



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machines électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
TEMLALI Mohamed Amine

Le : dimanche 24 juin 2018

Analyse et traitement de signal vibratoire pour la Détection et le diagnostic des défauts de roulement

Jury :

M.	BENCHOUIA Mohamed Toufik	Pr	Université Mohamed Khider Biskra	Président
M.	REZIG Mohamed	MAA	Université Mohamed Khider Biskra	Examineur
Mme.	LAALA Widad	MCB	Université Mohamed Khider Biskra	Rapporteur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière :Electrotechnique
Option: machines électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Analyse et traitement de signal vibratoire pour la
Détection et le diagnostic des défauts de roulement**

Présenté par :

TEMLALI Mohamed Amine

Avis favorable de l'encadreur :

Mme.LAALA Widad

Signature

Avis favorable du Président du Jury

Mr.BENCHOUIA Mohamed Toufik

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière :Electrotechnique
Option :machines électriques

Thème :

**Analyse et traitement de signal vibratoire pour la
Détection et le diagnostic des défauts de roulement**

Proposé par :TEMLALI Mohamed Amine .

Dirigé par : LAALA Widad .

Résumé

Les entraînements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnement dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine. L'une des raisons principales de ces défaillances reste les défauts de roulements à billes. Afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement des entraînements, des schémas de surveillance peuvent être mis en place afin d'assurer une maintenance préventive.

Ce travail traite la détection et le diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone. Généralement, une surveillance vibratoire peut être mise en place. Dans ce contexte, trois approches ont été proposées. la première repose sur l'analyse temporelle les deux autres utilisent l'analyse fréquentielle du signal vibration et son enveloppe.

Les mots clés : les défauts de roulements , le diagnostic , machine asynchrone , l'analyse temporelle , l'analyse fréquentielle du signal vibration , surveillance , maintenance préventive

ملخص:

يتم استخدام المحركات الكهربائية غير المتزامنة القائمة على الماكينة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية بسبب انخفاض كلفتها وأدائها وصلابتها. ومع ذلك ، قد تظهر أوضاع التشغيل المتدهورة أثناء حياة الجهاز. واحد من الأسباب الرئيسية لهذه الفشل هو عطب المدحرجات . من أجل تحسين السلامة التشغيلية للمحركات ، يمكن وضع خطط المراقبة لضمان الصيانة الوقائية. يتناول هذا العمل اكتشاف وتشخيص عيوب المدحرجات في ماكينة غير متزامنة. بشكل عام ، يمكن وضع مراقبة اهتزازية. في هذا السياق ، تم اقتراح ثلاثة مناهج. أولهما يعتمد على التحليل الزمني ، بينما يستخدم الآخران تحليل تردد إشارة الاهتزاز ومغلفها.

الكلمات المفتاحية :

أعطاب المدحرجات ، التشخيص ، ماكينة غير متزامنة ، التحليل الزمني ، تحليل تردد إشارة الاهتزاز ، الصيانة الوقائية المراقبة .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui ont su me motiver afin de réussir dans ma vie, qui ont consacré leur vie en œuvrant pour mon bonheur et mon bien être.

*Ma sœur- **Salsabile** et mes frères-**Sami-Hichem-Akrem**- qui ont toujours été un grand appui pour moi.*

*Mon encadreur de recherche madame **LAALA WIDAD** qui m'a été d'une grande aide durant la réalisation de ce mémoire.*

Tous Mes amis.

Enfin, tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant de nous avoir donnés la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à exprimer mon éternelle gratitude à mes parents qui ont veillé à ma réussite.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mme. LAALA WIDAD d'avoir acceptée de diriger notre travail pour ces précieux conseils et son aide durant tout la période de travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qui ont apporté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et, de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseignés et qui, par leurs compétences, nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail sans oublier mes collègues.

sommaire

sommaire

Chapitre I : État de l'Art

I.1	Introduction	3
I.2	Constitution de la machine asynchrone	3
I.2.1	Stator	4
I.2.2	Rotor	4
I.2.3	Les paliers	5
I.3	Définitions de quelques termes liés au diagnostic.....	6
I.3.1	Diagnostic.....	6
I.3.2	Fiabilité.....	6
I.3.3	Disponibilité.....	6
I.3.4	Défaillance	6
I.3.5	Maintenance.....	6
I.3.6	Maintenabilité.....	7
I.3.7	Sécurité.....	7
I.3.8	Sûreté	7
I.4	Les Défaillances dans un moteur asynchrone a cage triphasée.....	7
I.4.1	Défaillances d'ordre électrique.....	8
I.4.1.1	Défaillances des circuits électriques statoriques.....	8
I.4.1.1.1	Court-circuit entre phases.....	8
I.4.1.1.2	Court-circuit entre spire et le neutre :.....	8
I.4.1.1.3	Défauts d'isolant dans un enroulement	9
I.4.1.2	Défaillances des circuits électriques rotorique.....	9
I.4.1.2.1	Ruptures de barres.....	9
I.4.1.2.2	Ruptures d'anneaux	10
I.4.2	Défaillance d'ordre mécanique	10
I.4.2.1	Défaillance des roulements	10
I.4.2.1.1	Cinématique de défaut de roulement et Fréquences caractéristiques	10
I.4.2.1.2	Avaries de roulement et remèdes :.....	12
I.4.2.1.2.1	Ecaillage	13

I.4.2.1.2.2	Blocage	14
I.4.2.1.2.3	Fissures et cassures	14
I.4.2.1.2.4	Détérioration de cage	15
I.4.2.1.2.5	Déformation du chemin de roulement	16
I.4.2.1.2.6	Usure et grippage.....	17
I.4.2.1.2.7	Corrosion	17
I.4.2.1.2.8	Corrosion de contact	18
I.4.2.1.2.9	Usure	19
I.4.2.1.2.10	Passage de courants électriques à travers le roulement :.....	20
I.4.2.1.2.11	Rayures et empreintes	20
I.4.2.1.2.12	Rotation de bagues:.....	21
I.4.2.1.2.13	Taches et décoloration :.....	22
I.4.2.1.2.14	Ecaillage en peau d'organe (peeling) :.....	22
I.4.2.2	Défauts d'excentricité	23
I.4.2.3	Défaillances des flasques	24
I.4.2.4	Défaillances de l'arbre:.....	24
I.5	Étude statistique des défauts	24
I.6	Les signaux utilisés pour le diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à cage.....	26
I.6.1	Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites :.....	26
I.6.2	Diagnostic par analyse du courant statorique	27
I.6.3	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	27
I.6.4	Analyses vibratoires de la machine.....	27
I.6.5	Diagnostic par l'analyse de l'enveloppe du courant statorique	28
I.7	Conclusion.....	28

Chapitre II : Signature vibratoire et indicateurs scalaires .

II.1	Introduction	29
II.2	Relation entre les défauts de roulements et les vibrations.....	29
II.3	Signatures vibratoires des principaux défauts.....	30
II.3.1	Défaut de type écaillage affectant la bague externe	30
II.3.2	Défaut de type écaillage affectant la bague interne	31
II.3.3	Défaut de type écaillage sur un élément roulant	32
II.3.4	Défauts de type déversement de bague	32
II.3.5	Remarque	33

II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements.....	34
II.4.1 Principe de la mesure	34
II.4.2 Indicateurs vibratoires spécifiques scalaires aux roulements	34
II.4.2.1 Facteur de crête FC.....	34
II.4.2.2 Facteur de défaut de roulement FD	35
II.4.2.3 Le kurtosis	36
II.4.2.4 Le facteur k	37
II.4.3 L'analyse spectrale	37
II.4.4 La transformée de Hilbert et le spectre d'enveloppe	37
II.4.5 La transformée en ondelettes et les paquets d'ondelettes	38
II.5 Conclusion.....	38
 Chapitre III : Résultats expérimentaux .	
III.1 Introduction.....	39
III.2 Description du banc d'essai	39
III.3 Analyse du signal vibratoire.....	40
III.3.1 Analyse dans le domaine temporel.....	40
III.3.2 Limite de l'approche temporelle	43
III.3.3 L'approche fréquentielle.....	43
III.3.4 Diagnostic par l'utilisation de l'enveloppe du signal vibration.....	49
III.4 Conclusion	50
Annexe	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I :

Fig. I.1 : Constitution de la machine asynchrone.....	3
Fig. I.2 : Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone	4
Fig. I.3 : Les anneaux de court-circuit de rotor.....	5
Fig. I.4 : Causes externes des défauts	7
Fig. I.5 : Causes internes des défauts	8
Fig. I.6 : Cinématique de défaut de roulement.....	12
Fig. I.7 : L'écaillage des pistes.....	13
Fig. I.8 : Blocage.....	14
Fig. I.9 : Fissure et cassure des bagues.....	15
Fig. I.10 : Détérioration de cage.....	16
Fig. I.11 : Déformation du chemin de roulement.....	16
Fig. I.12 : Usure et grippage.....	17
Fig. I.13 : Corrosion des pistes.....	18
Fig. I.14 : Corrosion de contact.....	19
Fig. I.15 : Usure (modification de la précision géométrique).....	19
Fig. I.16 : Effet de passage du courant sur les roulements.....	20
Fig. I.17 : Rayures et empreintes.....	21
Fig. I.18 : Rotation de bagues.....	21
Fig. I.19 : Taches et décoloration.....	22
Fig. I.20 : Ecaillage en peau d'organe (peeling).....	22
Fig. I.21 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique.....	23
Fig. I.22 : Répartition du taux de panne dans les machines asynchrone.	25
Fig. I.23 : Répartition des pannes pour les machines de fortes puissances.....	25
Fig. I.24 : Répartition des pannes de moyenne puissance	26
Fig. I.25 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	27

Chapitre II

Fig. II.1 : Signal vibratoire simulé avec excitation d'un mode propre de la bague externe.....	30
Fig. II.2 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure.....	31

Fig. II.3 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	31
Fig. II.4 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	32
Fig. II.5 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague.....	33
Fig. II.6 : Défaut de déversement des bagues d'un roulement.....	33
Fig. II.7 : Evolution du facteur de crête aux différents stades de dégradation du roulement.....	35
Fig. II.8 : Evolution du Kurtosis aux différents stades de dégradation du roulement.....	36
Chapitre III.	
Fig. III.1 : Le banc d'essai expérimental.....	39
Fig. III.2 : Signaux vibratoires: (a) roulement sain, (b) roulement avec défaut de balle, (c) Roulement avec défaut de cage interne, (d) roulement avec défaut de cage externe.....	40
Fig. III.3 : Indicateurs scalaires en fonction des défauts pour (a) forte charge et (b) faible charge.....	42
Fig. III.4 : Évolution de des indicateurs statistiques en fonction du diamètre d'un défaut bague externe.....	43
Fig. III.5 : le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne.....	45
Fig. III.6 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne.....	45
Fig. III.7 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne.....	46
Fig. III.8 : le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe.....	47
Fig. III.9 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe.....	47
Fig. III.10 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe.....	48
Fig. III.11 : Spectre de vibration avec défaut de bille(0.21inch) pour une vitesse de 1796 tr/mn.....	49
Fig. III.12 : (a) Spectre de vibratoire, (b) spectre de l'enveloppe du signal vibration.....	50

Listes des tableaux

Listes des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristique de roulement (DE).

Tableau III.2 : Indicateurs statistiques avec roulements sain et défectueux pour une vitesse 1796 tr/mn.

Tableau III.3 : Indicateurs statistiques avec roulements sain et défectueux pour une vitesse 1725 tr/mn.

Tableau III.5 : Fréquences caractéristiques des différents éléments du roulement pour une vitesse de 1725tr/mn.

Tableau III.4 : Fréquences caractéristiques des différents éléments du roulement pour une vitesse de 1796tr/mn.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

n	:	Nombre de bille.
d	:	Diamètre de billes [m].
d_e	:	Diamètre moyen du roulement [m]
β	:	Angle de contact [rad].
f_r	:	La vitesse de rotation de partie tournante(ω) [tr/s].
A_c	:	L'amplitude du signal vibratoire;
f_m	:	Fréquences de mode propre;
f_{def}	:	Fréquence caractéristique de défaut;
$u(t)$:	L'échelon unitaire.
III	:	Le peigne de Dirac
TF	:	La transformée de Fourier
$x(t)$:	Un signal réel déterministe
$X(f)$:	La transformée de Fourier du signal
N	:	Longueur
$X(k)$:	Un signal discret
$Z(f)$:	La transformée de Fourier.
$z(t)$:	Le signal analytique
$H(f)$:	La fonction de transfert du filtre de Hilbert
$x(t)$:	Le filtrage d'un signal.
$y(t)$:	La composante imaginaire du signal analytique
$h(t)$:	La réponse impulsionnelle du filtre de Hilbert; $h(t) = 1/\pi.t$
vib	:	Le signal vibration.

Introduction

Introduction générale

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail présenté dans ce mémoire rentre dans le cadre général du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone triphasé à cage. L'importance de ce type de machines revient au fait qu'il représente un élément clé de la plupart des équipements industriels, vu sa grande robustesse et son faible coût par rapport aux autres types de machines. Il est en effet, omniprésent dans tous les secteurs de pointes, tels que l'aéronautique, le nucléaire, la chimie.

