aux moteurs asynchrones, les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour identifier les défauts, ainsi que les principales défaillances pouvant survenir au niveau électrique, mécanique et thermique.

I.2. Définitions

I.2.1 Surveillance : Activité consistant à observer un équipement ou un processus, en mesurant ou en recueillant des données pertinentes, afin de détecter toute évolution susceptible d'indiquer un dysfonctionnement ou une dégradation.[01]

I.2.2 Diagnostic : Ensemble des opérations visant à identifier les causes d'un dysfonctionnement ou d'une défaillance, à partir d'observations, de mesures ou d'analyses, afin d'en déterminer l'origine et d'évaluer son impact sur le fonctionnement du système.[01]

I.2.3 Défaut : Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence, lorsque cet écart est en dehors des spécifications. Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.

I.2.4 Panne : L'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

I.2.5 Défaillance : L'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises, avec les performances définies dans les spécifications techniques.[02]

I.2.6 Identification de défaut : Détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut, une fois sa localisation établie.[03]

I.2.7 Fiabilité : Caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise, dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné.[04]

I.2.8 Sécurité : La protection des moteurs consiste en un ensemble de mesures visant à empêcher leur fonctionnement dans des conditions anormales susceptibles de provoquer des incidents (surchauffe, vieillissement prématuré, destruction des enroulements électriques, etc.).[05]

I.2.9 Détection : Pour détecter les défaillances, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales. Cette classification est simplifiée en considérant comme anormale toute situation qui n'est pas normale.[06]

I.2.10 Supervision : Surveillance du fonctionnement normal d'un système et correction des défauts en identifiant leur cause, localisation et impact. Elle s'appuie sur l'acquisition de données et la détection des anomalies.[07]

I.2.11 Perturbation : Phénomènes générés par des variations rapides de tension et de courant dans les systèmes électriques, se propageant par conduction ou rayonnement.[08]

I.2.12 Symptôme : Manifestation fonctionnelle indiquant une défaillance dans un système. Les symptômes peuvent être multiples, limités ou absents.

I.2.13 Dysfonctionnement : Situation où l'exécution d'une fonction du système ne fournit pas le service attendu (absence totale ou délivrance partielle).[03]

I.2.14 Résidu : Indicateur de dysfonctionnement, reflétant la différence par rapport au comportement normal.

I.3. Terminologie relative à la maintenance et au diagnostic

I.3.1 Définition de la maintenance :

La maintenance est l'ensemble des actions techniques (réparations, échange standard, serrage, nettoyage, etc.), administratives et de management. Elle ne se limite pas à la réparation ou à la technique ; elle englobe également la gestion et l'organisation. Le manque de ces dernières peut compromettre les résultats. [9]

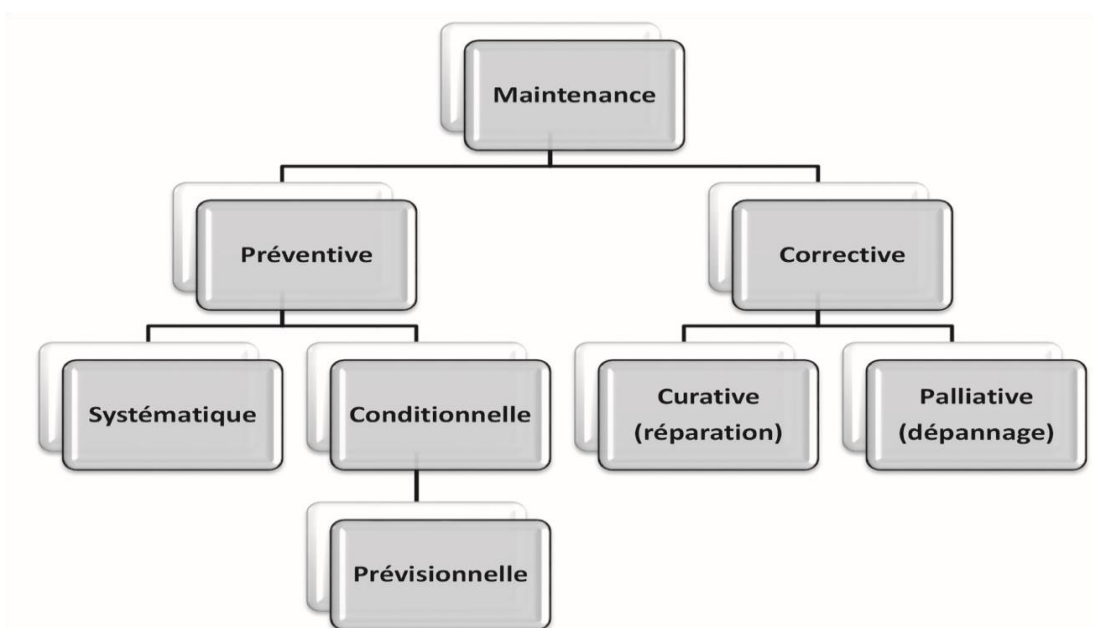


Figure I.1 : *Formes de la maintenance*

I.3.2 Maintenabilité :

La maintenabilité est l'aptitude d'un bien, dans des conditions données, à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir sa fonction requise. Elle suppose l'exécution de la maintenance dans des conditions, selon des procédures et avec des moyens prescrits. [04]

✓ **Maintenabilité = être rapidement dépanné**

On distingue les types de maintenabilité suivants :

✓ **Maintenabilité intrinsèque** : "Construite" dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges intégrant les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).

✓ **Maintenabilité prévisionnelle** : "Construite" en fonction de l'objectif de disponibilité.

✓ **Maintenabilité opérationnelle** : Mesurée à partir des historiques d'interventions.

I.3.3 Maintenance corrective :

Selon les normes ISO, désigne l'ensemble des actions mises en œuvre pour restaurer un bien ou un équipement en état de fonctionnement après la détection d'une panne ou d'une défaillance. Elle intervient de manière réactive, c'est-à-dire après l'apparition d'un dysfonctionnement, et peut être réalisée sous deux formes : immédiate (si l'intervention est effectuée sans délai pour limiter l'impact de la panne) ou différée (si elle est planifiée en fonction des ressources et de la criticité du défaut). Son objectif principal est d'assurer la disponibilité et la performance des équipements tout en minimisant les interruptions de service.[10]

I.3.4 Maintenance préventive :

La maintenance préventive est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits. Son but est de réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.[11]

I.3.5 Maintenance conditionnelle :

Alternative à la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle est de plus en plus employée dans l'industrie. Basée sur la surveillance continue de l'évolution du system vise à prévenir les dysfonctionnements avant qu'ils ne surviennent. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale d'un défaut imminent ou d'une approche d'un seuil de dégradation prédéterminé, imposant un traitement en ligne, au moins en partie. [12]

I.4. Constitution de la machine asynchrone

I.4.1 Introduction

La machine asynchrone, souvent appelée machine à induction, comporte deux parties essentielles :

- Une partie fixe : le **stator**, portant un bobinage triphasé logé dans des encoches et relié à la source d'alimentation.
- Une partie mobile : le **rotor**, qui peut être bobiné ou à cage d'écureuil.

Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer. Cette section se concentrera sur le cas des machines asynchrones à cage d'écureuil.

I.4.2 Le stator

Le stator d'une machine asynchrone est constitué de tôles d'acier formant le circuit magnétique. Les enroulements statoriques sont placés dans ces tôles. Pour les petites machines, les tôles sont d'un seul tenant, tandis que pour les machines plus puissantes, elles sont découpées en sections. Recouvertes de vernis pour réduire les courants de Foucault, elles sont assemblées par rivets ou soudures. Les enroulements statoriques, insérés dans des encoches, peuvent être disposés de manière imbriquée, ondulée ou concentrique.[12]

I.4.3 Le rotor à cage

Un rotor à cage est composé de barres conductrices en aluminium coulé ou en cuivre massif, régulièrement réparties et court-circuitées par des anneaux pour permettre la circulation des courants. Ces barres sont insérées dans un circuit magnétique constitué de tôles empilées sur l'arbre de la machine. Ce type de rotor, simple à construire et robuste, est majoritairement utilisé dans les moteurs asynchrones. Les encoches des tôles sont inclinées pour réduire les pertes et améliorer le fonctionnement. Contrairement aux rotors bobinés, il ne comporte pas de balais ni de bagues collectrices, ce qui simplifie sa conception et réduit son coût.[12]

I.4.4 Les paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.[12]



Figure I.2 : Flasque Pali

I.4.5 Principe de fonctionnement de moteurs asynchrones :

La machine asynchrone se compose d'un primaire, généralement le stator, portant un bobinage logé dans des encoches et relié à la source d'alimentation, et d'un secondaire, généralement le rotor.

L'enroulement rotorique peut se présenter sous deux formes :

Dans les rotors bobinés (à bagues), l'enroulement est exécuté comme un enroulement triphasé statorique connecté en étoile, avec accès direct aux grandeurs électriques rotoriques via des bagues tournantes et balais fixes, permettant des modifications par rhéostat extérieur ou convertisseur statique ;

Dans les rotors en court-circuit, l'enroulement est constitué de barres nues court-circuitées par des anneaux d'extrémité, avec des variantes comme cage d'écureuil simple, encoches profondes, ou double cage d'écureuil, influençant le profil de couple.

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé statorique et des courants induits dans celle du rotor. Ainsi, le fonctionnement est comparable à un transformateur dont l'enroulement secondaire est tournant. [13]

I.5. Les Défaits dans Les machines Asynchrones

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit :

- Défauts au stator : ouverture ou court-circuit sur au moins une phase.
- Connexion anormale des enroulements statoriques.
- Barre ou anneau de court-circuit cassé au rotor.
- Excentricité dynamique ou statique.
- Axe plié (proche de l'excentricité dynamique).
- Roulements défectueux.