Des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des machines considérées. Selon les différentes sources, les pannes dues aux roulements représentent entre 40 et 50% des pannes totales. Ces dernières génèrent des vibrations qui contribuent à la diminution de la durée de vie de l'équipement et dans des cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques. Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour la détection et le diagnostic des défauts, mais la plupart des méthodes nécessitent une bonne connaissance et un savoir faire pour les appliquer avec succès.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre contribution. Ainsi, cette thèse sera structurée de la façon suivante :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation d'une étude préliminaire en vue du diagnostic de la machine asynchrone où nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts de cette machine avec leurs causes, conséquences. Nous donnons ensuite les diverses méthodes de détection de défauts dans ces machines.

Au second chapitre, nous avons présenté les signatures vibratoires associées aux différents défauts de type écaillage. Nous avons ensuite présenté les principaux indicateurs scalaires basés

sur une analyse des signaux vibratoires temporels. Enfin, nous exposons quelques méthodes de traitement du signal avancées utilisées pour le diagnostic de défauts de roulement.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé les résultats expérimentaux pour le diagnostic des défauts de roulement. Nous avons adopté trois méthodes, la première repose sur l'approche temporelle où nous avons utilisé les indicateurs scalaires. Lors de cette étude, nous avons trouvé l'impuissance de ces indicateurs pour discerner entre un roulement sain et un autre avec défaut de balle. Cette limitation nous a incités à pencher vers l'analyse spectrale. Pour faciliter le processus de détection, nous avons exploité l'enveloppe du signal vibration. ce dernier nous a permet d'éliminer les hautes fréquences et d'amplifier les amplitudes des bases fréquences (harmoniques révélateurs de défauts).

Finalement, nous clôturons ce mémoire par une conclusion.

Chapitre I

I.1 Introduction

multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone ; elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électrique ou magnétiques. Leurs causes sont très variées. Dans les entraînements électriques les défauts se répartissent en deux catégories à savoir les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe) et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur de la machine électrique (défauts dans la chaîne d'entraînement électrique). Dans ce chapitre, on présente la constitution de la machine asynchrone à cage et les différents défauts qui peuvent l'affecter, ainsi on expose les méthodes utilisées pour la détection de ces défauts [MAH17].

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (Fig. I.1). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux mêmes. La machine asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Le flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique est produit à partir de l'induction. Les circuits magnétiques statorique et rotorique sont réalisés par un empilement de tôles ferromagnétiques fines et découpées.[YAH12]

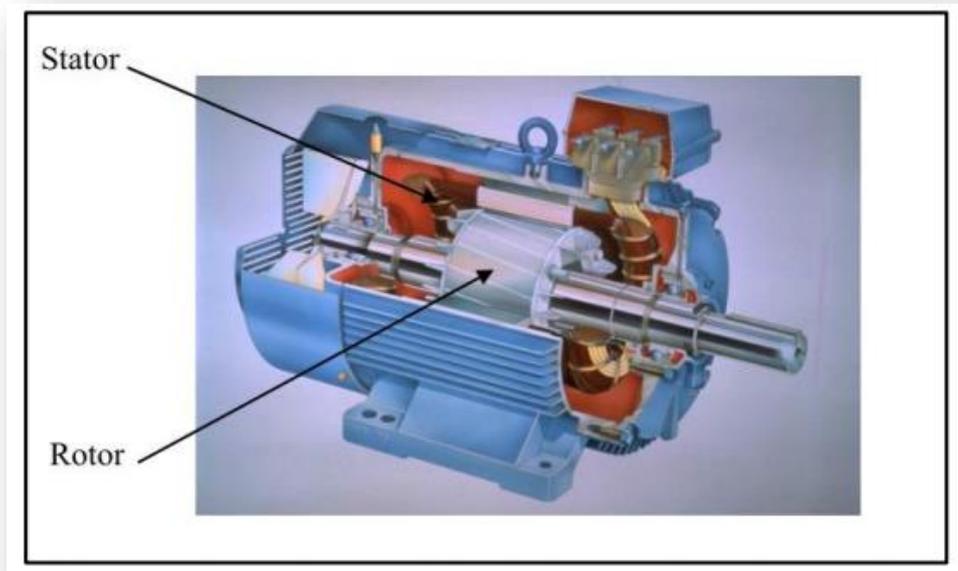


Fig. I.1 : Constitution de la machine asynchrone.

I.2.1 Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Fig. I.2). Afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre [KHA09] [BOU16].

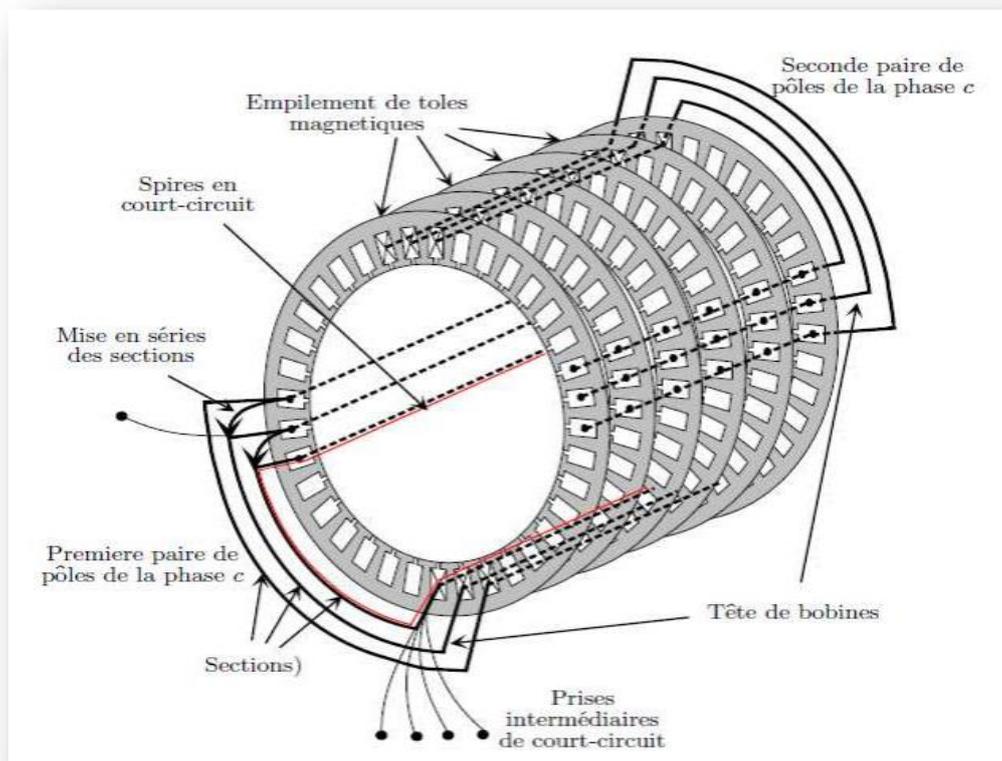


Fig. I.2 : Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone [SCH 99].

I.2.2 Rotor

Le rotor est constitué comme le stator des tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections

montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [BOU16].

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (Fig. I.3). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.[KHA09].

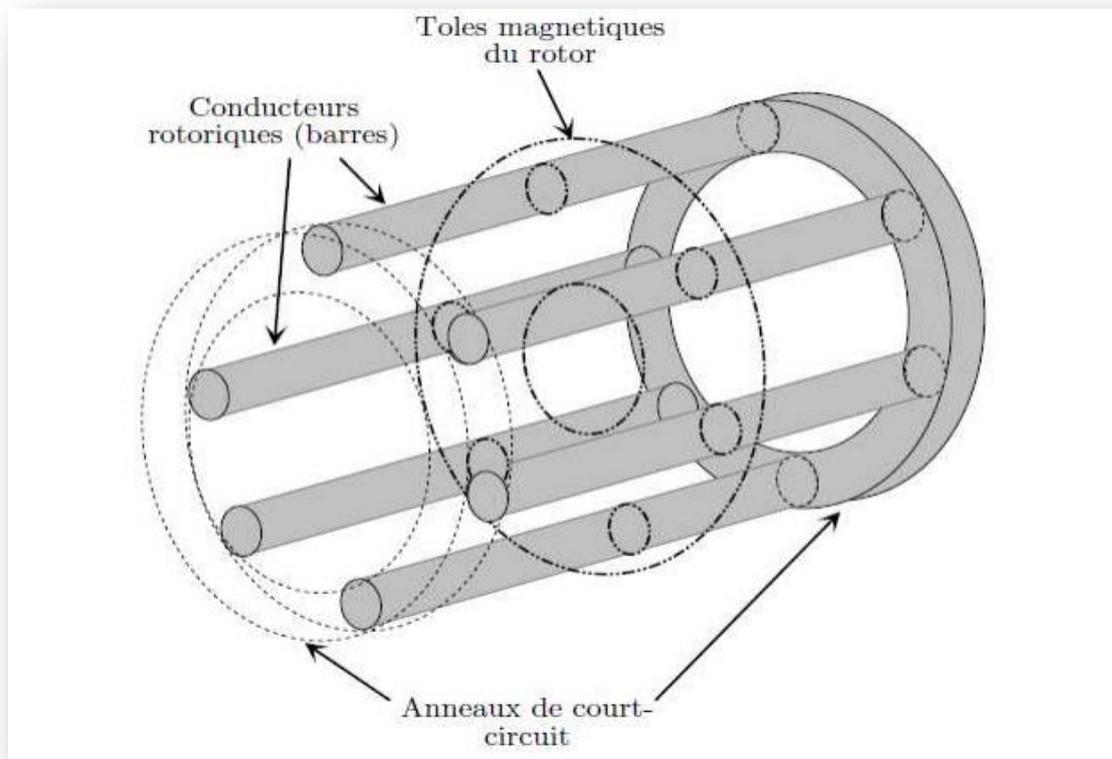


Fig. I.3 : Les anneaux de court-circuit de rotor.

I.2.3 Les paliers

Ce sont des organes mécaniques qui soutiennent le rotor et assurent la rotation libre. Ils sont constitués généralement de flasque et de roulements à billes.

I.3 Définitions de quelques termes liés au diagnostic

I.3.1 Diagnostic

Le terme diagnostic en grec "diagnosis" (par connaissance), désigne l'identification d'une maladie par ses symptômes. Dans cette courte définition on retrouve les trois mots clés :

- **Maladie** : il ne peut y avoir diagnostic que par rapport à une défaillance fonctionnelle (nous dirons anomalie). Dans notre cas les défauts des machines tournantes, encore faut-il pour parler de maladie que la présence de ce défaut constitue une entrave pour le bon fonctionnement de la machine.
- **Symptôme** : pour effectuer un diagnostic, il faut disposer d'informations significatives qui permettant de reconnaître le défaut si on veut être efficace. Il faut que l'information soit adoptée au besoin d'où la nécessité en général, de traiter celle-ci.
- **Identification** : c'est la démarche par laquelle on effectue le tri des informations qui sont en notre disposition pour sélectionner un ou plusieurs défauts possibles.

Donc de la définition le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection d'un contrôle ou d'un test.

I.3.2 Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée. La fiabilité est destinée non seulement au concepteur et réalisateur mais aussi au responsable de la maintenance pour Le choix judicieux de nouveaux équipements, La définition de la politique de maintenance à appliquer, et en cas de besoin l'amélioration de leur disponibilité.

I.3.3 Disponibilité

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée

I.3.4 Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal, le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

I.3.5 Maintenance

La maintenance est l'action de mise en état du matériel; elle peut être préventive afin d'augmenter la fiabilité du système ou bien curative consécutivement au diagnostic d'un défaut.

I.3.6 Maintenabilité

Caractérise la facilité de maintenance du procédé, elle peut être largement augmentée par la mise en œuvre d'un système de diagnostic [BOU16].

I.3.7 Sécurité

Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel.

I.3.8 Sûreté

La sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système; elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement [HAL15].

I.4 Les Défaillances dans un moteur asynchrone a cage triphasée

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être d'origine environnementale, mécanique ou électrique. Leurs causes sont très variées. Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales (Figs. I.4 et I.5) [KHA09].

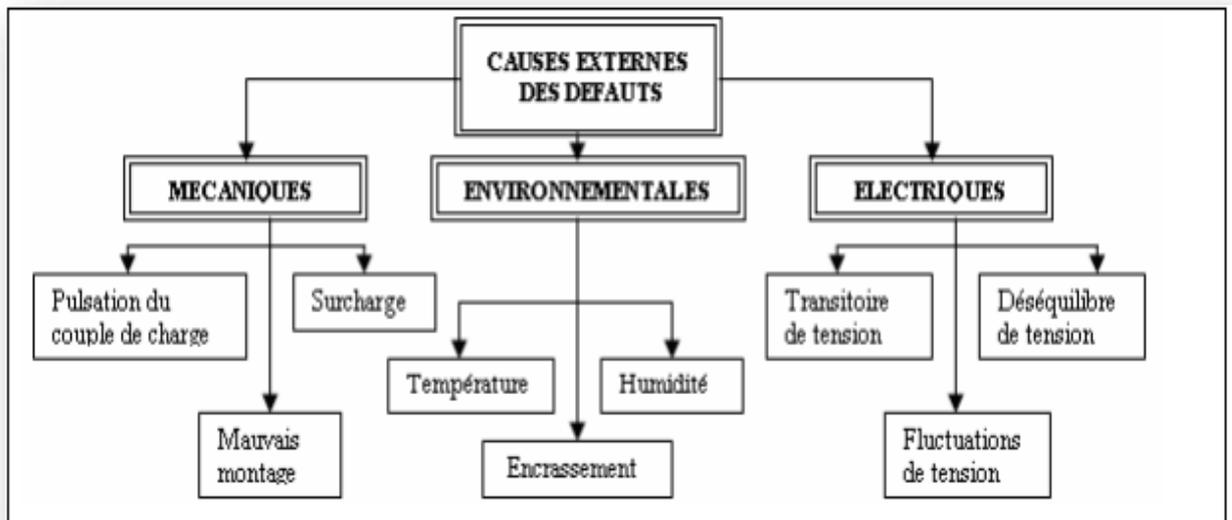


Fig. I.4 : Causes externes des défauts.

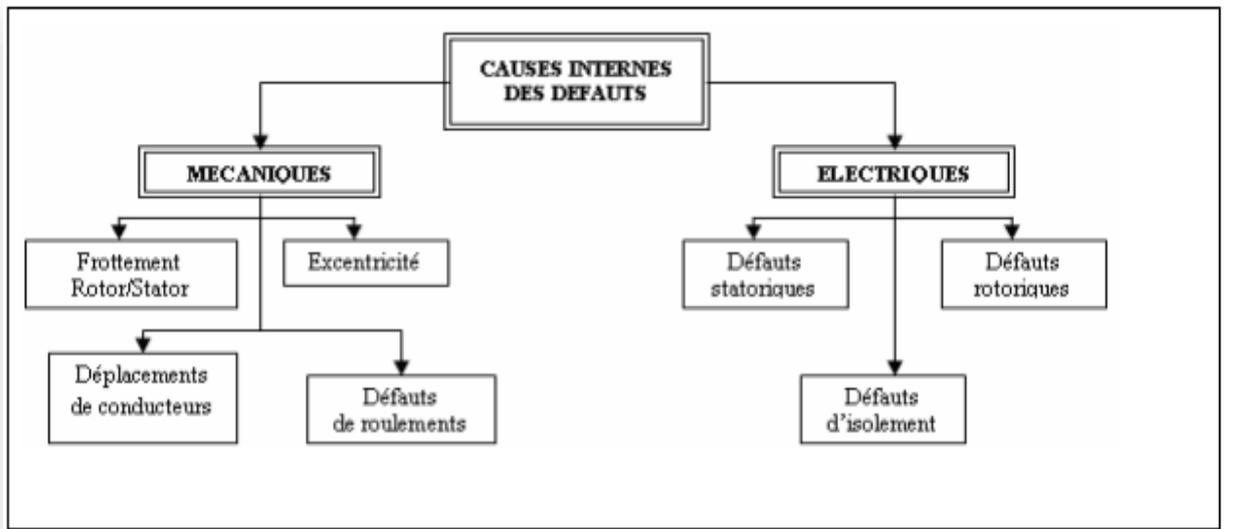


Fig. I.5 : Causes internes des défauts.

I.4.1 Défaillances d'ordre électrique

I.4.1.1 Défaillances des circuits électriques statoriques

I.4.1.1.1 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [BAB09].

I.4.1.1.2 Court-circuit entre spire et le neutre

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est

l'augmentation des courants. De plus le facteur de puissance diminue avec l'augmentation de nombre de spires en court-circuit. Ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée également par le défaut et affecte les autres par couplage magnétique [MAH17].

I.4.1.1.3 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère [OLI06].

I.4.1.2 Défaillances des circuits électriques rotorique

I.4.1.2.1 Ruptures de barres

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

effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît, rapidement, avec le nombre de barres cassées [MED12].

I.4.1.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [OLI06].

I.4.2 Défaillance d'ordre mécanique

I.4.2.1 Défaillance des roulements

Les défauts de roulements ont une incidence sur les vibrations du système, car les roulements sont des organes de liaisons et de rigidité. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact. L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure, ou sur un élément roulant). Cependant, les amplitudes des vibrations induites par les défauts ne sont pas d'un niveau très élevé. Elles sont noyées parmi les composantes plus énergétiques du système comme celles des engrenages ou celles liées à un déséquilibre ou un balourd.[MER16].

I.4.2.1.1 Cinématique de défaut de roulement et Fréquences caractéristiques

Chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisé par une fréquence fondamentale, qui peut être calculée à partir de la structure et des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation de l'arbre. En analyse vibratoire, il est donc possible d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier le type de défaut. Les expressions analytiques de

ces fréquences caractéristiques sont développées d'après et qui sont données les équations (I.1.) à (I.4) :

➤ **Défaut sur la bague extérieure**

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (I.1). Dans la littérature, pour une charge constante, on trouve que ce type de défaut engendre une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut, cette dernière est donnée par :

$$f_{BE} = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (I.1)$$

➤ **Défaut sur la bague intérieure**

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (I.2). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{BI} = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (I.2)$$

➤ **Défaut sur la cage**

La fréquence de caractéristiques d'un défaut de cage est donnée par l'équation (I.3) : Cette fréquence représente la fréquence de rotation de la cage.

$$f_{cage} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (I.3)$$

➤ **Défaut sur l'élément roulant**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la bague intérieure, est donnée par l'équation (I.4) :

$$f_{bille} = \frac{d_e f_r}{2d} \left(1 - \left(\frac{d \cos \beta}{d_e} \right)^2 \right) \quad (I.4)$$

Pour les roulements où le nombre de billes est compris entre 6 et 12, il a été montré que les fréquences vibratoires des défauts de la bague externe et interne peuvent être approchées à :

$$f_{BE} = 0.4nf_r.$$

$$f_{BI} = 0.6nf_r.$$

$$f_C = 0.4f_r.$$

Avec :

n : Nombre de bille.

d : Diamètre de billes [m].

d_e : Diamètre moyen du roulement [m].

β : Angle de contact [rad].

f_r : La vitesse de rotation de partie tournante(ω) [tr/s].

La durée de vie d'un roulement s'exprime par le nombre de tours ou le nombre d'heure de fonctionnement à vitesse constante du rotor qu'il supporte avant l'apparition de défauts sur les bagues ou sur l'élément roulant.

Les logiciels édités par les constructeurs de roulements permettent de déterminer rapidement et sans calcul les fréquences de défauts des roulements de la machine surveillée.

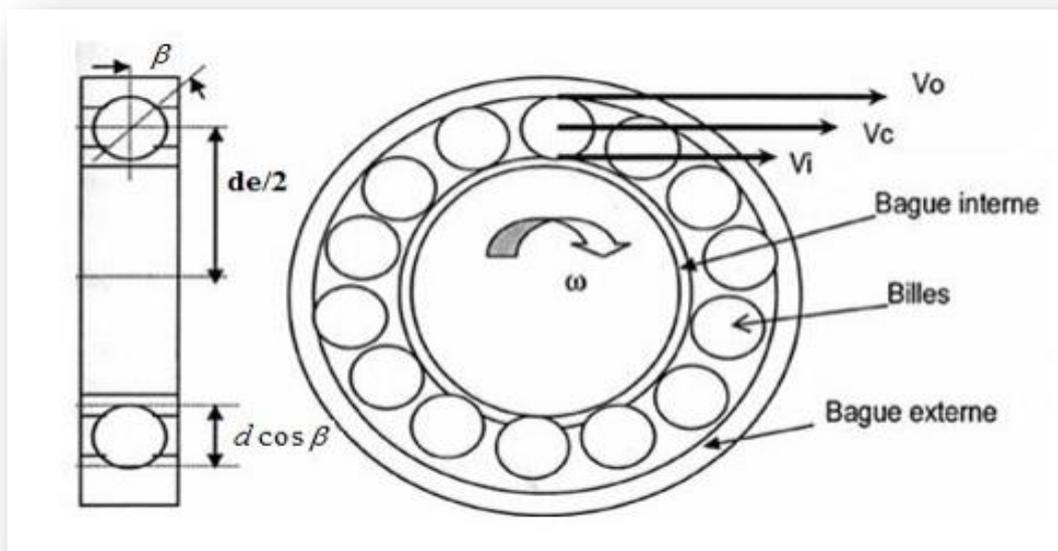


Fig. I.6 : Cinématique de défaut de roulement.

I.4.2.1.2 Avaries de roulement et remèdes

Si un roulement est manipulé correctement, la durée de vie avant fatigue de la matière peut être très longue. Si un problème apparaît prématurément, il peut provenir d'un mauvais choix de roulement, de manipulation ou de lubrification. Dans ce cas, il faut prendre en compte le type de machine sur laquelle est utilisé le roulement, sa position dans l'ensemble, les conditions de fonctionnement et l'environnement. Pour éviter que les problèmes se reproduisent, il faut avant

tout bien déterminer quelles sont leurs causes potentielles. Les principales avaries d'un roulement, leurs causes et les actions correctives applicables sont [MER16]:

I.4.2.1.2.1 Écaillage

La surface des pistes présente des lésions superficielles. Par la suite, l'écaillage des pistes se généralise.

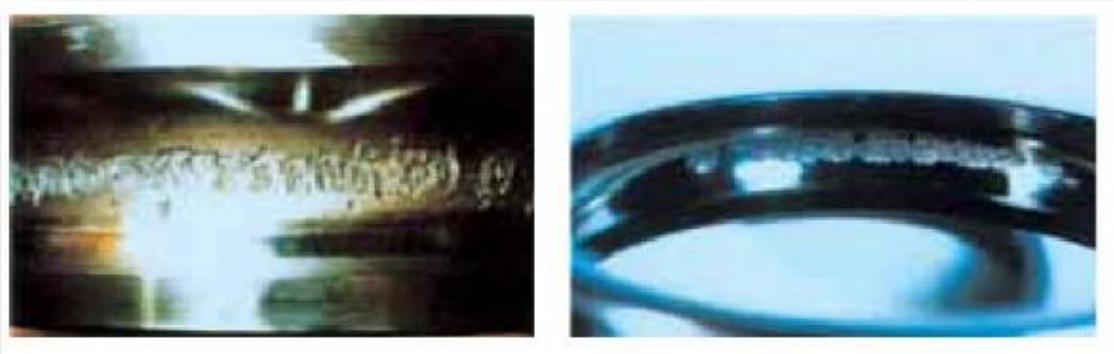


Fig. I.7 : L'écaillage des pistes

➤ **Cause :**

- Charges trop importantes, fatigue, mauvaise manipulation.
- Montage incorrect.
- Précision de fabrication du logement ou de l'arbre insuffisante.
- Jeu interne trop faible.
- Présence de particules étrangères.
- Corrosion.
- Mauvaise lubrification.
- Baisse de dureté suite à des températures trop importantes.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier la sélection du roulement.
- Vérifier le jeu interne du roulement.
- Vérifier la définition de l'arbre et du logement.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.
- Revoir les méthodes de montage.
- Vérifier les pièces annexes du montage.
- Revoir le système de lubrification.

I.4.2.1.2.2 Blocage

Le roulement chauffe de façon continue .la matière change de couleur. Le roulement peut se bloquer.



Fig. I.8 : Blocage

➤ **Causes :**

- Jeu interne trop faible (éventuellement par suite de l'ovalisation des portées de roulements).
- Lubrification insuffisante ou mal adaptée.
- Surcharge importante.
- Rouleaux inclinés ou de travers.
- Baisse de dureté suite à des températures trop importantes.

➤ **Action correctives :**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrifiant .
- Vérifier le jeu interne du roulement (à augmenter si nécessaire).
- Vérifier la valeur de désalignement.
- Vérifier les différentes conditions d'utilisation.
- Vérifier la méthode de montage des roulements.

I.4.2.1.2.3 Fissures et cassures

Écaillages ponctuels Présence de fissures et de cassures.

➤ **Causes :**

- Chocs excessifs.
- Mauvaise manipulation (coups trop violents portés sur le roulement, présence de particules métalliques de taille importante).

- Écaillage important au niveau des pistes.
- Ajustements trop serrés.
- Chanfreins d'entrée trop faibles.



Fig. I.9 : Fissure et cassure des bagues.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier le type de lubrifiant.
- Revoir l'ajustement et les matières.
- Vérifier conditions d'utilisation.
- Vérifier les conditions de manipulation lors du montage.

I.4.2.1.2.4 Détérioration de cage

Cage déformée, rupture de la cage, rupture de rivets.

➤ **Causes :**

- Moment excessif.
- Vitesse de rotation trop élevée ou survitesses ponctuelles.
- Lubrification insuffisante.
- Chocs avec corps étrangers.
- Vibrations excessives.
- Mauvaise manipulation lors du montage (désalignement).

➤ **Actions correctives**

- Vérifier le type de lubrification.
- Vérifier si le type de cage est adapté.
- Vérifier la rigidité de l'arbre et du logement.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.

- Vérifier les conditions de manipulation lors du Montage.



Fig. I.10 : Détérioration de cage.

I.4.2.1.2.5 Déformation du chemin de roulement

Usure ou déformation irrégulière le long des surfaces du chemin de roulement.