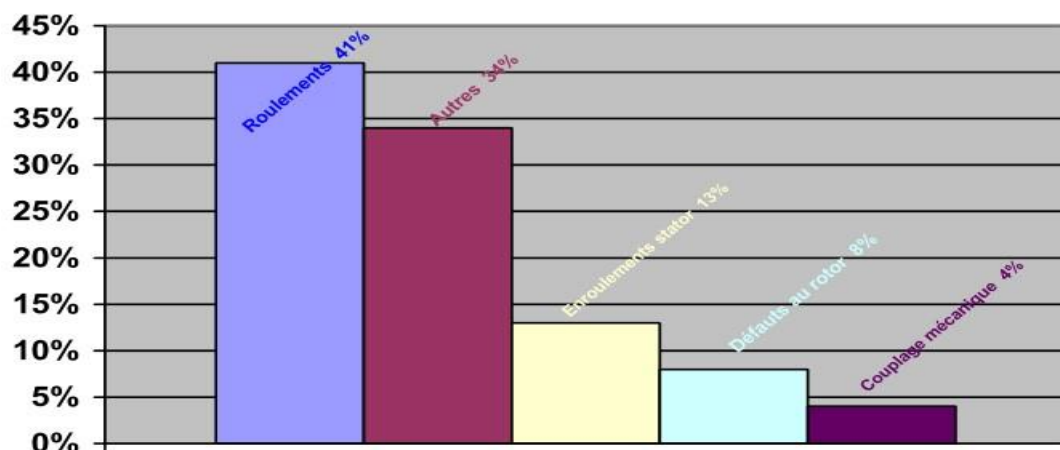


Figure I.3 : *Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances*

Cette répartition tend à montrer que les défauts se situent principalement dans la chaîne mécanique et dans le stator. En raison des conditions de fabrication des moteurs, les défauts dans le rotor sont moins fréquents. Les principales caractéristiques des défauts cités seront détaillées ci-après.[14]

I.5.1 Défauts internes

Les défauts internes sont causés par les constituants internes de la machine, tels que les circuits magnétiques rotorique et statorique, les bobinages statoriques, l'entrefer mécanique ou la cage rotorique.[15]

I.5.2 Défauts externes

Les défauts externes sont provoqués par des facteurs externes à la machine, tels que les tensions d'alimentation, la charge mécanique ou l'environnement d'utilisation (humidité, produits corrosifs ou abrasifs).[15]

Les systèmes d'entraînement électrique sont exposés à divers phénomènes de dégradation au fil du temps :

- ✓ Usure progressive des composants.
- ✓ Altération de l'isolation.
- ✓ Vieillessement des matériaux non métalliques.
- ✓ Effets de la flexion répétée.
- ✓ Accumulation de poussières, d'humidité et d'autres contaminants environnementaux.

Les pannes qui surviennent dans ces systèmes peuvent être regroupées en deux catégories principales:

- ✓ **Défaillances électriques** : courts-circuits dans les enroulements du stator, rupture des barres de rotor, fissures dans les bagues d'extrémité et défaillances des convertisseurs de puissance. Ces problèmes peuvent compromettre le fonctionnement du moteur et réduire son efficacité.

✓ **Défaillances mécaniques** : problèmes liés à l'excentricité du rotor, défauts des roulements, mauvais alignements des arbres et dysfonctionnements dans les organes de transmission de charge. Ils peuvent provoquer des vibrations excessives, une usure prématurée et une baisse des performances globales du moteur.

I.5.3 Défauts d'ordre mécanique

L'expérience accumulée sur les machines tournantes a conduit à l'identification de divers dysfonctionnements :

- Déséquilibre massique des rotors
- Défaillances des paliers
- Dégradation des rotors ou des stators
- Défauts d'accouplement
- Problèmes de fixation

A. Défauts de flasque

Les défauts liés aux flasques d'une machine asynchrone sont généralement dus à des erreurs lors de la fabrication. Un mauvais alignement des flasques peut entraîner un désalignement des roulements à billes, provoquant une excentricité de l'arbre de la machine. Ces anomalies peuvent être détectées grâce à une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.[16]

B. Défauts de l'arbre

Les défauts de l'arbre peuvent se manifester par l'apparition de fissures, souvent causées par l'utilisation d'un matériau inadéquat lors de sa fabrication. À court ou à long terme, ces fissures peuvent entraîner une rupture complète de l'arbre, provoquant l'arrêt définitif de la machine asynchrone. De plus, l'exposition à des environnements corrosifs peut également réduire la solidité de l'arbre.[16]

I.5.4 Défauts au stator

I.5.4.1 Court-circuit entre spires de la même phase

Un court-circuit entre spires de la même phase entraîne :

- Augmentation des courants statoriques dans la phase affectée.
- Légère variation de l'amplitude sur les autres phases.
- Modification du facteur de puissance.
- Amplification des courants dans le circuit rotorique.

Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage, et donc une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer un deuxième court-circuit. De plus, les spires en court-circuit engendrent un couple résistant (dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant). Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique, hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.[17]

I.5.4.2 Court-circuit entre phases

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple. Ce type de défaut perturbe également de manière sensible les commandes développées sur la base du modèle de Park (Hypothèse d'un modèle équilibré).[17]

I.5.5 Défauts au rotor

I.5.5.1 Défaillances du circuit magnétique

Comme dans le stator, elles sont généralement dues à une excentricité statique et/ou dynamique, créant des points chauds. Ces derniers peuvent engendrer des ruptures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit.[18]

I.5.5.2 Défaillances des conducteurs

La cage rotorique étant formée de conducteurs (barres) et de deux anneaux de court-circuit, les ruptures ou les fissures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit sont fréquentes dans les machines de grande puissance. La cassure d'une barre peut se situer soit au niveau de son encoche, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique.

Ce défaut est dû à :

- Un nombre important de démarrages successifs, induisant des courants importants dans les barres rotoriques.
- Une excentricité statique et/ou dynamique, soumettant le rotor à des forces tendant à faire sortir les barres des encoches.
- La dilatation puis la contraction répétée dans les barres rotoriques.

Une rupture de barres conduit à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse, accompagnées par des vibrations et des bruits excessifs, ainsi qu'une augmentation de la température dans les barres adjacentes de la barre rompue.[18]

I.5.6 Défauts d'excentricité

Les défauts d'excentricité se caractérisent par une non-uniformité de l'entrefer (distance entre le stator et le rotor). Ils peuvent résulter de la flexion de l'arbre, d'un mauvais alignement du rotor, de l'usure des roulements ou de défauts de construction. Ces défauts entraînent des forces magnétiques déséquilibrées (traction magnétique déséquilibrée), pouvant causer des frottements nuisibles entre le stator et le rotor, ainsi que des impacts négatifs sur le circuit magnétique et les enroulements.

I.5.6.1 Excentricité statique :

Associée à une déformation permanente (ovalisation du stator, mauvais positionnement du rotor). Sa valeur reste constante dans le temps et dépend uniquement de la géométrie spatiale.

I.5.6.2 Excentricité dynamique :

Liée au déplacement du rotor pendant la rotation, entraînant un entrefer minimal variable. Elle évolue dans le temps et l'espace, provoquée par des facteurs tels que la flexion de l'arbre ou l'usure des roulements.[19]

I.6 Conclusion

La maintenance et le diagnostic des moteurs asynchrones sont des aspects essentiels pour garantir leur bon fonctionnement, leur longévité et leur efficacité énergétique. À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence les différentes stratégies de maintenance, qu'elles soient préventives, prédictives ou curatives, ainsi que les méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts avant qu'ils ne provoquent des pannes majeures.

Les défaillances des moteurs asynchrones peuvent être d'origine électrique, mécanique ou thermique, et leur identification précoce permet de réduire les temps d'arrêt et les coûts de réparation. Une approche rigoureuse et adaptée aux besoins industriels est donc nécessaire pour assurer la fiabilité et la performance de ces machines. Ainsi, une gestion efficace de la maintenance, combinée à des outils de diagnostic avancés, constitue un levier stratégique pour optimiser l'exploitation des moteurs asynchrones et garantir une production industrielle continue et sécurisée.

Chapitre II : Défauts des Roulements dans les Machines Asynchrones et Méthodes de Détection

II. 1. Introduction

Les roulements sont des composants critiques des machines asynchrones, assurant le guidage en rotation de l'arbre, supportant des charges importantes et minimisant le frottement. Leur défaillance peut entraîner des arrêts de production coûteux et des dommages matériels.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des roulements, de leur constitution et des différents types existants, avant d'aborder les principales causes de défaillance.

Enfin, il introduit les méthodes de détection de défauts couramment utilisées, qui seront explorées plus en détail dans les chapitres suivants.

II. 2. Définition et Fonction d'un Roulement

Un roulement est un organe mécanique conçu pour faciliter le mouvement rotatif entre deux parties d'une machine, généralement un arbre et un logement. Sa fonction principale est de :

- ✓ **Guider la rotation** : Assurer un mouvement rotatif précis et contrôlé.
- ✓ **Supporter les charges** : Transmettre et supporter les forces radiales et/ou axiales entre les parties mobiles et fixes.
- ✓ **Réduire le frottement** : Minimiser les pertes d'énergie et l'usure dues au frottement, améliorant ainsi l'efficacité et la durée de vie de la machine.

Dans le contexte des machines asynchrones, les roulements sont essentiels pour maintenir l'alignement de l'arbre rotorique et garantir un fonctionnement fluide.[20]

II.3. Constitution d'un Roulement

Un roulement à billes standard se compose des éléments suivants :

II.3.1 Bague intérieure (Piste intérieure)

: Fixée à l'arbre en rotation. Elle présente une gorge (chemin de roulement) usinée avec précision pour accueillir les billes.

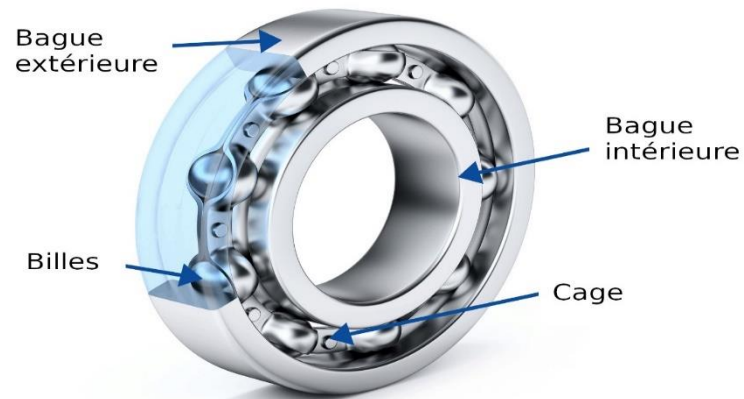


Figure 2 : Constitution d'un Roulement à billes

II.3.2 Bague extérieure (Piste extérieure) : Montée dans le logement fixe. Elle possède également une gorge pour le roulement des billes.

II.3.3 Billes (Éléments roulants) : Généralement en acier traité, elles assurent le contact et la transmission des efforts entre les bagues intérieure et extérieure.

II.3.4 Cage (Séparateur) : Maintient un espacement régulier entre les billes, empêchant leur contact direct et assurant une répartition uniforme des charges. La cage peut être fabriquée en métal, en polymère ou en composite.[21]

II.4. Classification et Types de Roulements

Quel que soit la taille, la qualité et la matière utilisée pour la fabrication du roulement, les roulements sont classés de plusieurs manières.

En premier lieu, ils sont classés d'après la forme des éléments roulant utilisés (roulements à billes ou à rouleaux), et ce d'après l'importance de la charge appliquée au roulement (si la charge est importante, il faut choisir le roulement à rouleaux, ce type de roulement est très proche de celui à billes, la cage contenant des rouleaux au lieu de billes. Selon la forme des rouleaux il peut être possible de séparer les bagues. Le problème d'assemblage du roulement n'est alors plus le même.