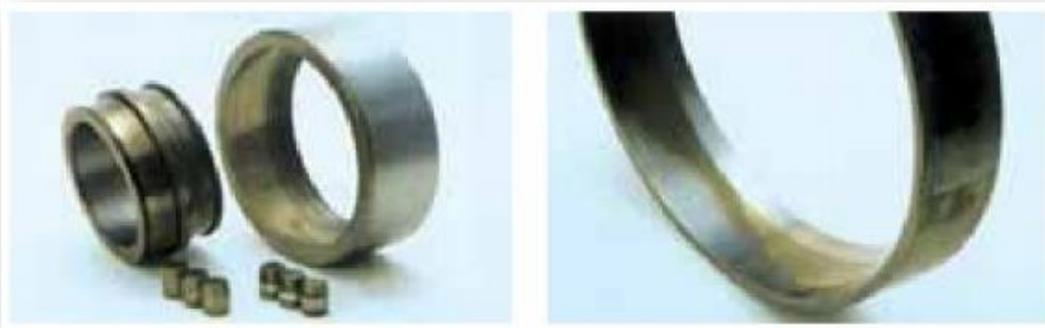


Fig. I.11 : Déformation du chemin de roulement.

- **Causes :**
 - Précision incorrecte de l'arbre ou du logement.
 - Mauvais montage.
 - Rigidité de l'arbre ou du logement insuffisante.
 - Vibration de l'arbre causée par un jeu interne trop grand.
- **Actions correctives :**
 - Vérifier le jeu interne du roulement.
 - Vérifier la tolérance de l'arbre et du logement.
 - Vérifier la rigidité de l'arbre et du logement.

I.4.2.1.2.6 Usure et grippage

Les pistes sont rugueuses et présentent des empreintes superficielles. Les épaulements de guidage ainsi que les extrémités des rouleaux deviennent rugueux.

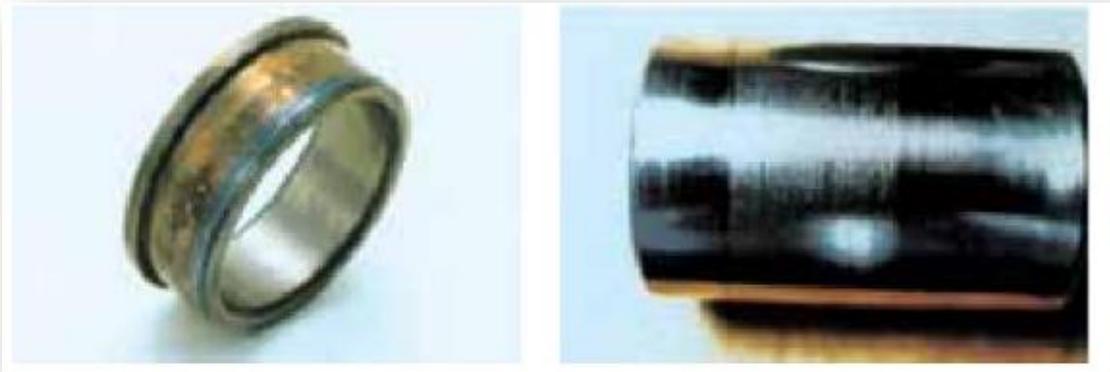


Fig. I.12 : Usure et grippage.

➤ **Causes :**

- Lubrification insuffisante.
- Présence de fines particules étrangères.
- Désalignement du logement par rapport à l'arbre.
- Rugosité de surface.
- Glissement des éléments roulants.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le principe de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la valeur de la pré-charge.
- Vérifier les conditions d'utilisation.
- Vérifier les méthodes et manipulations et de montage du roulement.

I.4.2.1.2.7 Corrosion

Trace de corrosion sur le roulement, coloration rougeâtre, corrosion éventuelle au pas des éléments roulants.

➤ **Causes :**

- Stockage du roulement inadapté.
- Emballage endommagé ou inefficace.
- Produit anticorrosion en quantité insuffisante.

- Pénétration d'eau, d'acide, etc.
- Manipulation à main nue.



Fig. I.13 : Corrosion des pistes.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier les conditions de stockage.
- Vérifier l'absence d'eau dans le lubrifiant.
- Améliorer l'étanchéité.
- Manipuler le roulement avec soin.

I.4.2.1.2.8 Corrosion de contact

Les surfaces de contact sont recouvertes de fines particules colorées provenant de micro-vibrations en fonctionnement. Traces de brinelling sur les pistes provenant de vibrations lorsque le roulement est à l'arrêt.

➤ **Causes :**

- Ajustements inadéquats.
- Micromouvements oscillants.
- Lubrifiant inadapté.
- Charges non constantes.
- Vibrations et oscillations avec roulement à l'arrêt.



Fig. I.14 : Corrosion de contact.

➤ **Actions correctives :**

- Sélectionner un roulement mieux adapté.
- Vérifier le type de lubrification.
- Choisir des ajustements adaptés.
- Transporter séparément la bague intérieure et extérieure.

I.4.2.1.2.9 Usure

Usure des pistes, modification de la précision géométrique, présence de rayures, rodages des différents éléments roulants.



Fig. I.15 : Usure (modification de la précision géométrique).

➤ **Causes :**

- Présence de particules étrangères dans le lubrifiant.
- Quantité de lubrifiant insuffisante.
- Rouleaux déformés.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le principe de lubrification.

- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la valeur de désalignement.

I.4.2.1.2.10 Passage de courants électriques à travers le roulement

Présence de cratères ainsi que de cannelures sur les pistes du roulement.



Fig. I.16 : Effet de passage du courant sur les roulements.

- **Causes :**
 - Fuite de courant électrique passant au travers du roulement.
- **Actions correctives :**
 - Vérifier ou établir une mise à la terre de l'ensemble de la machine.
 - Prévoir une isolation électrique du roulement.

I.4.2.1.2.11 Rayures et empreintes

Éraflures provoquées lors du montage, rayures provoquées par des corps étrangers très durs, enfoncement de la matière dû à une manipulation inadaptée.

- **Causes :**
 - Présence de corps étrangers dans le roulement.
 - Efforts de montage trop violent suite à un désalignement important.
- **Actions correctives :**
 - Montage minutieux à effectuer.
 - Améliorer l'étanchéité (pour éviter l'entrée de corps étrangers).
 - Améliorer la propreté du poste de travail et des pièces annexes.



Fig. I.17 : Rayures et empreintes

I.4.2.1.2.12 Rotation de bagues

État de surface du logement d'aspect poli ou coloration. Traces de frottement visible.



Fig. I.18 : Rotation de bagues.

➤ **Causes :**

- Ajustements insuffisants.
- Manchon de serrage pas assez serré.
- Variations de température importantes provoquant des dilatations inégales.
- Charges très importantes.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier les ajustements.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.
- Vérifier les précisions des portées de roulement.

I.4.2.1.2.13 Taches et décoloration

Disparition du lustre des surfaces de chemin de roulement. Surfaces mates, rugueuses, et/ou trouées, couvertes de petits bossés.

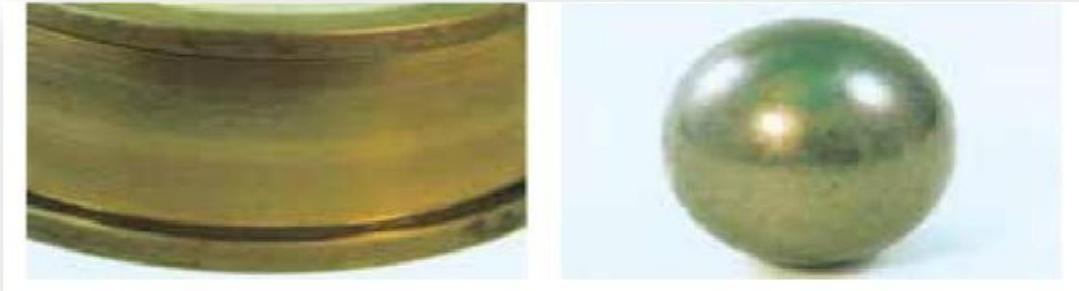


Fig. I.19 : Taches et décoloration

➤ **Causes :**

- Entrée de particules étrangères.
- Lubrification insuffisante.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la pureté de l'huile lubrifiante (propreté du filtre, etc.).

I.4.2.1.2.14 Écaillage en peau d'organe (peeling)

Petites traces d'écaillage (environ $10\mu\text{m}$), présence de nombreuses rayures très fines.



Fig. I.20 : Écaillage en peau d'organe (peeling)

➤ **Causes :**

- Entrée de particules étrangères.
- Lubrification insuffisante.

➤ **Actions correctives :**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Améliorer les conditions de manipulation.

I.4.2.2 Défauts d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer : par des défauts d'excentricité statique, dynamique (Fig. I.21) ou mixte :

- ✓ Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, dont la cause la plus fréquente est un défaut de centrage des asques.
- ✓ Le défaut d'excentricité dynamique peut être cause par une déformation du cylindre rotorique ou la détérioration des roulements à billes.
- ✓ L'excentricité mixte, la plus fréquente, est la combinaison d'une excentricité statique et d'une excentricité dynamique.

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permettent de détecter ces types de défaillance. [CHAO.CHET16].



Fig. I.21 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique.

Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes.

I.4.2.3 Défaillances des flasques

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants des courants absorbé par la machine [AZO11].

I.4.2.4 Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [DID04].

I.5 Étude statistique des défauts

Des études statistiques ont été effectuées par EPRI (Electrical Power Research Institute) et IEEE-IGA sur les pannes des machines asynchrones (Fig. I.22) Bien que chacune de ces deux études concerne des machines de puissances variées et opérant dans des conditions différentes d'utilisation, les tendances de répartition sont assez cohérentes. Dans les deux cas d'étude, les résultats ont montré que les taux le plus élevés sont ceux des roulements des moteurs, suivi des défauts statoriques ensuite les défauts rotoriques. [LAA17].

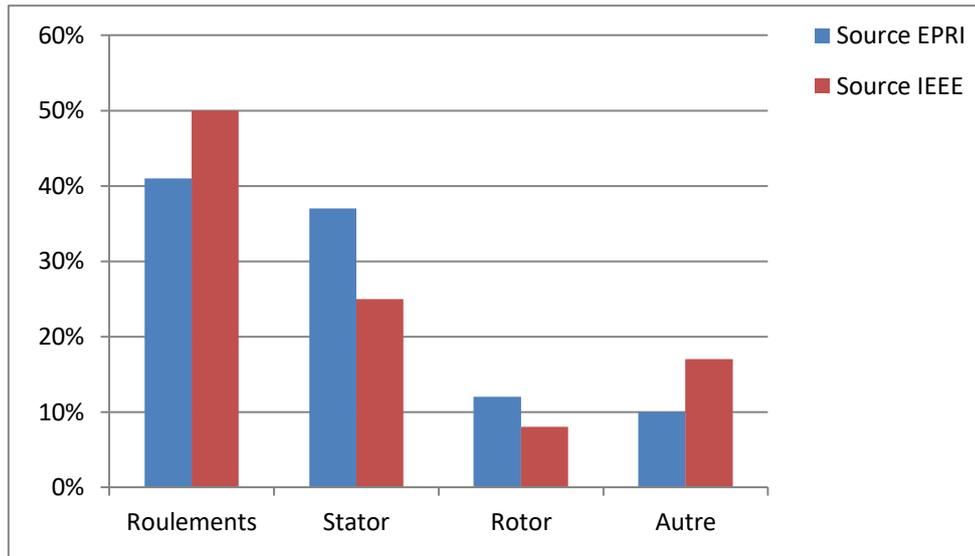


Fig I.22 : Répartition du taux de panne dans les machines asynchrones

Une récente étude statistique faite par Bonnet sur les machines de grande puissance (de 100 kW à 1MW) a aboutit aux résultats ci-dessous (Fig. I.23)

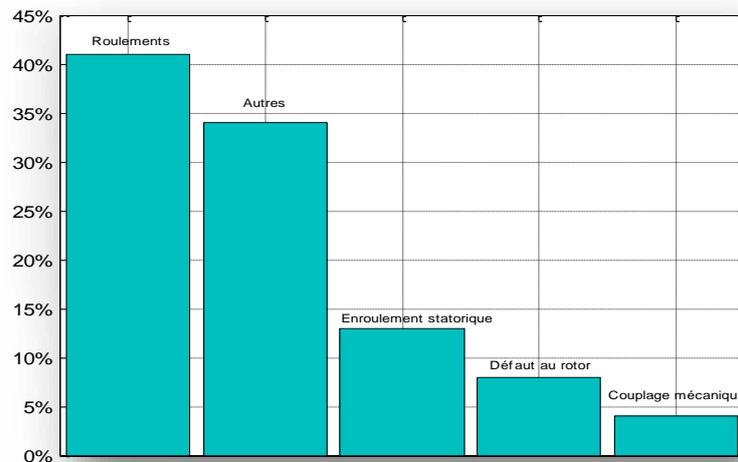


Fig. I.23 : Répartition des pannes pour les machines de fortes puissances.

D'autre part une étude similaire mais sur des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW), effectuée par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels a donné les résultats qui sont illustrées à la (Fig. I.24) .

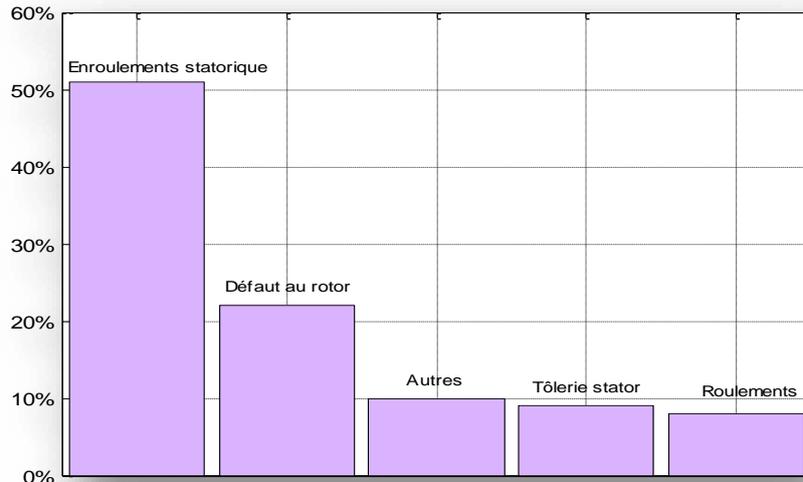


Fig. I.24: Répartition des pannes de moyenne puissance

On remarque bien que pour les machines de forte puissance, le défaut majeur est celui des roulements. Ceci est dû aux contraintes mécaniques qui sont plus importantes sur ce type de machine, et qui demande une maintenance mécanique accrue. Pour les machines de faible et de moyenne puissance, les taux les plus élevés sont réservés pour les défauts au niveau du stator et du rotor.

I.6 Les signaux utilisés pour le diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à cage

La recherche des signatures ou indicateurs des défauts a pour but de caractériser le fonctionnement du système en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts afin d'assurer une bonne isolation des différents défauts, et ce dans le but d'arriver à une prise de décision adéquate vis-à-vis du résultat du diagnostic.

I.6.1 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites :

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées[SAD15] .

I.6.2 Diagnostic par analyse du courant statorique :

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter, en utilisant la MCSA "Motor Current Signature Analysis", aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par:

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant.[SAH10]

I.6.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine.[CHET.CHAO16]

I.6.4 Analyses vibratoires de la machine:

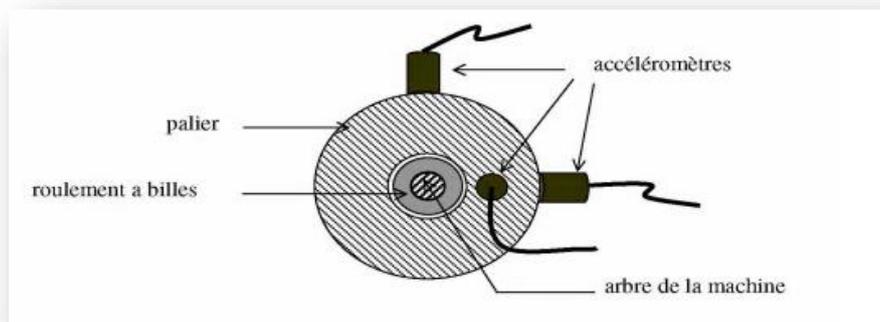


Fig. I.25 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients:

- Problème d'accessibilité,

- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut. De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux [KHA09].

I.6.5 Diagnostic par l'analyse de l'enveloppe du courant statorique :

Une des applications de la transformée de Hilbert (TH) est constituée par la démodulation des signaux modulés en amplitude et / ou en phase. En effet, le module du signal analytique obtenu à partir de la TH de courant statorique définit l'enveloppe du courant statorique. En exploitant l'information contenue dans cette grandeur. L'analyse de cette dernière permet d'améliorer le diagnostic de la machine

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances qui peuvent affecter les différentes parties de la machine asynchrone. Pour mieux comprendre les phénomènes affectés par les défauts de roulement, une brève étude sera réalisée dans le chapitre qui suit en se basant sur l'analyse du contenu spectral de vibration de la machine asynchrone à cage .

Chapitre II

II.1 Introduction

Des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des machines considérées. Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux roulements représentent entre 40 et 50% des pannes totales, précédant les défauts statoriques et rotoriques. Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic de la machine asynchrone sur les roulements à billes.

Nous allons tout d'abord présenter la relation entre les défauts de roulements et les vibrations. Nous verrons ensuite les signatures vibratoires des principaux défauts. Nous présentons alors quelques techniques pour analyser et traiter les signaux vibratoires en vue de la détection des défauts de roulements.

II.2 Relation entre les défauts de roulements et les vibrations

Lorsqu'un défaut localisé apparaît en un point d'un des éléments du roulement, cela entraîne une vibration à la fréquence caractéristique associée à l'élément en défaut. En effet, si un défaut se situe sur le chemin de roulement d'une des bagues ou sur une bille, il se produit un choc mécanique à chaque fois que le défaut est confondu avec un point de contact bille/bague. Ces chocs répétés se traduisent alors par des vibrations. Par ailleurs, les vibrations faisant intervenir les fréquences des modes propres de la bague externe seront qualifiées de « haute-fréquence ». Lors de l'apparition de défauts, le signal vibratoire peut être modélisé par un train d'impulsions à la fréquence correspondant à la localisation du défaut. Les modes propres peuvent servir de résonateurs naturels permettant d'amplifier les effets vibratoires des défauts [Mev92].

De manière simplifiée, cette vibration peut être modélisée par un signal périodique dont la période fait intervenir la période caractéristique de l'élément en défaut. On pourra alors parler de fréquence de défaut. Selon la localisation du défaut ou sa sévérité, les vibrations font intervenir des multiples de la fréquence caractéristique du défaut créant ainsi un peigne d'harmoniques. Mathématiquement, le signal vibratoire est modélisé selon l'équation (II.1) par :

$$x(t) = \left[A_c \cos(2\pi f_m t) e^{-\frac{t}{\tau}} u(t) \right] * III_{\frac{1}{f_{def}}}(t) \quad (\text{II.1})$$

$$III_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \delta(t - kT) \quad (\text{II.2})$$

avec:

A_c : l'amplitude du signal vibratoire;

f_m : Fréquences de mode propre;

f_{def} : Fréquence caractéristique de défaut;

$u(t)$: l'échelon unitaire.

III : est le peigne de Dirac défini en l'équation (II.2)i

En utilisant les paramètres suivants : $A_c = 2.5$, $f_{def} = 107$ Hz, $f_m = 2795$ Hz, $\tau = 0.0015$, le modèle de signal vibratoire est alors simulé en (Fig. II.1)

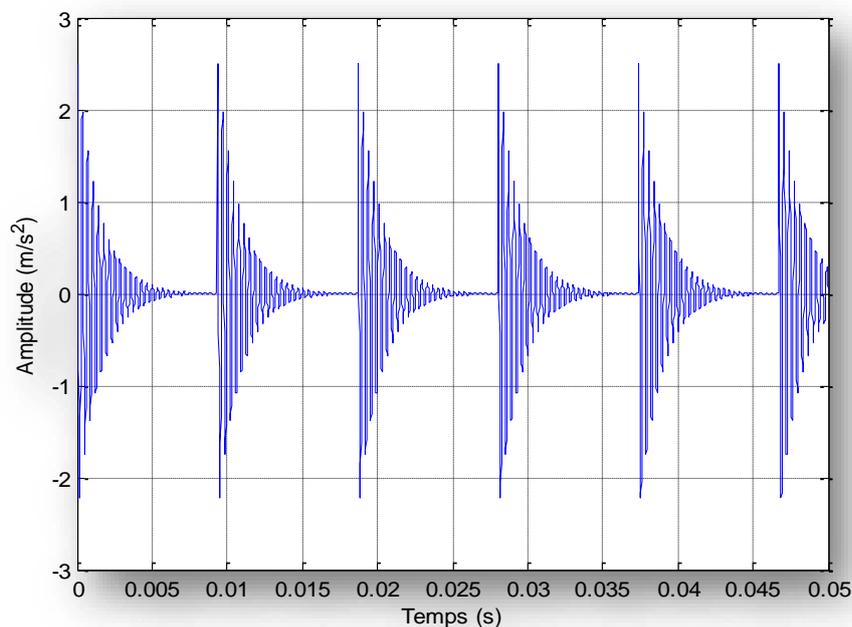


Fig. II.1 : Signal vibratoire simulé avec excitation d'un mode propre de la bague externe.

II.3 Signatures vibratoires des principaux défauts

II.3.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe :

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire spectrale un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (II.3), espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (Fig. II.2).

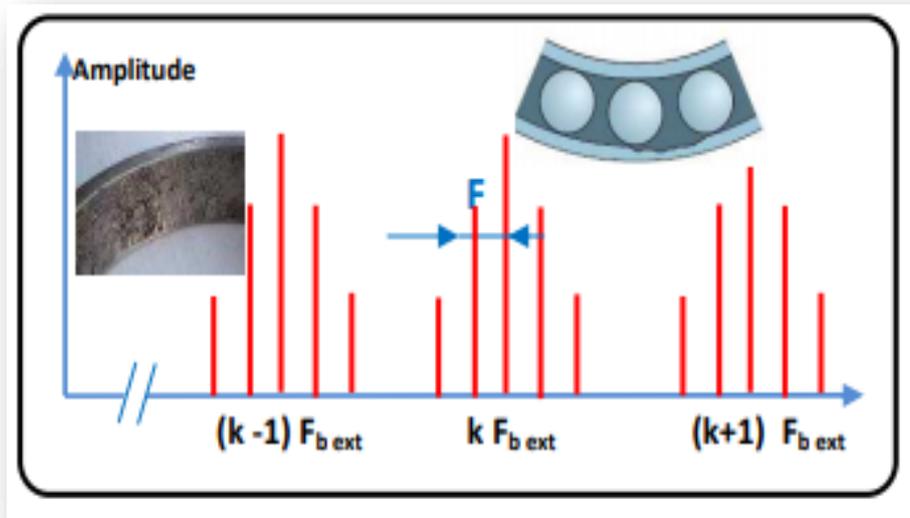


Fig. II.2 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure.

II.3.2 Défaut de type écaillage affectant la bague interne :

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire spectrale un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (I.2), espacées de la fréquence de rotation (Fig. II.3).

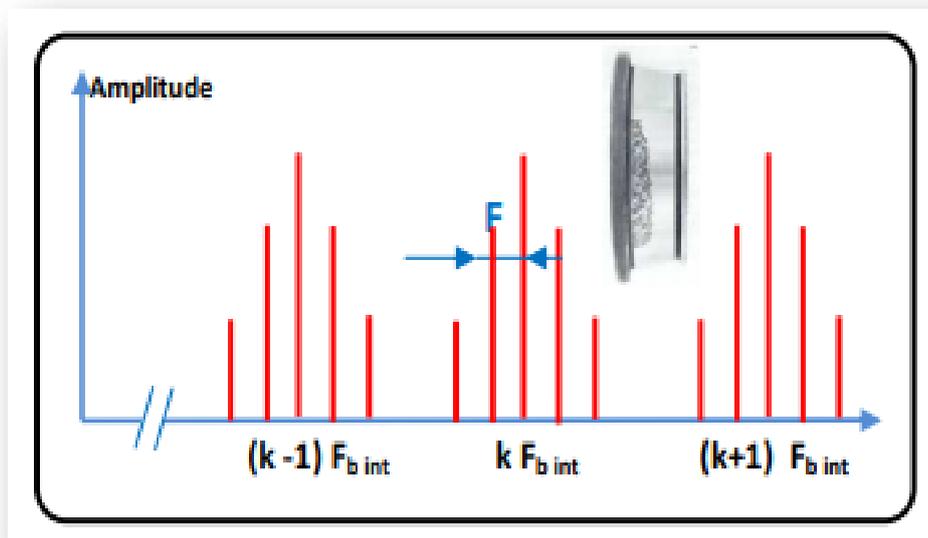


Fig. II.3 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.

II.3.3 Défaut de type écaillage sur un élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (I.4), espacées de la fréquence de la cage (Fig. II.4).

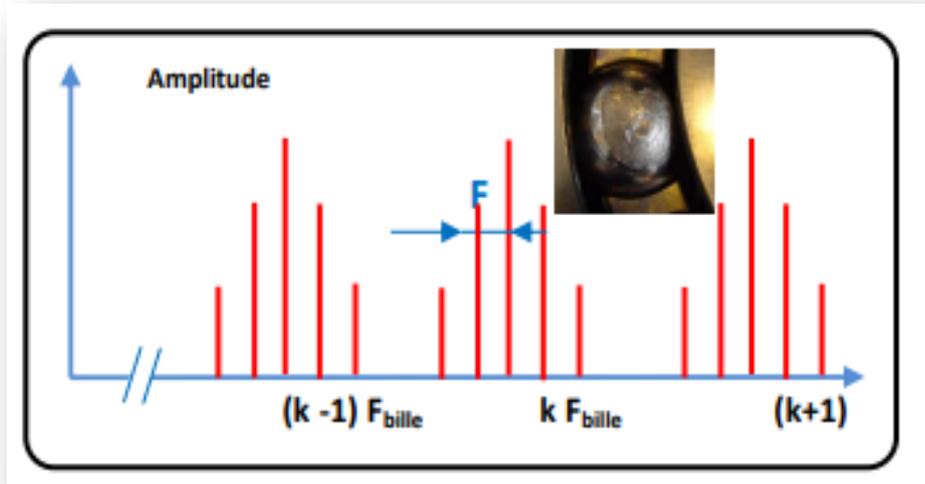


Fig. II.4 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.