Le roulement à rouleaux supporte un effort radial supérieur par rapport au roulement à billes, car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire.

On utilise le roulement à rouleaux pour augmenter la surface de contact afin de minimiser les contraintes ou les pressions sur les pistes. En deuxième lieu, ils sont classés d'après la direction d'application de ces charges, à cet effet, il existe les roulements radiaux s'il s'agit d'une charge radiale et des roulements axiaux (butées) dans le cas d'une charge axiale importante. Le choix du type et de la taille d'un roulement est basé sur les conditions de fonctionnement et les caractéristiques de construction à fin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits.

Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants :

- Savoir la nature, la direction ainsi que l'intensité de la charge que doit supporter le roulement.
- La vitesse de rotation du roulement.
- La durée de vie souhaitée (demandée).
- La température à laquelle le roulement va travailler.
- La précision de fonctionnement afin de permettre fixer le jeu interne de chaque roulement.
- Il faut tenir en compte le mode de la lubrification, ainsi que le type du lubrifiant.
- La nature de la machine pour faire le choix du type de montage du roulement.
- La matière de l'arbre et du logement qui permette de calculer le jeu résiduel (fonctionnel) du roulement.
- L'encombrement (l'espace) réservé au roulement. [22]

II.4.1 Roulement rigide à une seule rangée de billes (contact radial) :

C'est un roulement symétrique, il est souvent utilisé avec gorge profonde, ce qui lui permet de supporter des charges purement radiales importantes, ou celles combinées dans les deux sens. Comme, il est adapté pour des vitesses de rotation très élevée.

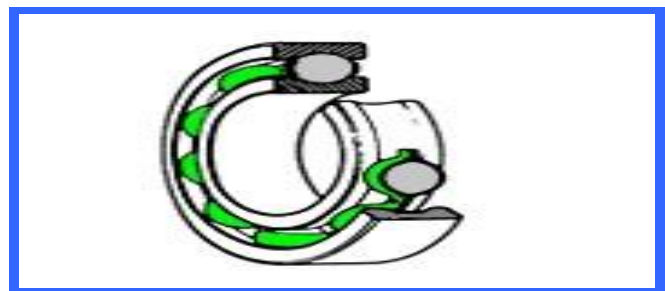


Figure II. 5 : Roulement à bille à contact radial.

Ce type de roulement se fabrique en plusieurs versions, on trouve le roulement sans protection, protégé d'un seul côté ou des deux côtés par un flasque de protection fixé sur la bague extérieure et présente un jeu très réduit avec la bague intérieure **Figure II.5**, Permet de conserver la quantité du lubrifiant et empêche la pénétration des corps étrangers à l'intérieur du roulement. [22]

II.4.2 Roulement à contact oblique à une seule rangée de billes :

Dans ce type de roulement, les pistes (chemins) sont usinées avec un épaulement haut sur la bague intérieure, et un autre bas sur la bague extérieure. Les deux épaulements sont disposés l'un en face de l'autre, à cet effet, ce type de roulement est adapté pour des charges axiales appliquées sur un seul sens **Figure II.6**.

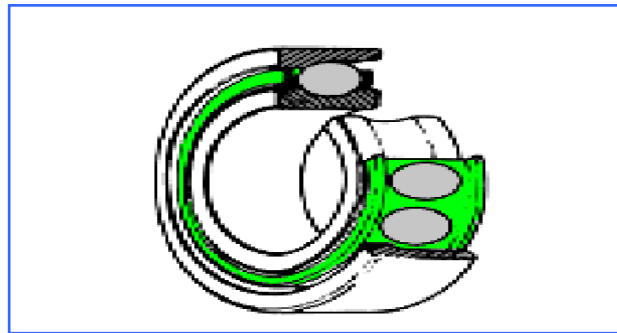


Figure II.6 : Roulement à contact oblique

La zone de charge (pré charge) de ce type de roulement est variable, elle est réglée en fonction du jeu axial. Le jeu de fabrication est considérable de sorte que, sous charge axiale il se produit un certain angle de contact qui peut atteindre 40° .

Si la charge axiale appliquée est importante, il est préférable de prendre un angle de contact important, et au contraire si la vitesse de rotation est très élevée. [22]

II.4.3 Roulement à contact oblique sur deux rangées de billes :

C'est le type de roulement où les bagues intérieure et extérieure possèdent deux chemins pistes chacune. Les deux rangées de billes sont disposées de façon que les angles de contact soient deux roulements à une seule rangée. Ils peuvent supporter des charges axiales importantes dans les deux sens. [22]

II.4.4 Roulement à rotule sur deux rangées de billes :

La bague intérieure de ce type de roulement est caractérisée par deux gorges (pistes) profondes **Figure II.7**, le moment ou celle extérieure dispose d'une seule piste de forme sphérique, cette construction permet aux axes des bagues intérieure et extérieure de se basculer d'un angle assez important l'un par rapport à l'autre.

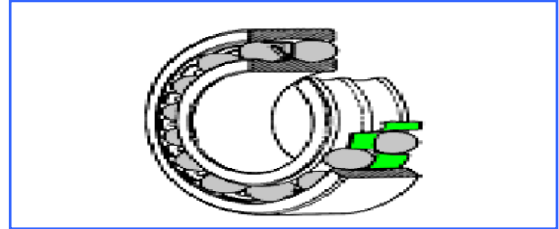


Figure II.7 : Roulement à rotule sur deux rangées de billes.

Ce type de roulement est adapté pour des applications où la précision d'alignement des alésages des logements n'est pas assurée. Il est caractérisé par un angle de contact réduit ce qui limite son utilisation juste pour les charges axiales réduites.[22]

II.4.5 Roulements à une seule rangée de rouleaux cylindriques :

Pour réduire les contraintes (forces de contact) dans le cas d'une charge radiale importante, il faut que la surface de contact soit importante, dans ce cas, il est nécessaire de passer d'un contact ponctuel à un autre linéaire, c'est-à-dire il faut installer des roulements à rouleaux cylindriques au lieu des roulements à billes.

Le guidage des rouleaux dans ce type de roulements est assuré par des épaulements usinés et rectifiés sur les bagues intérieures, extérieures ou les deux bagues de roulements à la fois (selon le type de montage). Selon la forme des bagues, le roulement à rouleaux cylindrique est classé en ce qui suit :

- . Roulement avec bague extérieure démontable dans les deux sens.
- Roulement avec bague intérieure démontable dans les deux sens.
- Roulement avec bague intérieure démontable dans un seul sens.
- Roulement avec bague extérieure démontable dans un seul sens.

La fabrication de ces différents types donne la possibilité de les utiliser dans le cas des charges radiale importantes à des vitesses de rotation élevées, et pour des machines qui possèdent des déplacements axiaux. L'épaulement de guidage usiné sur les bagues ne permet pas l'utilisation de ce type de roulement dans le cas des charges axiales importantes. [22]

II.4.6 Roulements à rouleaux coniques :

Ils ont la possibilité de supporter des efforts axiaux et radiaux importants. Du fait de la disposition des contacts de roulement, les bagues peuvent se désolidariser par translation axiale **Figure II. 8**. Ils ne posent donc pas les mêmes problèmes d'assemblage que les roulements à billes.

Ils constituent une liaison rotule équivalente (unilatérale) entre les bagues.

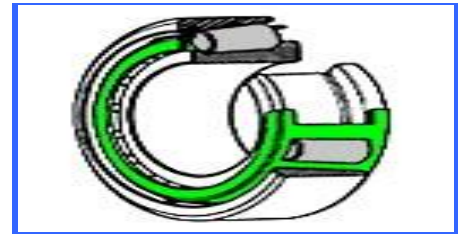


Figure II.8 : Roulement à rouleaux conique.

D'une grande rigidité, ce type de composant est idéal pour les guidages de grandes précisions devant subir de gros efforts (pivot de roue de véhicules, broche de machines).

Pour le guidage d'un arbre, ils sont généralement associés par paire en opposition. Suivant la disposition des composants, on obtient un montage dit en O ou en X. Ce montage en opposition ne permettant pas la constitution d'une liaison isostatique, il y a nécessité de réglage au montage. Leur mise en œuvre est donc plus coûteuse. [22]

II.5. Causes et types de défaillances des roulements

Les roulements, composants essentiels des machines tournantes, sont sujets à diverses défaillances qui peuvent entraîner des arrêts de production coûteux. Ces défaillances peuvent être classées en fonction de leur origine et de leur manifestation.

II.5.1 Causes principales des défaillances

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la détérioration prématurée des roulements. Les plus courants sont :

➤ **Lubrification inadéquate (environ 36% des cas) :** Un choix inapproprié de lubrifiant (viscosité, type, etc.) ou une quantité insuffisante compromet la formation du film lubrifiant, entraînant un contact métal-métal accru, une usure rapide et une réduction significative de la durée de vie du roulement [Référence : Ajoutez une référence spécifique ici]. Une lubrification défaillante peut engendrer des arrêts de maintenance longs et coûteux, en particulier lorsque l'accès aux roulements est difficile.[23]

➤ **Contamination (environ 14% des cas) :** La présence de particules étrangères (poussière, abrasifs, eau, etc.) dans le lubrifiant ou sur les chemins de roulement perturbe le bon fonctionnement du roulement, accélérant l'usure et pouvant provoquer des dommages irréversibles [Référence : Ajoutez une référence spécifique ici]. Une étanchéité efficace est donc cruciale pour prévenir la contamination.[23]

➤ **Montage incorrect (environ 16% des cas) :** Un montage inadéquat, impliquant l'utilisation d'outils inappropriés, un ajustement incorrect ou un mauvais alignement, peut induire des contraintes excessives et des déformations prématurées. Le respect des procédures de montage recommandées par le fabricant est essentiel.[25]

➤ **Fatigue (environ 34% des cas) :** Le fonctionnement prolongé sous des charges cycliques, même modérées, peut entraîner la fatigue du matériau du roulement, conduisant à la formation de fissures et à l'écaillage. Les conditions de surcharge, les entretiens insuffisants ou inadaptés accélèrent ce processus.[23]

➤ **Autres causes :** D'autres facteurs, tels que la corrosion et les défauts de fabrication, peuvent également contribuer à la défaillance des roulements.

II.5.2 Types de défaillances des roulements

Les défaillances des roulements se manifestent sous différentes formes, chacune ayant des caractéristiques spécifiques :

II.5.2.1 Grippage : Se caractérise par un soudage local des surfaces en contact, résultant d'un manque de lubrification, de vitesses élevées et de pressions importantes [Référence : Ajoutez une référence spécifique ici]. Il provoque des micro-arrachements de particules métalliques et peut conduire à une détérioration rapide du roulement.



Figure II. 9 : Grippage d'une bague.

II.5.2.2 La corrosion :

A. La corrosion chimique se produit par la présence de l'humidité aux points de contact des éléments roulants avec les chemins. Surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.