II.3.4 Défauts de type déversement de bague :

Le défaut de type déversement de bague extérieure (Fig. II.5) s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible (Fig. II.6).

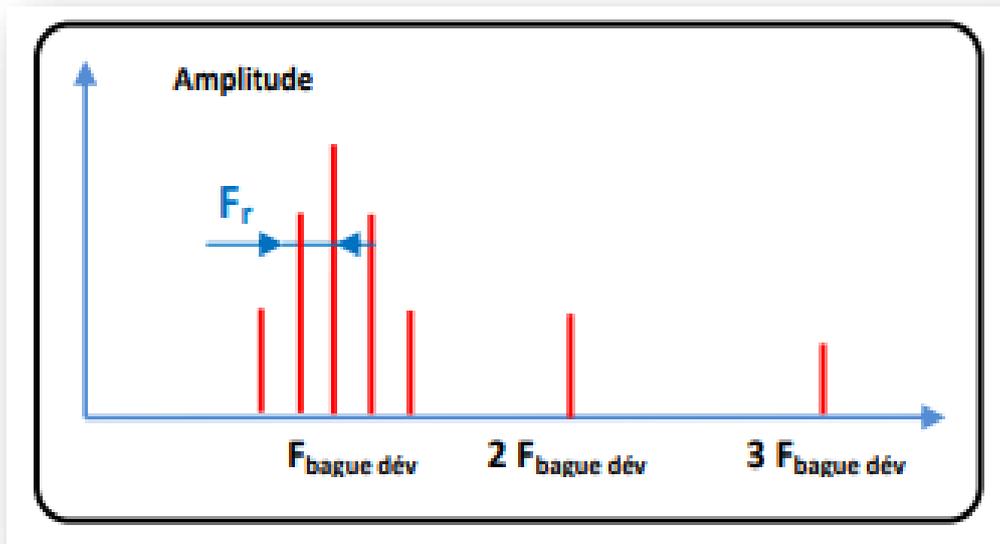


Fig. II.5 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague.

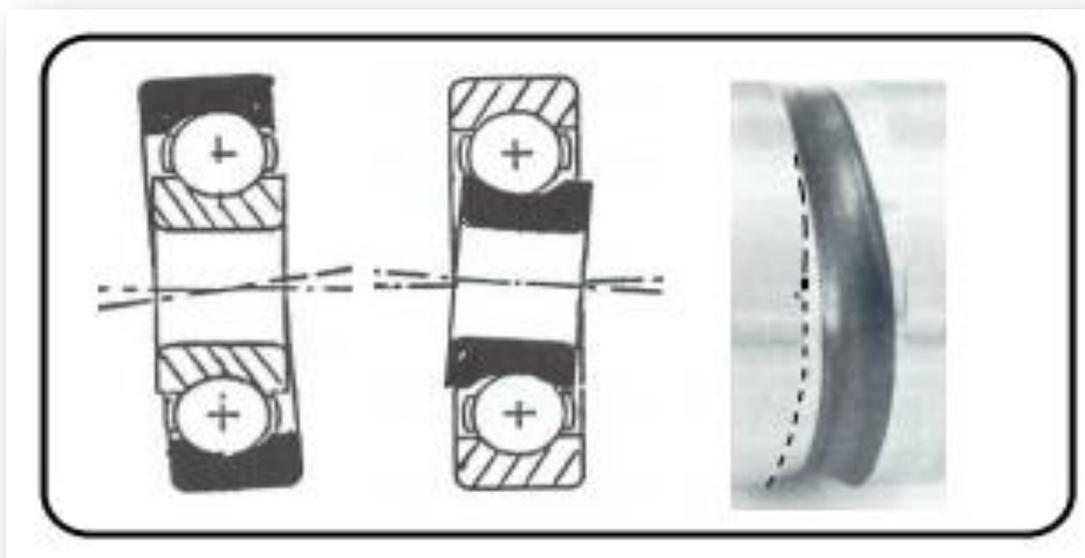


Fig. II.6 : Défaut de déversement des bagues d'un roulement.

II.3.5 Remarque :

Il ne faut pas confondre défaut de type écaillage et défaut de type déversement de bague. Le défaut de type écaillage est un défaut de type choc dont le spectre présente:

- ✓ de nombreuses composantes harmoniques jusqu'en hautes fréquences,
- ✓ les harmoniques d'ordre n généralement d'amplitude plus grande que la composante fondamentale.

Le défaut de type déversement de bague est un défaut de type vibration sinusoïdale dont le

spectre présente:

- ✓ peu de composantes harmoniques, la composante fondamentale de la fréquence du défaut, nettement prépondérante par rapport à ses quelques harmoniques.

II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements

II.4.1 Principe de la mesure :

Pour mesurer les effets des vibrations engendrées par le fonctionnement ou les dysfonctionnements d'un roulement à billes, il faut placer des capteurs externes au roulement. La méthode la plus couramment utilisée est de placer sur le carter de la machine, auprès des roulements à surveiller, des accéléromètres mesurant les accélérations subies. Notons que le positionnement des capteurs revêt un caractère essentiel pour une bonne détection des défauts. Les accéléromètres sont souvent de nature piézo-électrique : une masse est utilisée pour convertir une accélération en effort qui, lui même, est converti en charge électrique par un cristal piézo-électrique. Cette charge est ensuite intégrée par un conditionneur pour donner une tension représentative de l'accélération mécanique. De plus amples précisions sont disponibles dans [Big95]. Les accéléromètres piézo-électriques sont de nature très sensible, ce qui permet une mesure efficace. Cependant, ils nécessitent un étalonnage très précis. Il en va de même pour les conditionneurs.

II.4.2 Indicateurs vibratoires spécifiques scalaires aux roulements :

La dégradation localisée d'un roulement se manifeste par un choc dur, périodique, apparaissant à la fréquence du contact situé au niveau de la détérioration. Les vibrations induites sont des vibrations de type impulsionnel. L'interprétation des spectres de ces défauts sont parfois difficiles. Des méthodes spécifiques permettant d'obtenir, par des traitements particuliers, des valeurs globales significatives de la dégradation de roulement. Les indicateurs utilisant ces propriétés sont principalement le facteur de crête et le Kurtosis.

II.4.2.1 Facteur de crête FC:

C'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace de l'accélération :

$$FC = \frac{\text{Valeur de crête}}{\text{Valeur efficace}(vib)} = \frac{\max(|vib(n)|)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N vib(n)^2}} \quad (\text{II.3})$$

avec :

vib: est le signal vibration.

Une vibration de type sinusoïdale aura un facteur de crête voisin de 0,707 alors qu'une vibration de type impulsif aura un facteur de crête beaucoup plus important. Un roulement neuf ou en bon état génère une vibration de faible amplitude, aussi bien en valeur crête qu'en valeur efficace (Fig. II.7) Le facteur de crête reste donc faible. Un défaut localisé génère une vibration d'amplitude crête forte et amplitude efficace faible, donc un facteur de crête important. Pour les défauts généralisés, les vibrations générées présentent des amplitudes crête et efficace fortes, donc, un facteur de crête faible. Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter environ les mêmes valeurs à l'état neuf et en fin de vie de roulement.

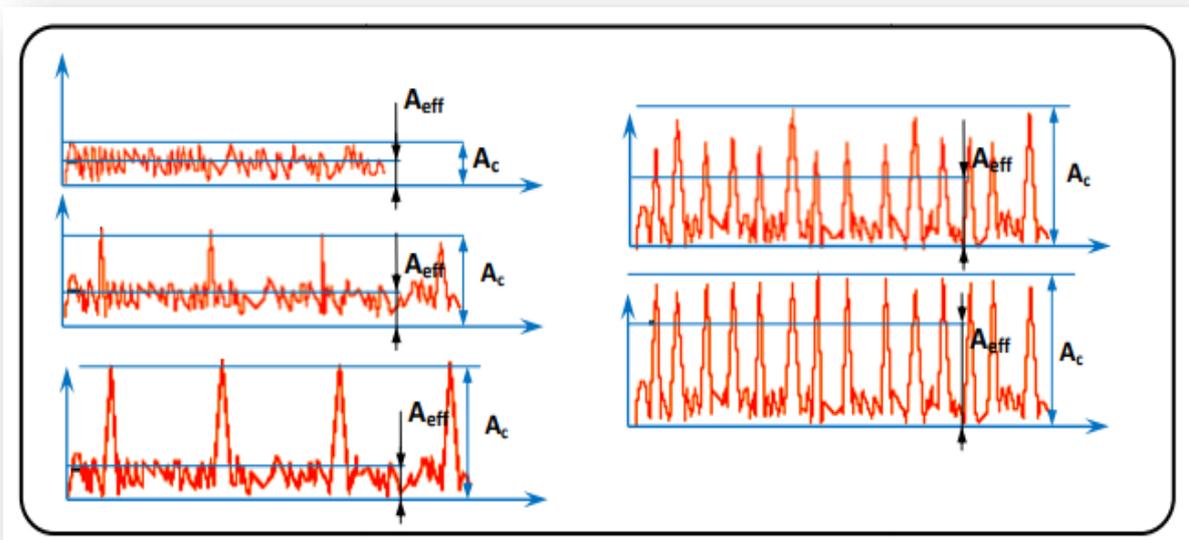


Fig. II.7 : Evolution du facteur de crête aux différents stades de dégradation du roulement.

II.4.2.2 : Facteur de défaut de roulement FD :

Le facteur de défaut roulement est donné par l'équation ci-dessous:

$$FD = a \cdot FC + b \cdot V_{eff}(\text{Vib}) \quad (\text{II.4})$$

Combinant les indicateurs Facteur de Crête et Valeur efficace, il présente les avantages suivants :

- ✓ Facteur absolu.
- ✓ Détection précoce.
- ✓ Peu sensible aux conditions de fonctionnement.
- ✓ Valeur croissante sur les 3 phases de la dégradation.
- ✓ Utilisation simple et adaptée au diagnostic automatique.

L'augmentation du niveau du Facteur de Défaut peut être liée à un défaut de graissage du roulement. En l'absence d'historique d'évolution, on procédera à un test de graissage du

roulement, le Facteur de Défaut chute généralement de manière importante de façon instantanée. Si le niveau du F.D reste stable à cette valeur dans les heures qui suivent l'opération, il s'agit sans doute d'un problème de graissage. Dans le cas contraire, il s'agit vraisemblablement d'une usure du roulement.

II.4.2.3 Le kurtosis :

Le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution. Il s'agit d'un traitement statistique du signal temporel des vibrations, se basant sur la courbe de densité de probabilités de la répartition des niveaux vibratoires d'accélération. Un roulement en bon état engendre un signal vibratoire dont la distribution de l'amplitude est Gaussienne avec un Kurtosis voisin de 3. Pour un roulement dégradé, présentant des écaillages des indentations ou des jeux importants, l'allure de la distribution de l'amplitude du signal est modifiée et le Kurtosis K est supérieur ou égal à 4.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{vib}(n) - \langle n \rangle)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{vib}(n) - \langle n \rangle)^2 \right]^2} \quad (\text{II.5})$$

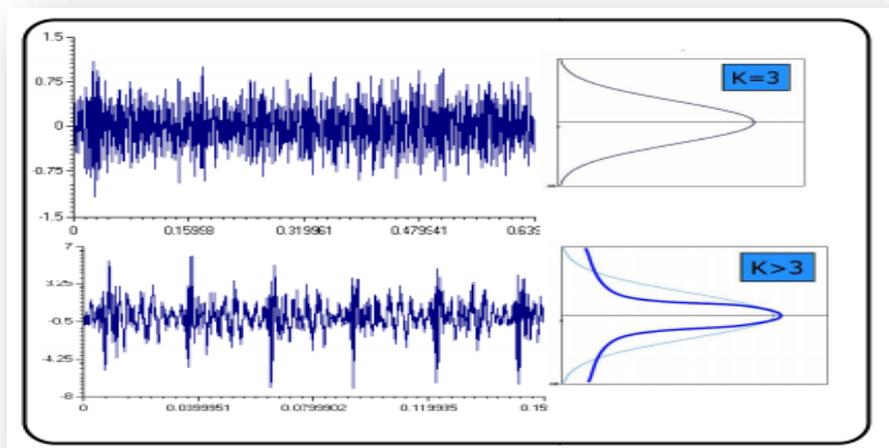


Fig. II.8 : Evolution du Kurtosis aux différents stades de dégradation du roulement.

Le Kurtosis caractérise l'écrasement de la courbe de densité de probabilité du signal enregistré. Il est à noter que dans le cas d'une forte détérioration du roulement, l'allure de la distribution de l'amplitude redevient gaussienne avec K voisin de 3 mais, aussi une augmentation importante de l'amplitude efficace. Comme pour le facteur de crête, il y a lieu de tenir compte simultanément de l'évolution des deux critères : Kurtosis et amplitude efficace.

II.4.2.4 Le facteur k :

Le facteur K, l'équation (II.4) doit augmenter avec l'usure du roulement. On pourra retenir que, dans tous les cas, sa valeur est multipliée par 10 entre la mesure effectuée pour le roulement sain et celle pour le roulement dégradé

$$k = \max(|\text{vib}(n)|) \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{vib}(n)^2}. \quad (\text{II.6})$$

II.4.3 L'analyse spectrale :

La première méthode à investiguer pour détecter des harmoniques dans un signal est l'analyse spectrale. Mathématiquement, la transformée de Fourier (TF) est définie comme un produit scalaire. Considérons un signal réel déterministe $x(t)$ à énergie finie. La transformée de Fourier du signal $X(f)$ est définie par l'équation (II.5), son calcul pour un signal discret $x(k)$ de longueur N étant donné en (II.6). L'analyse spectrale est largement utilisée dans le cadre de l'analyse vibratoire des roulements à billes pour détecter la présence éventuelle de défauts. De manière générale, le module de la transformée de Fourier est analysé. Dans le cadre du diagnostic des machines électriques, certains travaux analysent la phase de la transformée de Fourier mais son interprétation se révèle délicate.

$$TF_F\{x(t)\} = X(f) = \langle x(t), e^{2\pi jft} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi jft} dt. \quad (\text{II.7})$$

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{2\pi jmk}{N}}. \quad (\text{II.8})$$

II.4.4 La transformée de Hilbert et le spectre d'enveloppe :

La transformée de Hilbert permet d'associer un signal complexe, appelé signal analytique, à un signal réel. La transformée de Fourier $Z(f)$ du signal analytique $z(t)$ s'exprime selon l'équation (II.7), où $H(f)$ est la fonction de transfert du filtre de Hilbert. La réponse impulsionnelle du filtre de Hilbert est $h(t) = 1/\pi.t$. Le filtrage d'un signal $x(t)$ conduit à la composante imaginaire $y(t)$ du signal analytique

$$Z(f) = X(f) + jY(f) = X(f) + jH(f)X(f) \text{ avec : } H(f) = -j \text{ sign}(f). \quad (\text{II.9})$$

avec :

$$\text{sign}(f) = \begin{cases} +1 & \text{si } f > 0 \\ 0 & \text{si } f = 0 \\ -1 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

La transformée de Fourier du signal analytique s'exprime alors directement à partir de celle du signal réel (II.9). La TF du signal analytique est alors nulle pour les fréquences négatives.

$$Z(f) = \begin{cases} 2X(f) & \text{si } f > 0 \\ X(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Dans le cas des signaux modulés, la transformée de Hilbert permet d'obtenir l'amplitude du signal analytique, appelée enveloppe complexe, est représentative des modulations d'amplitude, au sens large, du signal réel. Il s'agit donc l'a d'une technique de démodulation Ainsi, une analyse spectrale de l'enveloppe complexe fournit des informations sur les modulations d'amplitude des signaux [CHE96].

II.4.5 La transformée en ondelettes et les paquets d'ondelettes :

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement du signal Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique Les ondelettes ont de nombreuses applications comme la détection de singularité dans un signal applicable au diagnostic des roulements à billes la compression de données ou encore le débruitage [KHA 12].

II.5 Conclusion

Compte tenu des caractéristiques vibratoires des roulements à billes en présence défauts, nous avons présenté les signatures vibratoires associées aux différents défauts de type écaillage un panel de méthodes de traitement du signal mises. Nous avons ensuite présenté les principaux indicateurs scalaires basés sur une analyse des signaux vibratoires temporels. Enfin, nous exposons quelques méthodes de traitement du signal avancées.

Chapitre III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons montrer sur différents cas de défauts de roulements, comment se fait la détection des défaillances à l'aide des approches utilisées. Dans un premier temps, nous avons utilisé les données disponibles sur site [BDC], où nous avons testé les performances des indicateurs statistiques choisis. Les limitations apportées par l'approche temporelle seront surmonté en utilisant l'approche fréquentielle. Dans un second temps, nous avons exploité les résultats obtenues au sein de laboratoire LGEB.

III.2 Description du banc d'essai

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein de Laboratoire de Génie Électrique de Biskra (LGEB). Le moteur triphasé asynchrone à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur tétra polaire de 3 kW fabriqué par *Azazga* dont les caractéristiques principales sont données dans l'annexe . Ce dernier entraine une machine triphasée asynchrone à rotor bobiné qui est utilisée comme charge, donc comme générateur qui alimente une charge résistive variable. la mesure des signaux est réalisée par la carte d'acquisition de type NI (National Instrument) piloté par LabView avec une fréquence d'échantillonnage de $f_e=12800$ Hz (Fig. III.1).

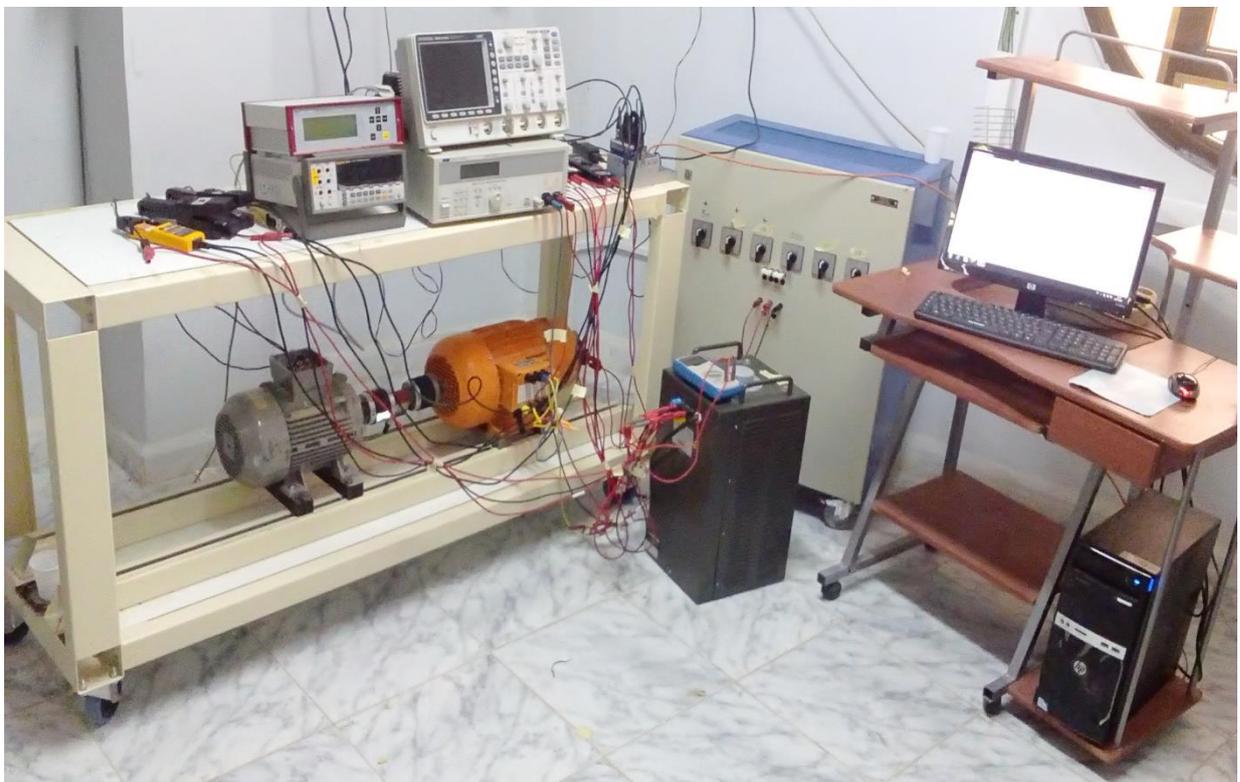


Fig. III.1 : Le banc d'essai expérimental

III.3 Analyse du signal vibratoire

L'analyse d'un signal vibratoire nous permet de détecter la présence d'un défaut, soit dans le domaine temporel ou bien dans le domaine fréquentiel où sa signature est visible.

III.3.1 Analyse dans le domaine temporel

Dans l'analyse des vibrations, il est possible de visualiser le signal en forme d'onde dans le temps et par conséquent la fréquence et l'amplitude peuvent être déterminées. En pratique, dans le cas d'une machine complexe, l'utilisation de la méthode de la forme d'onde de temps est très difficile et par conséquent cette méthode ne permet pas de déterminer les paramètres du signal (Fig. III.2).

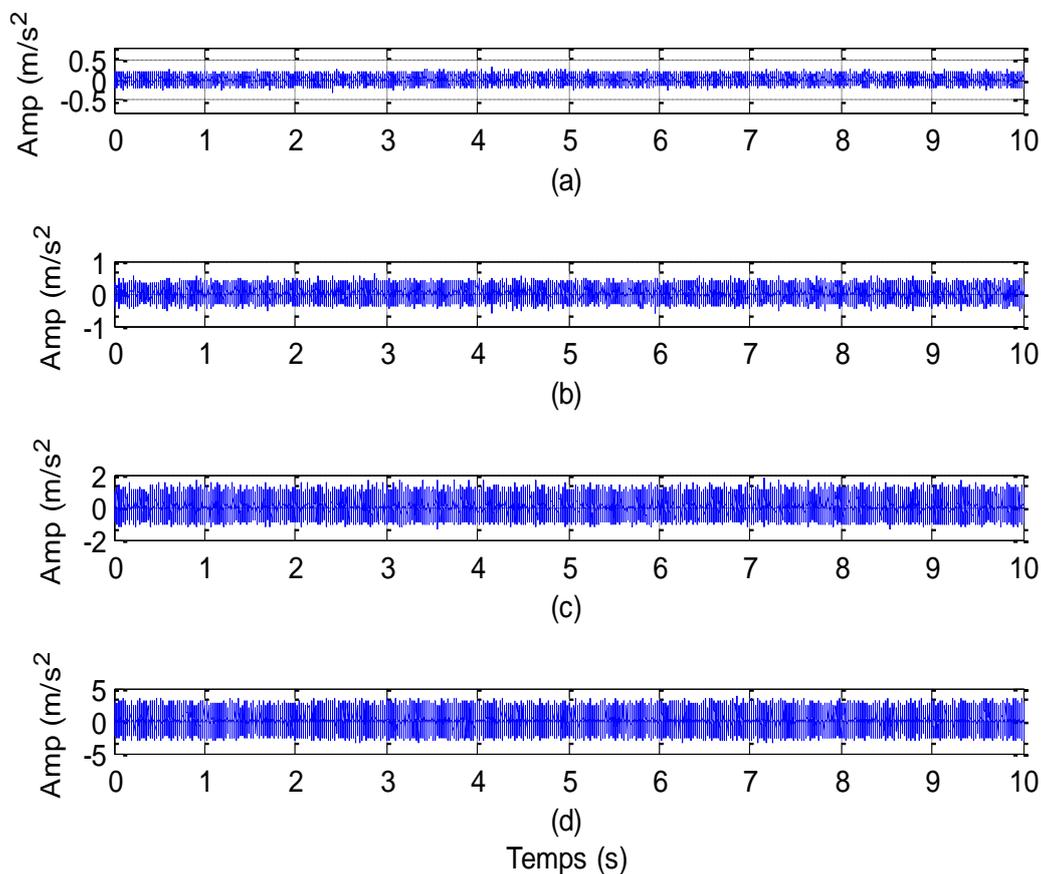


Fig. III.2 : Signaux vibratoires: **(a)** roulement sain, **(b)** roulement avec défaut de balle, **(c)** roulement avec défaut de cage interne, **(d)** roulement avec défaut de cage externe.

Il existe plusieurs façons pour obtenir l'information pour la détection des défauts, à partir des signaux temporelles. En effet, l'approche temporelle se résume aux indicateurs

statistiques. A partir des mesures vibratoires, des traitements sont mis en place pour d'écouter les défauts de roulements, les plus simples étant la construction d'indicateurs scalaires. Dans ce cas, la mesure temporelle est traitée directement. Nous allons présenter trois des indicateurs les plus courants : le facteur crête (FC), le facteur K et le kurtosis (KU).

✓ . Les caractéristiques du roulement

Le type de roulement **Drive end bearing**: 6205-2RS [BDC].

Tableau III.1 : Caractéristique de roulement (DE).

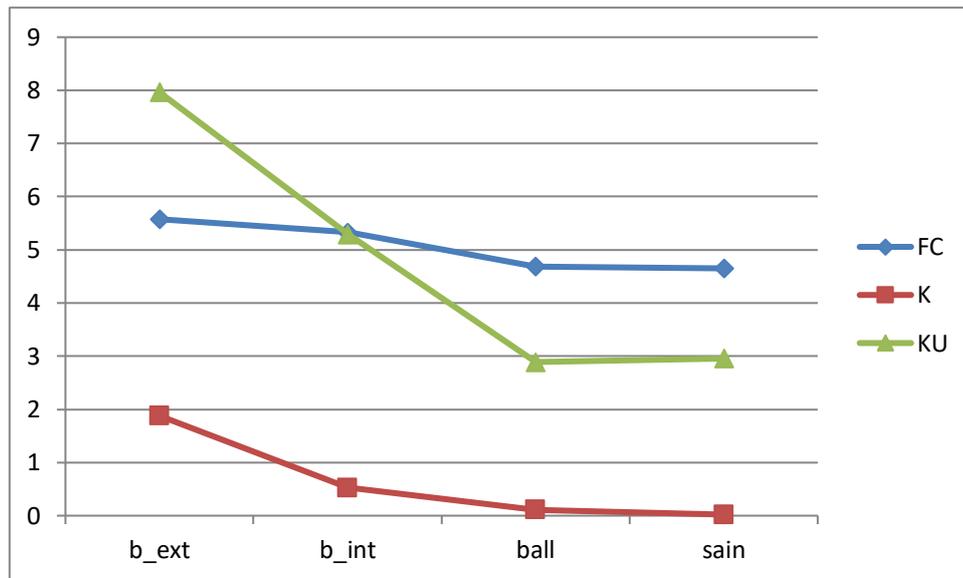
Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Épaisseur	Diamètre balle	Diamètre du pas
25.00122mm	51.99888mm	15.00124mm	7.94004mm	39.0398mm

Tableau III.2 : Indicateurs statistiques avec roulements sain et défectueux pour une vitesse 1796 tr/mn.