B. La corrosion de contact apporte une pâte brune formée par la rouille et le lubrifiant. Une corrosion profonde entraîne la rupture des bagues. Due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues et les arbres. [23]



Figure II.10 : Corrosion sur une piste de roulement

II.5.2.3 Usure :

A. Usure par déformation : C'est une déformation plastique des chemins des roulements, causée par des chocs importants ou une vibration à haute fréquence. C'est une usure sans perte de matière (présence des empreintes)

B. Usure par abrasion : L'usure par abrasion donne aux roulements une couche brillante, due au glissement des éléments roulants sur les pistes, et ce par le manque ou une mauvaise lubrification. [23]

II.5.2.4 La fissuration des bagues :

C'est l'apparition de fissures et de petites cassures sur les éléments du roulement. Les coups lors du montage, le non-respect des portées de roulement (ajustement trop serré). [23]

II.5.2.5 L'écaillage :

Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en sous-couche.

Le fonctionnement Erato hydrodynamique (type de lubrification dépendant l'élasticité du matériau) crée, par dépassement de la limite d'élasticité, des microdéformations permanentes et

Des fissures qui se propagent vers la surface et conduisent à l'écaillage. L'écaillage est un processus continu qui s'accélère plus ou moins après apparition des premières fissures. On peut distinguer deux types d'écaillage :

- **Ecaillage de fatigue** : C'est un écaillage unilatéral, il est caractérisé par des petites fissures et arrachement de fragments de matière. Il se produit lors de l'application d'une surcharge, ou lors d'un défaut désalignement.
- **Ecaillage superficiel** : Causé par une concentration de contraintes, due à une contrainte accentuée (résultent probablement d'un défaut d'alignement). Ou bien par la modification de la zone de pré charge. Aussi par la présence de particules étrangère à l'intérieur du roulement.[23]

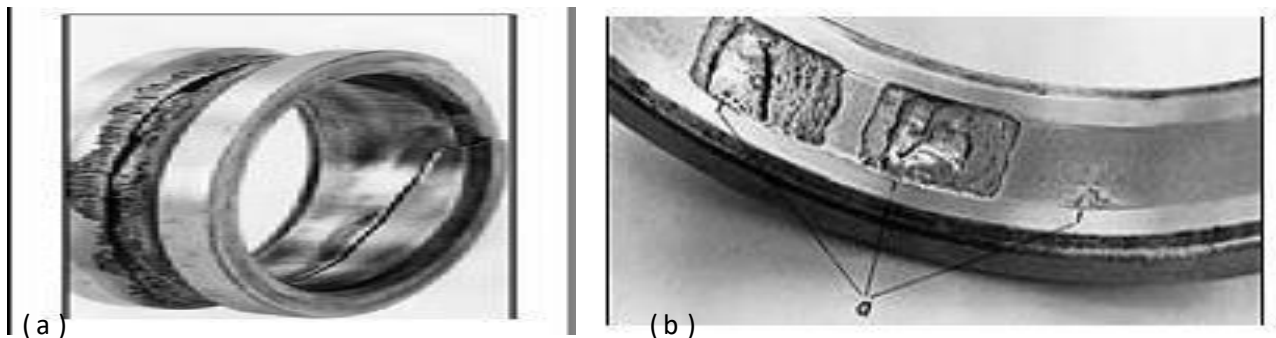


Figure II. 11 : Ecaillage par (a) fatigue et (b) superficiel de la bague interne.

II. 6. Méthodes de Détection des Défauts de Roulements

Cette section présente un aperçu des techniques couramment utilisées pour la détection des défauts de roulements dans les machines asynchrones, en distinguant les approches mécaniques, magnétiques et électriques.

II.6.1 Techniques Mécaniques

Les méthodes mécaniques s'appuient sur la mesure et l'analyse des phénomènes physiques liés à l'état mécanique de la machine.

II.6.1.1 Diagnostic Vibratoire (Mesure des Vibrations)

L'analyse vibratoire est l'une des techniques les plus répandues pour la détection des défauts dans les machines tournantes. Elle repose sur le principe que l'état interne d'une machine se reflète dans le niveau et le comportement de son signal vibratoire. En comparant le signal vibratoire mesuré avec une valeur de référence, il est possible de détecter des anomalies indiquant la présence de défauts, notamment au niveau des roulements. [25]

II.6.1.2 Diagnostic Thermographique (Mesure de la Température)

La thermographie infrarouge est une technique non destructive qui permet de détecter les points chauds et les anomalies thermiques dans une installation électrique, y compris les moteurs asynchrones.

Des dispositifs infrarouges réalisent un balayage systématique de l'équipement en fonctionnement, permettant de visualiser la distribution des températures.

Les zones de surchauffe, potentiellement dues à un frottement excessif au niveau des roulements ou à des contacts électriques défectueux, sont identifiées par comparaison avec les températures de fonctionnement normales.

L'analyse du spectrogramme obtenu à partir des images thermiques permet de délimiter les zones de dégradation. Une surchauffe localisée peut indiquer un frottement anormal au niveau des paliers ou des billes de roulement, ou encore des décharges électriques dues à une mauvaise connexion (corrosion, oxydation, tresse défectueuse, etc.).

La mesure précise de la température maximale observée, après ajustement des paramètres tels que l'émissivité et la température ambiante, permet d'évaluer la sévérité de la surchauffe et d'estimer son évolution dans le temps. Cette information est cruciale pour la planification des opérations de maintenance. [24]

II.6.2 Techniques Magnétiques et Électriques

Ces techniques exploitent les variations des grandeurs magnétiques et électriques induites par la présence de défauts.

II.6.2.1 Diagnostic par Mesure du Couple Électromagnétique

L'analyse du couple électromagnétique peut être utilisée pour détecter les défauts de charge et les défauts électriques et magnétiques. Les variations du couple de charge entraînent des fluctuations du flux et du courant dans la machine. De même, la torsion des roulements peut induire l'apparition d'harmoniques spécifiques dans le spectre du couple électromagnétique. [26]

II.6.2.2 Diagnostic par Analyse du Courant Statorique

L'analyse du courant statorique (Motor Current Signature Analysis - MCSA) est une technique non invasive et facile à mettre en œuvre pour détecter les défauts dans les machines asynchrones. Elle consiste à analyser le spectre du courant statorique à la recherche de composantes spectrales spécifiques, dont la fréquence est directement liée à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoches rotoriques, nombre de paires de pôles).

Les défauts se manifestent dans le spectre du courant statorique par l'apparition de raies spectrales à des fréquences caractéristiques et/ou par la modification de l'amplitude des raies spectrales déjà présentes. La surveillance du courant statorique nécessite une connaissance approfondie des défauts et de leurs signatures spectrales. Cette technique est couramment utilisée pour les machines alimentées par le réseau et pour la recherche des fréquences caractéristiques des défauts. [27]

II.7 Conclusion

Les roulements constituent un maillon réduction du frottement et le support des charges les expose à des contraintes mécaniques, thermiques et environnementales susceptibles d'engendrer divers types de défaillances. Ce chapitre a permis d'identifier les causes principales de ces défaillances, telles que la mauvaise lubrification, la contamination, les erreurs de montage ou encore la fatigue du matériau.

Nous avons également présenté une classification détaillée des défauts les plus courants — grippage, corrosion, usure, fissuration et écaillage — en mettant l'accent sur leurs mécanismes d'apparition et leurs effets sur le fonctionnement global de la machine. Ces défauts, souvent invisibles à l'œil nu, peuvent être détectés grâce à des techniques avancées de surveillance.

Les méthodes de détection ont été abordées selon deux approches complémentaires : mécaniques (analyse vibratoire, thermographie) et électromagnétiques (analyse du flux de fuite, analyse du courant statorique). Ces techniques offrent un moyen efficace de diagnostiquer les anomalies à un stade précoce, permettant d'éviter des arrêts de production coûteux.

Cette compréhension approfondie des défauts de roulements et des outils de surveillance disponibles constitue la base nécessaire pour passer à l'analyse expérimentale, qui fera l'objet du chapitre suivant.

Ce dernier illustrera, à travers des cas pratiques, la mise en œuvre concrète de l'analyse vibratoire pour la détection des défauts, validant ainsi les concepts théoriques abordés ici.

Chapitre III : Application de l'Analyse vibratoire pour la détection des défauts de roulements

III. 1. Introduction

Après avoir exploré la théorie des défaillances des machines asynchrones et l'ensemble des méthodes de diagnostic, ce chapitre marque le passage crucial à la confrontation avec le réel. Pour valider l'efficacité de l'analyse vibratoire, nous nous appuyerons sur les données expérimentales du "Bearing Data Center". Ce banc d'essai présente l'avantage d'intégrer des roulements sur lesquels des défauts artificiels ont été introduits de manière contrôlée sur différents éléments. Notre objectif sera donc d'analyser les signaux vibratoires acquis sous diverses conditions de fonctionnement afin d'en extraire les signatures spectrales caractéristiques de chaque type de défaut. Cette démarche permettra de mettre en lumière la sensibilité et la précision de l'analyse vibratoire pour le diagnostic, soulignant sa pertinence pour une stratégie de maintenance prédictive efficace.

III.2. Banc d'essai des roulements "Bearing Data Center" :

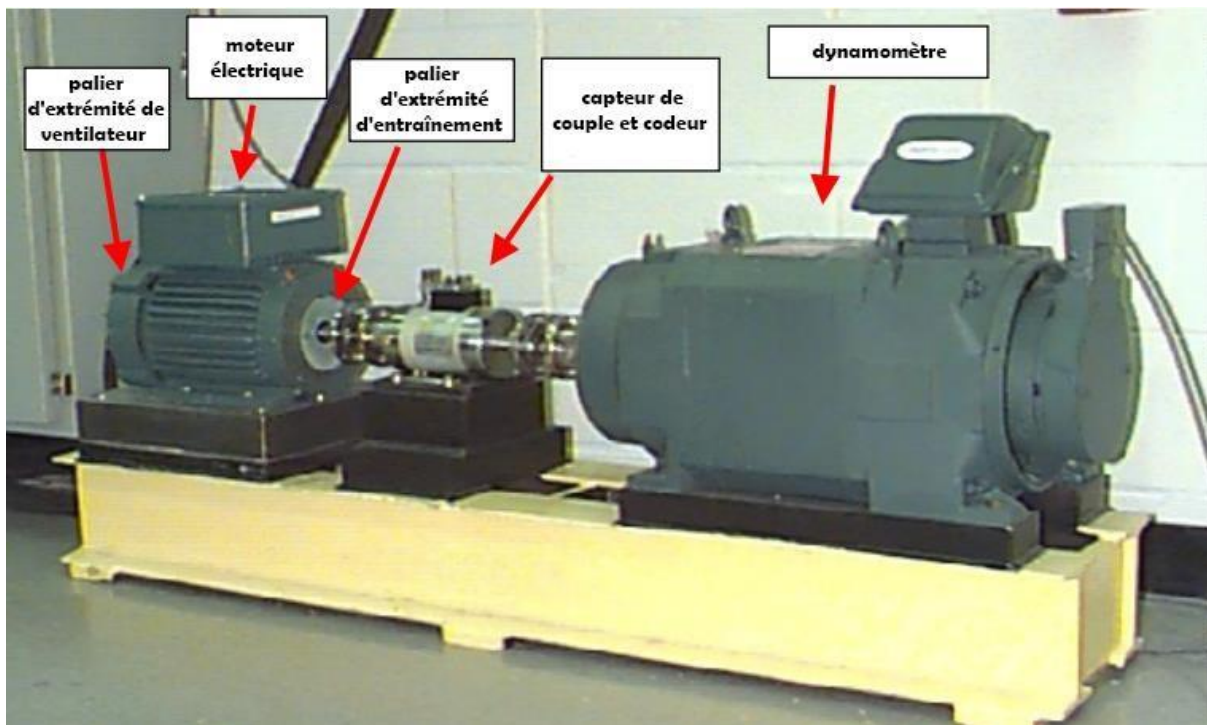


Figure III.12 : Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center ».

Les roulements utilisés dans ce travail sont des roulements à billes de type de SKF 6205. Des défauts de bague interne, bague externe et défauts de billes sont introduits dans les roulements par électroérosion (Electrical Discharge Machining : EDM). La technique EDM est un procédé de traitement de métaux durs ou des composants mécaniques qui ne pouvaient pas être pénétrée avec des procédés classiques. Le défaut correspond alors à un trou circulaire, sa taille est ainsi définie par son diamètre. Les diamètres des défauts sont de 0.1778 mm (0.007 inches), 0.3556 mm (0.014 in), 0.5334 mm (0.021 in) et 0.7112 mm (0.028 in) correspondant à des défauts naissant, modéré, sévère et très sévère respectivement. Chaque roulement a été testé avec quatre différentes charges (0, 1 PH, 2 PH et 3 PH). Pour les quatre conditions de charge, les signaux ont été mesurés avec des vitesses de rotation de l'ordre de 1797 *tr/mn*, 1772 *tr/ mn*, 1750 *tr/mn*, et 1730 *tr/mn* respectivement. L'ensemble des données est acquis à l'aide d'accéléromètres fixés sur la cage du moteur par des aimants sous quatre conditions de fonctionnement différentes : condition normale, défaut de la bille (BF), défaut dans la bague interne (IRF), et défaut dans la bague externe (ORF).

III.3. Fréquences de rotation caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistants :

Le couple Résistant	La vitesse de rotation (rpm)	Fréquences de Rotation (<i>f_r</i>). (HZ)
0	1797	29.95
1	1772	29.53
2	1750	29.16
3	1730	28.83

Tableau III.1 : Fréquences de rotation de roulement avec les différents couples et les vitesses.

III.4. Les fréquences spécifiques des défauts :

Chaque type de défaut de roulement est caractérisé par une fréquence particulière dont la formule générale est donnée par :

$$f_{def} = K_{def} \cdot f_r \quad (III.1)$$

Avec f_r est la fréquence de rotation en Hz et K_{def} est un coefficient qui dépend de la géométrie du roulement. Ce coefficient peut être calculé selon le type du défaut comme suit :

➤ **Défaut de la bague extérieure :**

$$K_{b.ext} = (Nb/2) (1 - (Db/Dm) \cos(\alpha))$$

➤ **Défaut de la bague intérieure :**

$$K_{b.int} = (Nb/2) (1 + (Db/Dm) \cos(\alpha))$$

➤ **Défaut de la cage :**

$$K_c = (1/2) (1 - (Db/Dm) \cos(\alpha))$$

➤ **Défaut de la bille :**

$$K_{bille} = (Dm/2Db) [(1 - ((Db/Dm) \cos(\alpha))^2)]$$

Les paramètres géométriques du roulement utilisé dans les essais expérimentaux sont :

- **Nb = 9** : le nombre de billes ;
- **Db = 0.3126** : le diamètre de la bille ;
- **Dm = (Dext + Dint) / 2 = 1.5157**: le diamètre au centre des billes (diamètre moyen) ;
- **α** : l'angle de contact (le roulement est à gorge profonde, il présente une charge purement radiale $\alpha=00$).

L'élément Défaillant	La bague externe	La bague interne	La bille
Diamètre en (inche)	2.0472	0.9843	0.3126

Tableau III.02 : La géométrie du roulement (en inche).

Selon ces données géométriques du roulement, on a calculé les valeurs des coefficients correspondant à chaque élément en défaut.

L'élément Défaillant	La bague externe	La bague interne	La cage	La bille
Le coefficient K_{def}	3.5718	5.4281	0.3968	4.7133

Tableau III.3 : les valeurs du coefficient K_{def} pour chaque type de défaut de roulement.

En multipliant K_{def} par la fréquence de rotation, on obtient les fréquences caractéristiques de chaque élément en défaut.

L'élément Défaillant	La bague externe	La bague interne	La cage	La bille
Le coefficient K_{def}	3.5718	5.4281	0.3968	4.7133
A vide ($fr = 29.95$ Hz)	106.97 Hz	162.57 Hz	11.88 Hz	141.16 Hz
Charge 1 ($fr = 29.53$ Hz)	105.47 Hz	160.29 Hz	11.71 Hz	139.18 Hz
Charge 2 ($fr = 29.16$ Hz)	104.15 Hz	158.28 Hz	11.57 Hz	137.43 Hz
Charge 3 ($fr = 28.8$ Hz)	102.97 Hz	156.49 Hz	11.43 Hz	135.88 Hz

Tableau III.4 : Fréquences caractéristiques pour chaque type de défaut de roulement.

III.5. Comparaison entre les spectres vibratoires sain et avec défaut de roulement :

Dans cette partie, nous allons effectuer une étude comparative entre les spectres vibratoires d'un moteur fonctionnant à l'état sain et ceux d'un moteur présentant un défaut de roulement. Pour cette étude, nous avons sélectionné les données vibratoires correspondant à la charge 3 avec un défaut d'une sévérité de 0,014 pouce. Pour chaque défaut de roulement, nous allons extraire les fréquences et les amplitudes de leurs harmoniques caractéristiques. Ensuite, nous les comparons avec leurs amplitudes à l'état sain et notons le taux ainsi que le sens de leur variation.

III.5.1 Défaut de la bague extérieure

Rappelons ici que ce défaut est caractérisé par une série d'harmoniques de fréquences :

► $f_{bext} = n \cdot K_{b,ext} \cdot f_r = 102.97 \text{ Hz}$

	État sain			Défaut de la bague extérieure		
Fréquence (Hz)	f_{bext}	$2 f_{bext}$	$3 f_{bext}$	f_{bext}	$2 f_{bext}$	$3 f_{bext}$
	103.3	206.8	400.4	103.4	206.6	399.1
Amplitude (Inche/s ²)	0.000189	0.00068	0.0016	0.00038 (+100 %)	0.0010 (+49%)	0.00095 (-68.4%)

Tableau III.5 : Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bague extérieure

III.5.2 Défaut de la bague intérieure

► $f_{int} = n \cdot K_{int} \cdot f_{ir} = 156.49 \text{ Hz}$

	État sain			Défaut de bague intérieure		
Fréquence (Hz)	f_{bint}	$2 f_{bint}$	$3 f_{bint}$	f_{bint}	$2 f_{bint}$	$3 f_{bint}$
	155.3	310.2	465	155.4	310.5	465.1
Amplitude (Inche/s ²)	0.0089	0.00080	0.00025	0.010 (+11 %)	0.0011 (+27.27%)	0.00068 (+63.23%)

Tableau III.6 : Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bague intérieure

5.3 Défaut de Bille

► $f_{bille} = n \times K_{bille} \times f_r = 135.88 \text{ Hz}$

► $K_{bille} = (Dm / 2Db) [(1 - ((Db / Dm) \cos(\alpha))^2)]$

	État sain			Défaut de Bille		
Fréquence (Hz)	f_{bille}	$2 f_{bille}$	$3 f_{bille}$	f_{bille}	$2 f_{bille}$	$3 f_{bille}$
	135	270.2	404.4	134.8	270	404
Amplitude (Inche/s ²)	0.00035	0.00026	0.00085	0.00048 (+27%)	0.00091 (+71.4 %)	0.0031 (72.5%)

Tableau III.7 : Comparaison des amplitudes spectrales entre l'état sain et le défaut de la bille

III.6. Interprétation :

Les valeurs théoriques obtenues dans les tableaux ne montrent pas d'augmentations significatives des amplitudes des harmoniques caractéristiques entre l'état sain et l'état défectueux, ce qui pourrait être interprété comme une absence de défaut dans les roulements. Cependant, l'analyse qualitative des spectres vibratoires révèle plus clairement la présence de variations anormales dans une certaine bande fréquentielle, indiquant un défaut potentiel. Il est donc impératif de ne pas se limiter à l'observation des pics individuels. Ceci souligne l'importance de s'appuyer sur l'analyse du niveau global des harmoniques, dans certaines bandes fréquentielles, pour une détection précoce des défauts de roulement qui pourraient ne pas être apparents par la seule analyse des amplitudes des harmoniques caractéristiques.

III.7. Analyse du niveau global du spectre vibratoire

L'analyse vibratoire d'une machine asynchrone, en régime permanent et sous une charge riche en harmoniques, révèle un spectre spécifique en l'absence et en présence de défauts. Dans un premier temps, nous examinerons le spectre vibratoire des roulements en parfait état, qui servira de référence

Pour les analyses des défauts

III.7.1 Empreinte spectrale globale du défaut de la bague extérieure :

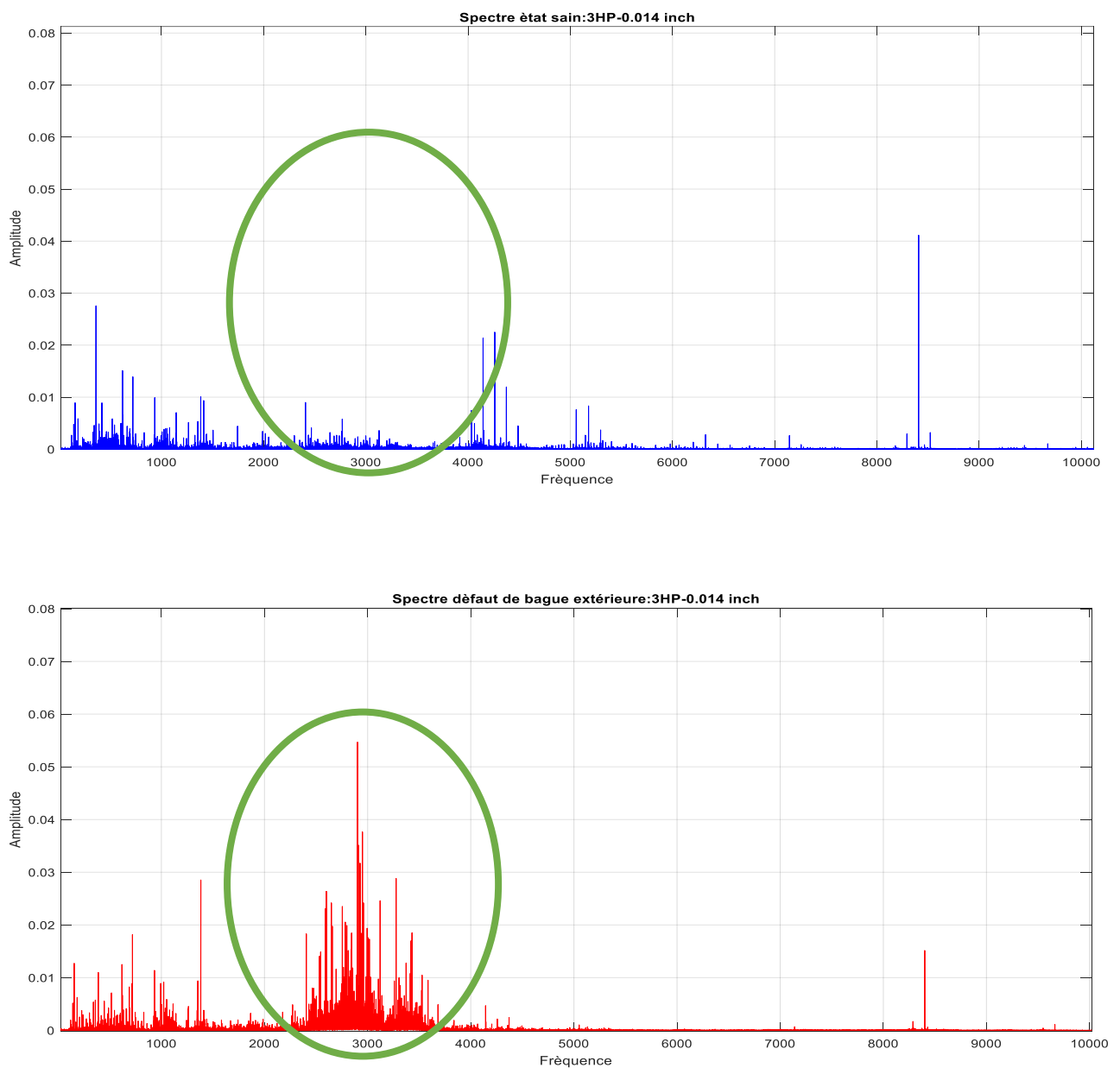


Figure III.13 : Spectre état sain et défaut bague extérieure : 3HP – 0.014 inch.

Dans le cas d'un roulement sain, le spectre présente une faible amplitude globale, avec l'énergie principalement concentrée aux moyennes fréquences, correspondant aux composantes normales de rotation. Aucune signature anormale n'est à noter.

En revanche, la présence du défaut sur la bague extérieure modifie radicalement le contenu spectral du signal vibratoire. On observe distinctement :

Une augmentation des amplitudes dans les moyennes fréquences : Une augmentation significative de l'activité vibratoire est visible dans la bande de fréquences allant de 2500 à 3500 Hz. Cette zone, calme dans le spectre sain, devient très active en présence du défaut.

Ceci traduit l'excitation de résonances structurales par les chocs répétitifs générés par le défaut. Les amplitudes dans cette bande sont un indicateur sensible de la présence d'impacts.

III.7.2 Empreinte spectrale globale du défaut de la bague intérieure :

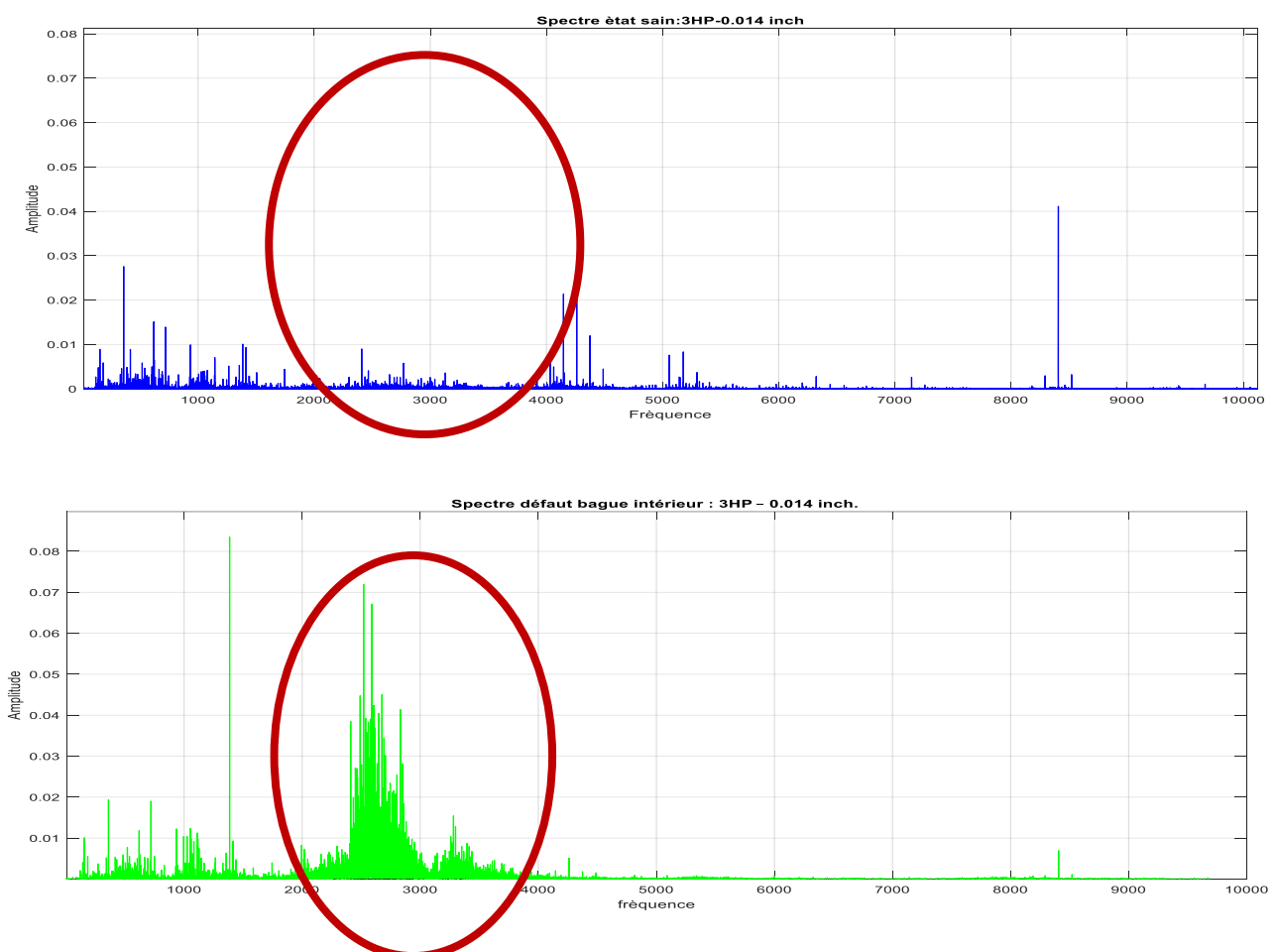


Figure III .14 : Spectre état sain et défaut bague intérieure : 3HP – 0.014 inch

L'analyse spectrale comparative de la Figure **III. 14**, qui oppose l'état sain (spectre du haut) à celui d'un roulement présentant un défaut sur la bague intérieure (spectre du bas) sous une charge de 3 HP, met en lumière les signatures distinctives de cette défaillance. Comme précédemment, le spectre du roulement sain sert de référence, affichant une faible amplitude générale et une énergie concentrée aux basses fréquences, liées à la rotation normale.

En présence du défaut sur la bague intérieure, le spectre vibratoire subit une transformation significative :

Activité accrue dans les moyennes fréquences : De manière similaire au défaut sur la bague extérieure, on note une augmentation substantielle de l'énergie vibratoire dans la bande de fréquences allant de 2500 à 3500 Hz. Cette excitation des moyennes fréquences, absente dans le cas d'un roulement sain, confirme la présence de chocs répétitifs induits par le défaut mécanique.

III.7.3 Empreinte spectrale globale du défaut des Billes :

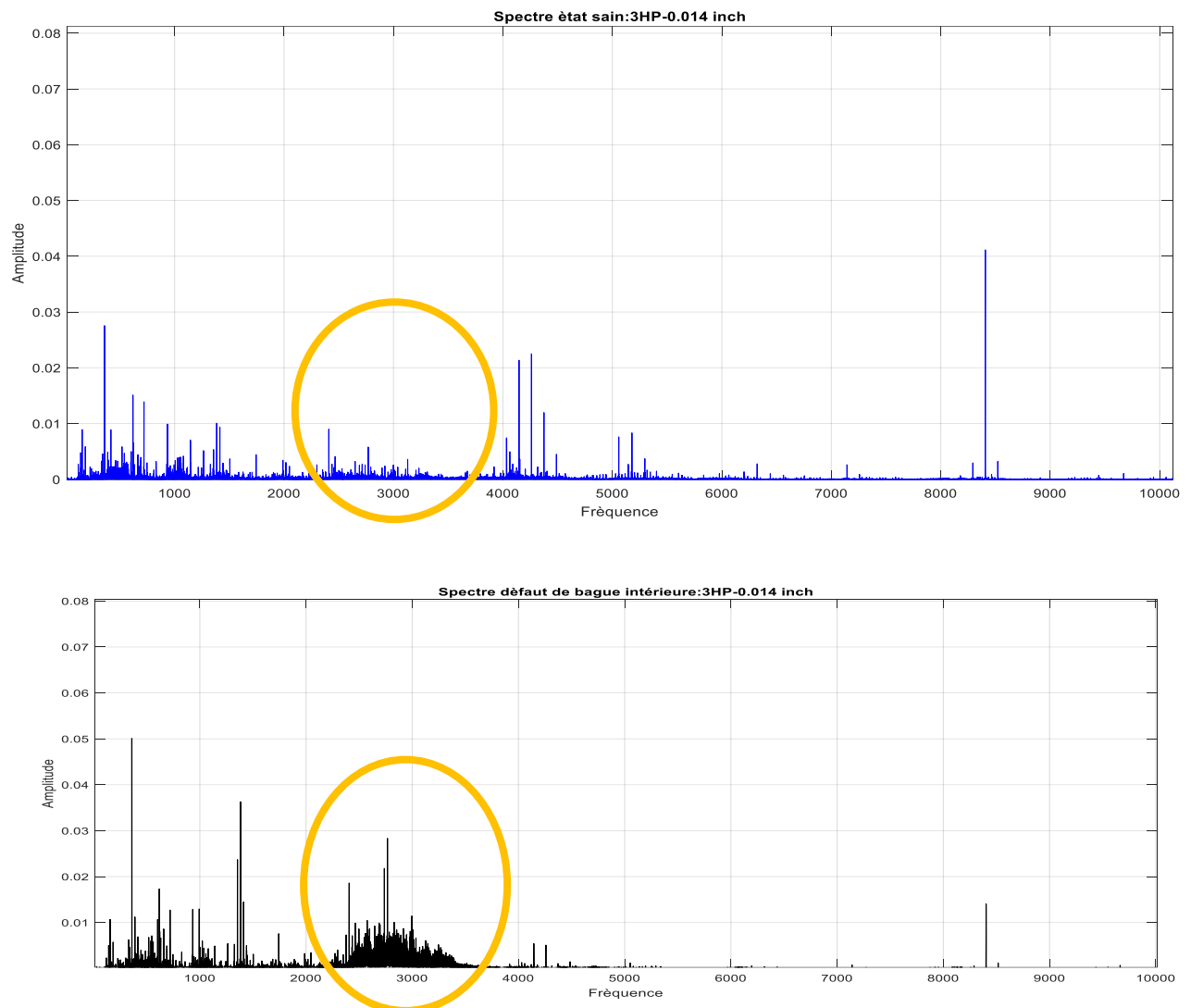


Figure III.15 : Spectre état sain et défaut la bille : 3HP – 0.014 inch.

Le spectre du roulement sain demeure notre référence, avec son faible niveau vibratoire global et son amplitude principalement concentrée aux moyennes fréquences.

Lorsque le défaut affecte une bille, le spectre vibratoire présente des modifications caractéristiques, bien que potentiellement plus complexes qu'un défaut sur une bague en raison du mouvement combiné de rotation et d'orbitations de la bille :

Activité marquée dans les moyennes fréquences : De manière similaire aux autres types de défauts, une augmentation notable de l'énergie vibratoire est visible dans la bande de fréquences allant de 2500 à 3500 Hz. Cette zone, relativement calme pour le roulement sain, est fortement excitée par les chocs répétitifs générés par le défaut sur la bille, confirmant la présence d'impacts mécaniques.

III.8. Organigramme de la méthode proposée pour de détection des défauts de roulements par analyse vibratoire

Après avoir mis en évidence la problématique inhérente au processus de diagnostic des défauts de roulement, il est apparu que l'approche conventionnelle de diagnostic pour ce type de défaillances, qui repose sur le suivi des amplitudes des harmoniques caractéristiques, s'avérait non seulement coûteuse mais également peu efficace, offrant un intérêt limité et menant fréquemment à un diagnostic erroné.

En conséquence, et pour apporter une solution adéquate, nous avons proposé une méthode simple permettant une détection automatique des défauts de roulement de manière rapide, fiable et avec de faibles exigences. Cette méthode repose sur l'analyse spectrale quantitative de l'ensemble des harmoniques se situant dans l'intervalle fréquentiel [2500 Hz – 3500 Hz]. Le principe et les étapes de cette méthode sont clairement illustrés par l'organigramme présenté à la Figure III.16."

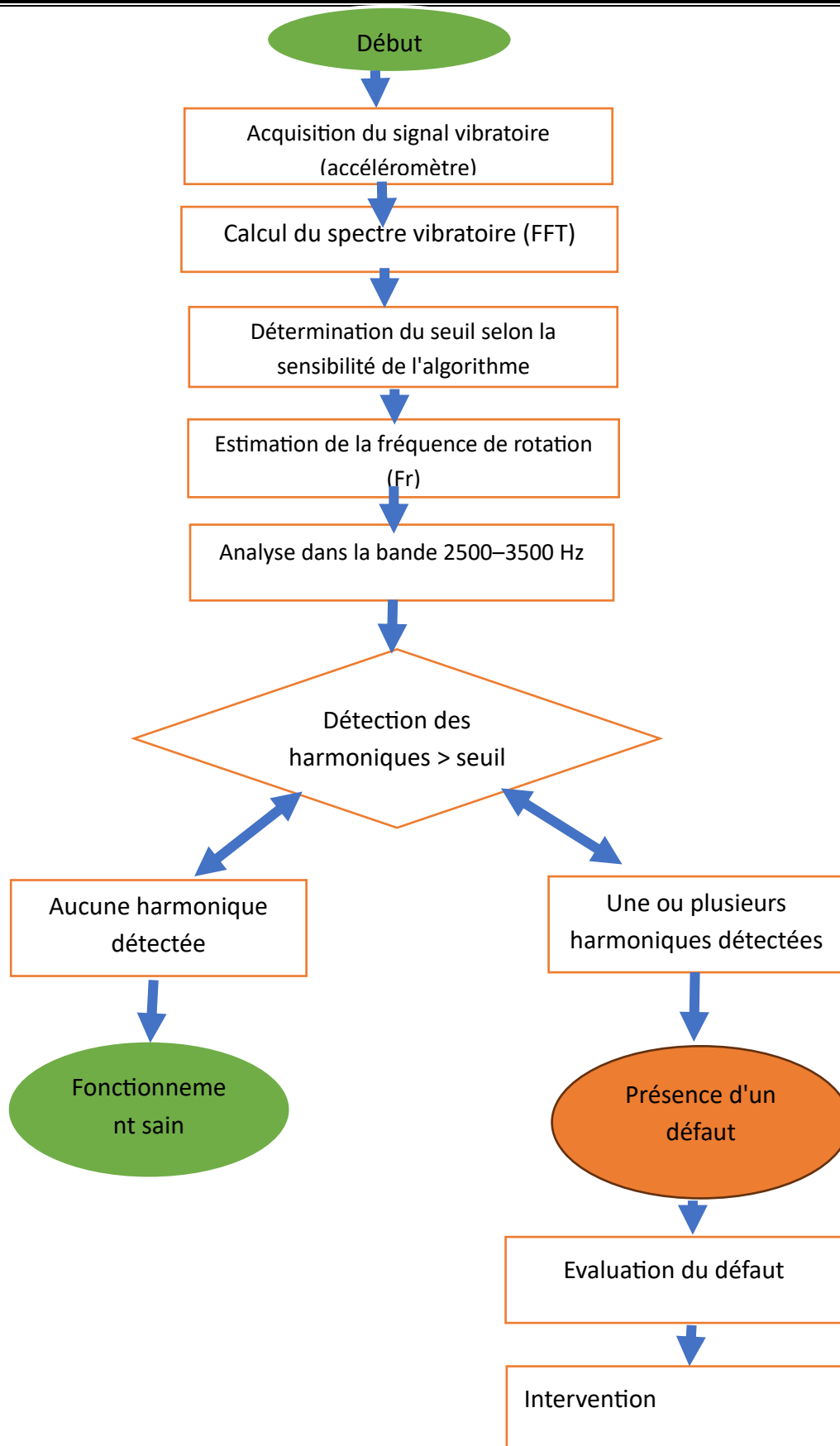


Figure III.16 : Organigramme des étapes de détection des défauts de roulement

La figure III.16 montre que le processus de détection commence par l'acquisition du signal vibratoire à l'aide d'un accéléromètre, suivie du calcul de son spectre vibratoire et de l'estimation de la fréquence de rotation.

Par la suite, le signal est analysé dans la bande des moyennes fréquences (2500-3500 Hz) afin de détecter les harmoniques dépassant un seuil défini.

Si de telles harmoniques ne sont pas détectées, le roulement est considéré comme sain.

En revanche, si elles sont détectées, cela indique la présence d'un défaut, qui est alors diagnostiqué dans ce cas comme seulement un défaut de roulement sans spécifier la partie du roulement en défaut puisque ceci n'a pas d'importance. Une telle décision sera suivie par une intervention corrective.

III.9 Test de la méthode proposée

En complément des analyses spectrales et de l'identification manuelle des signatures de défauts abordées précédemment, cette section a pour objectif de tester expérimentalement l'efficacité de la méthode proposée pour la détection des différents types des défauts de roulement. Il s'agit ici de démontrer la capacité de l'algorithme proposé à traiter et classifier automatiquement des signaux vibratoires issus des essais expérimentaux sous différentes conditions de fonctionnement (différents types de défauts avec différentes sévérités sous différentes charges).

Les performances de la méthode proposée lorsqu'elle est confrontée à ces signaux expérimentaux, sera ensuite évaluée, mettant en lumière son potentiel pour des applications de surveillance et de diagnostic en continu, quelle que soit la nature spécifique des données d'entrée acquises dans des conditions similaires.

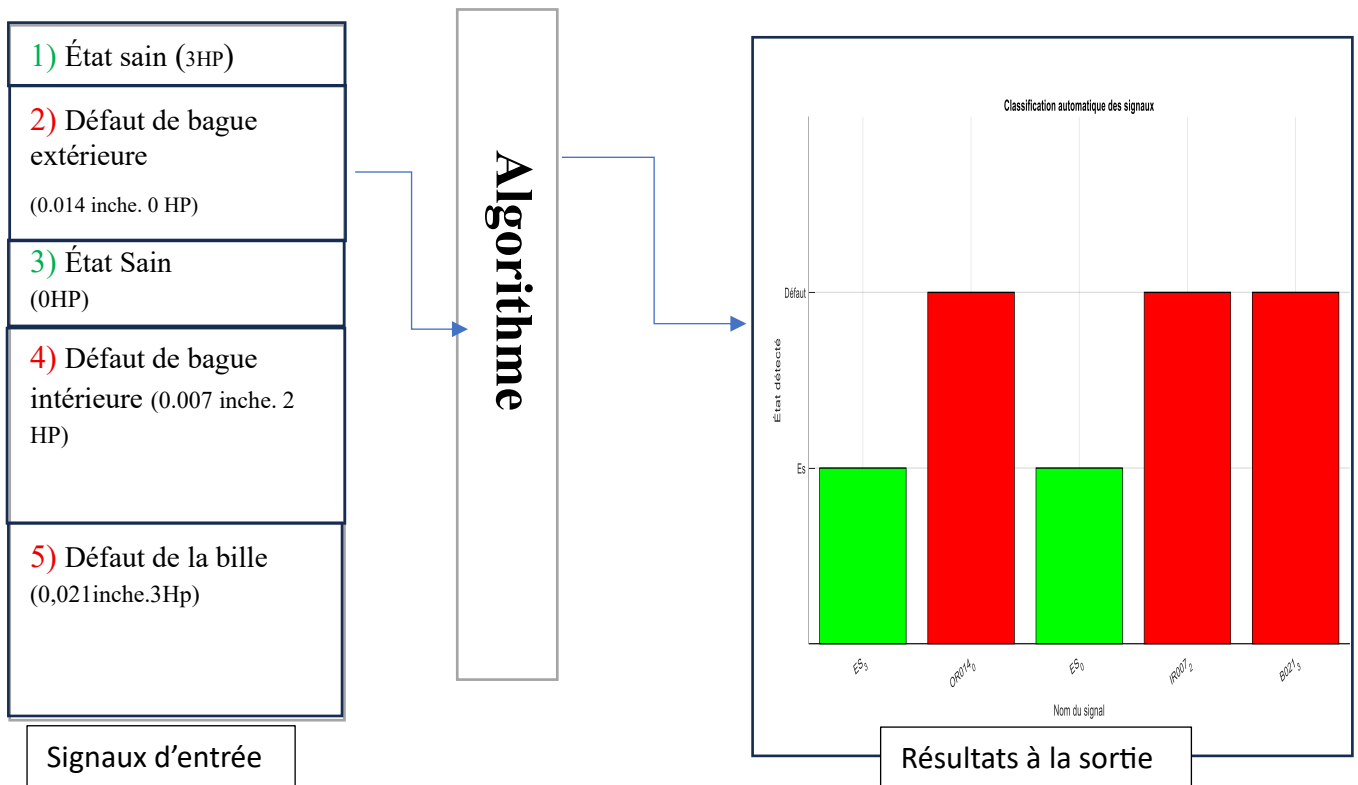


Figure III.17 : Résultats obtenus d'un test de la méthode proposée

Comme on peut le voir clairement, les résultats obtenus reflètent parfaitement les détails des signaux d'entrée. Selon les valeurs de l'indicateur de défaut visualisées à la sortie de l'algorithme, l'utilisateur peut facilement distinguer les états sains de ceux avec défaut de roulement.

Il est à noter que l'algorithme proposé a détecté avec succès l'apparition d'un défaut de roulement même avec faible sévérité et sous une très faible charge, ce qui démontre la précision et la robustesse de cet algorithme.

Il est à signaler également que la sensibilité de cet algorithme est réglable via la valeur du paramètre « S » qui représente le seuil. Donc, les harmoniques dont les amplitudes dépassent le seuil seront considérés pour évaluer l'indicateur de défaut.

En fait, Si « S » a une petite valeur, toute variation même de faible ampleur sera détectée. Cependant, lorsque « S » est élevé, l'algorithme ne détecte que les changements importants produits par un défaut sévère.

III.10. Conclusion

À l'issue de cette étude expérimentale, il a été constaté que les valeurs théoriques calculées des fréquences caractéristiques restent très proches de celles observées dans l'état sain, ce qui ne permet pas de mettre en évidence, de manière certaine, la présence d'un défaut. Ce résultat suggère une possible imprécision ou une erreur dans les données fournies par la base de données expérimentale du (**Bearing Data Center**), notamment en ce qui concerne l'identification exacte de la nature ou de la localisation des défauts introduits.

Cependant, l'analyse des spectres vibratoires — en particulier dans la bande de fréquence de 2500 à 3500 Hz — a révélé des anomalies significatives traduisant une activité vibratoire anormale, ce qui confirme la présence d'un défaut. Néanmoins, ces anomalies restent insuffisantes pour permettre une localisation précise du défaut : il demeure difficile de déterminer s'il s'agit d'une dégradation de la bague intérieure, de la bague extérieure ou des éléments roulants.

Cette incertitude souligne les limites de la base de données exploitée et met en évidence la nécessité de disposer de données expérimentales mieux caractérisées, ou de compléter l'analyse vibratoire par d'autres techniques de diagnostic pour une localisation plus fiable des défauts.

Conclusion Générale

Ce mémoire de Master s'est attaché à investiguer la problématique cruciale de la détection des défauts de roulements au sein des machines asynchrones, composants essentiels dont la défaillance peut engendrer des conséquences significatives sur les processus industriels. L'objectif central était d'évaluer la pertinence et l'efficacité de l'analyse vibratoire comme outil de diagnostic pour identifier de manière précoce les dégradations affectant ces éléments critiques.

Pour atteindre cet objectif, une démarche méthodologique basée sur l'exploitation de données expérimentales a été adoptée. Nous nous sommes appuyés sur les signaux vibratoires issus du banc d'essai "Bearing Data Center", reconnu pour la qualité de ses données et la présence de défauts contrôlés (par électro-érosion) sur différents éléments des roulements. L'analyse s'est concentrée sur la comparaison des signatures spectrales de roulements sains et de roulements présentant un défaut spécifique au niveau de la bague intérieure, et ce, sous différentes conditions de charge (0, 1, 2 et 3 HP). L'analyse fréquentielle, notamment via la transformée de Fourier rapide (FFT), a constitué l'outil principal pour extraire les caractéristiques pertinentes des signaux.

Les résultats obtenus ont clairement mis en évidence la capacité de l'analyse vibratoire à détecter la présence de défauts sur la bague intérieure. Les signatures spectrales des roulements défectueux ont révélé l'émergence de composantes fréquentielles caractéristiques, notamment la fréquence de passage des billes sur le défaut de la bague intérieure (F_{bi}) et ses harmoniques. L'amplitude de ces composantes s'est avérée être un indicateur sensible à la présence du défaut, se distinguant nettement du spectre des roulements sains. De plus, l'analyse comparative sous différentes charges a montré une intensification de ces signatures avec l'augmentation de la charge, se traduisant par des amplitudes plus élevées et l'apparition plus marquée des harmoniques et, potentiellement, de modulations (bandes latérales) dans les bandes de fréquences basses et hautes. L'examen des bandes de fréquences plus élevées (typiquement au-delà de 2000 Hz) a également révélé une activité spectrale accrue en présence du défaut, suggérant l'existence d'impacts répétitifs caractéristiques de la dégradation.

En synthèse, cette étude confirme la valeur diagnostique de l'analyse vibratoire pour la surveillance des roulements de machines asynchrones. L'identification de signatures spectrales spécifiques permet non seulement de détecter la présence d'un défaut, mais aussi d'obtenir des indications sur sa localisation (bague intérieure dans notre cas) et potentiellement sur sa sévérité, notamment en observant l'évolution des amplitudes et l'enrichissement du spectre sous charge. Ces

Informations sont précieuses pour la mise en œuvre d'une maintenance prédictive, permettant d'anticiper les pannes, de planifier les interventions et ainsi d'optimiser la disponibilité des équipements et de réduire les coûts associés aux arrêts imprévus.

Ce travail ouvre néanmoins la voie à plusieurs perspectives. Il serait pertinent d'étendre cette analyse à d'autres types de défauts (bague externe, billes, cage) et d'étudier l'influence combinée de plusieurs défauts. L'application de techniques de traitement du signal plus avancées (analyse d'enveloppe, ondelettes, etc.) pourrait affiner le diagnostic, notamment pour la détection de défauts très incipient ou dans des environnements bruités. Enfin, l'intégration de ces méthodes dans des systèmes de surveillance automatisés, potentiellement couplée à des approches d'intelligence artificielle pour la classification des défauts, représente une voie prometteuse pour améliorer encore la fiabilité et l'efficacité de la maintenance des machines asynchrones.

Bibliographie

- [01] AFNOR « Association Française de Normalisation. »
- [02] Saadi SAKHARA « DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE PAR LA TECHNIQUE ONDELETTE » Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [03] Ronald. Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes » Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France, 2003.
- [04] Ahmed BELLAQUAR, M.A. Salima BELEULMI « Fiabilité Maintenabilité Disponibilité (FMD) », Polycopie scientifique, UNIVERSITE Constantine 1.
- [05] « Schneider Electric », Le Guide de l'Installation Electrique en format Wiki
<https://fr.electrical-installation.org>
- [06] Issam MOUMENE « IDENTIFICATION DES DÉFAUTS MIXTES D'ENGRENAGE ET DE ROULEMENT PAR ANALYSE VIBRATOIRE », Mémoire de Magister, Université de 08 Mai 45 –Guelma.
- [07] Adib ALLAHHAM « Surveillance des systèmes à événements discrets commandés : Conception et implémentation en utilisant l'automate programmable industriel », thèse Doctorat, Université Joseph- Fourier - Grenoble I, 2008. Français.
- [08] Miloudi H. . A. Bendaoud . Miloudi M. « Réduction des perturbation Electromagnétique conduites dans la machine asynchrone », Méditerranéen Journal of Modeling and Simulation MJMS 02 (2014) 008-015.
- [09] Driss BOUAMI, « Le Grand Livre de la Maintenance », Dominique Cohen2019.
- [10] ISO « Organisation internationale de normalisation » (International Organization for Standardization en anglais).
- [11] Driss Bouami, « Le GRAND LIVRE de la GESTION des stocks et APPROVISIONNEMENTS », Dominique Cohen2022.
- [12] Bennedjai Soumaya, « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction », Thèse Doctorat (Électromécanique), Université Annaba, 2016.

- [13] Khenfer, N. « Machine asynchrone : ses modèles, son identification et sa commande» Thèse de doctorat .École Nationale Polytechnique, Algérie (1995).
- [14] B. Raison, « Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique », Thèse de doctorat de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.
- [15] HAOUAM Nassim Eddine, « Détection et diagnostic des dégradations d’un entrainement électrique », THÈSE DOCTORAT, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA,2020.
- [16] BELHAMDI Saad, « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande », thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [17] BESSOUS Nouredine, « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation », Thèse Doctorat, UNIVERSITE Mohamed Khider Biskra 2017.
- [18] SAHRAOUI Mohamed, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse Doctorat, Université Mohamed KHIDER Biskra 2010
- [19] GHOGGAL Adel, « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts », Mémoire de MAGISTERE, Université de Batna 2005.
- [20] Samatar Omar Farah, « Modélisation multiphysique des roulements à billes par la Méthode des Éléments Discrets en régime Élasto-Hydrodynamique », Thèse Doctorat, Universite De Picardie Jules Verne, 12 décembre 2022.
- [21] Samy LACROIX, « Analyse et validation expérimentale d’un modèle de roulement à billes à quatre points de contact à bagues déformables par découplage des effets locaux et structuraux », Thèse Doctorat, l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2014.
- [22] BOUZAOUIT Azzedine « INFLUENCE DE LA VIBRATION SUR LA DUREE DE VIE DES ROULEMENTS » Thèse Doctorat Université Badji Mokhtar-Annaba-2008
- [23] Saïd, D « Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements », Thèse Doctorat, Université de Souk Ahras. (2015)
- [24] Nouredine BESSOUS « Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones. » Thèse de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE 2007.

- [25] TALEB MOUNIA « Surveillance, détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant L'analyse fonctionnelle » Thèse de Doctorat, Université de Skikda, 18/03/2018.
- [26] M. BAZI Smail « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts Dans un Système Machine à Induction-Convertisseur » Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2016
- [27] Abdelghani Chahmi, « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », Thèse de doctorat, université des sciences et technologie d'Oran - 2017.