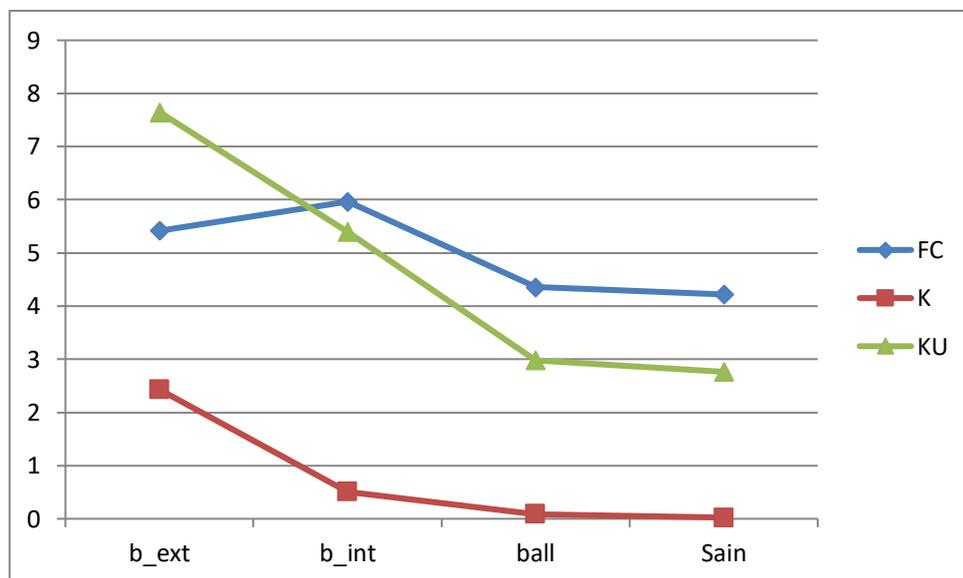
	Bague_ext	Bague_int	Balle	Sain
FC	5,4225	5,9653	4,3597	4,2196
K	2,4306	0,5071	0,0845	0,023
KU	7,6494	5,3956	2,9847	2,7642

Tableau III.3 : Indicateurs statistiques avec roulements sain et défectueux pour une vitesse 1725 tr/mn.

	Bague_ext	Bague_int	Balle	Sain
FC	5,5757	5,3298	4,6901	4,6515
K	1,8782	0,5242	0,1107	0,0202
KU	7,9637	5,2911	2,8897	2,9572



(a)



(b)

Fig. III.3 : Indicateurs scalaires en fonction des défauts pour (a) forte charge et (b) faible charge.

D'après les résultats précédents, on constate les trois indicateurs (FC, K, KU) lorsqu'ils sont calculés à partir de signaux vibratoires, pour un fonctionnement à forte charge, ne peuvent pas différencier entre un roulement sain et un roulement avec un défaut de balle. Par contre pour les autres types de défauts (bagues externe et interne) sont plus représentatifs sur la dégradation du défaut. Le niveau KU s'avère plus important, notamment à la faible charge, où il a pu discerner entre les différents états des roulements. Ainsi, cet indicateur permet d'avoir une idée sur la santé du roulement sans pour autant savoir beaucoup de choses sur l'historique de la machine.

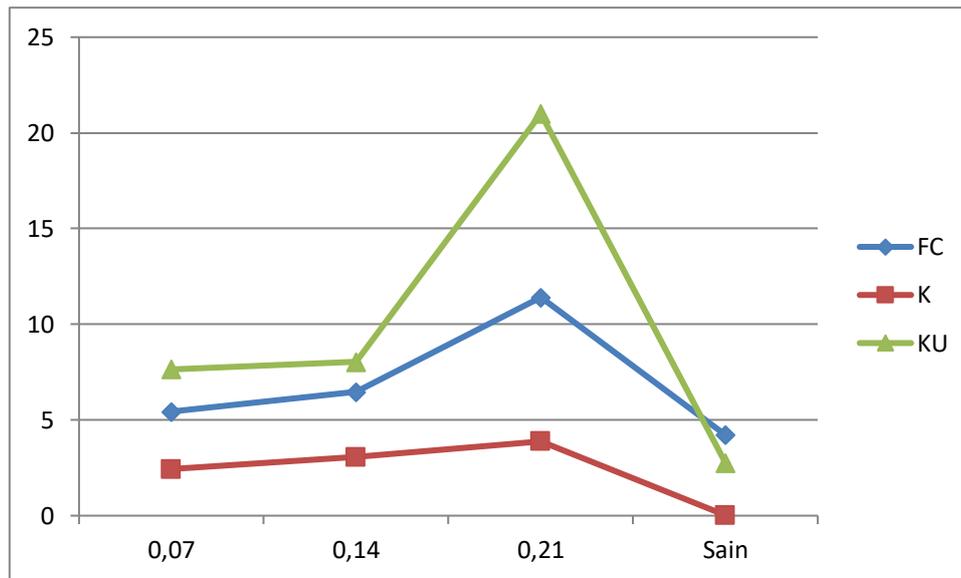


Fig. III.4 : Évolution de des indicateurs statistiques en fonction du diamètre d'un défaut bague externe.

La figure III.4 montre l'évolution des indicateurs (KU, K et FC) en fonction du diamètre d'un défaut de bague extérieur. La particularité de ces indicateurs c'est qu'il augmente avec la taille du défaut.

III.3.2 Limite de l'approche temporelle

La plupart des indicateurs temporels ne sont réactifs qu'à un stade assez avancé de la dégradation du roulement. Le Kurtosi, le facteur crête et le facteur K ne permettent pas la détection de défauts de la balle. Cela rend difficile aux opérateurs de définir des niveaux d'alarmes adéquats pour les indicateurs statistiques.

III.3.3 L'approche fréquentielle

L'approche fréquentielle est basée sur la détection de la signature d'un défaut particulier en se basant sur le spectre du signal. En effet, selon l'amplitude d'un défaut, des fréquences bien spécifiques sont excitées. Dans le cas d'un roulement, on peut distinguer quatre fréquences associées aux différents éléments de roulement dont les expressions sont données par les équations (I.1) à (I.4). Ces fréquences théoriques des défauts dépendent des caractéristiques géométriques du roulement étudié et de la fréquence de rotation de l'arbre. En pratique, à cause du glissement entre les composants du roulement, ces fréquences caractéristiques peuvent être légèrement différentes de leurs valeurs calculées (1-2%). En comparant la fréquence caractéristique mesurée et la fréquence théorique, la localisation du défaut peut être identifiée.

L'information sur la géométrie du roulement est nécessaire pour utiliser ces formules. Les fréquences caractéristiques pour une vitesse de 1796 tr/mn sont illustrées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.4 : Fréquences caractéristiques des différents éléments du roulement pour une vitesse de 1796tr/mn.

Roulement	Fréquence (Hz)
Défaut de cage	11.9218
Défaut de bague externe	107.3050
Défaut de bague interne	162.0950
Défaut de bille	141.0908

Tableau III.5 : Fréquences caractéristiques des différents éléments du roulement pour une vitesse de 1725tr/mn

Roulement	Fréquence (Hz)
Défaut de cage	11.4506
Défaut de bague externe	103.0630
Défaut de bague interne	155.6870
Défaut de bille	135.5131

En se basant sur les fréquences théoriques des défauts, l'analyse spectrale des signaux de la machine a été effectuée afin de déterminer si des défaillances se sont produites dans les roulements.

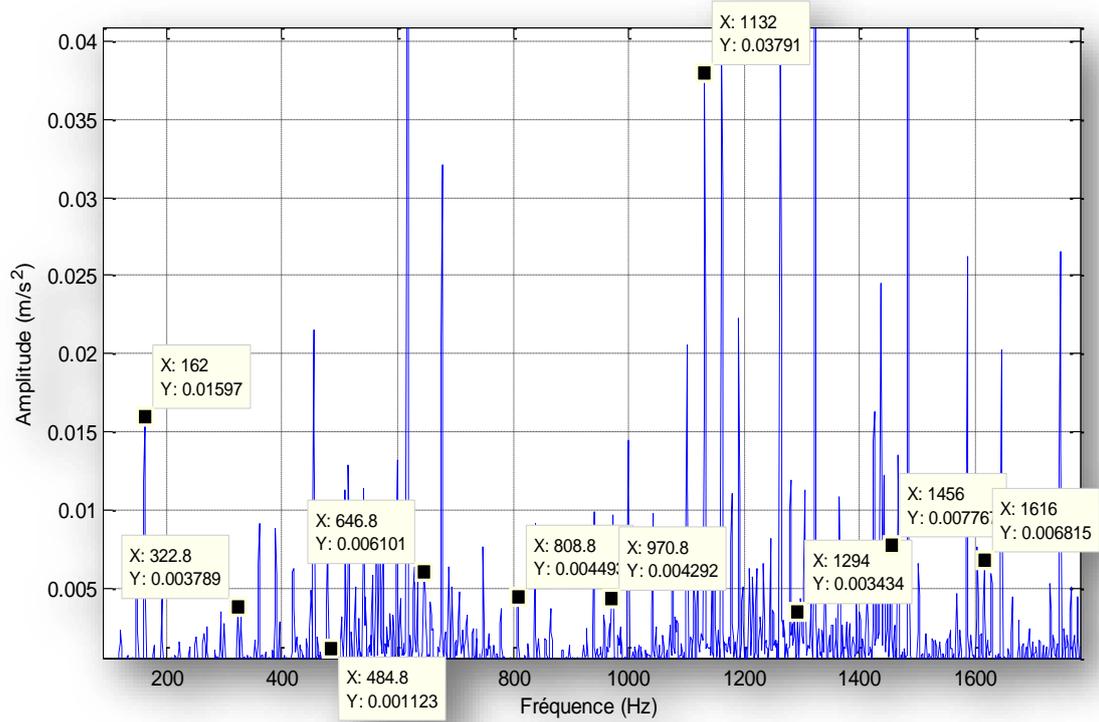


Fig. III.5 : le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne 1796tr/mn.

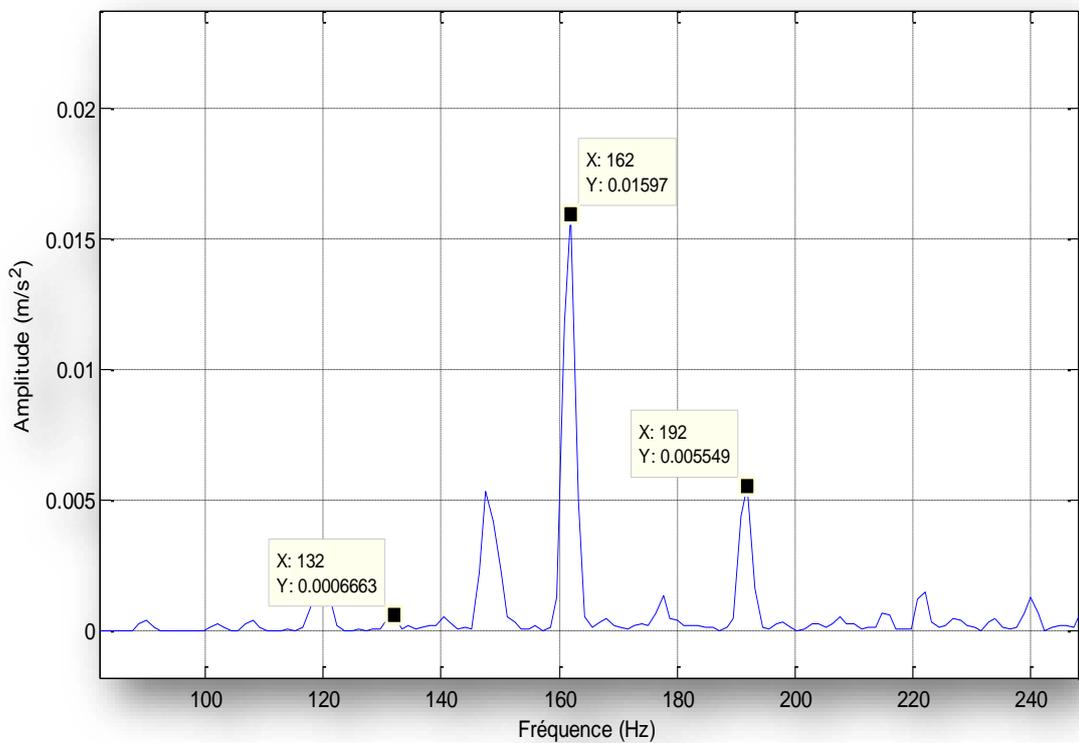


Fig. III.6 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne.

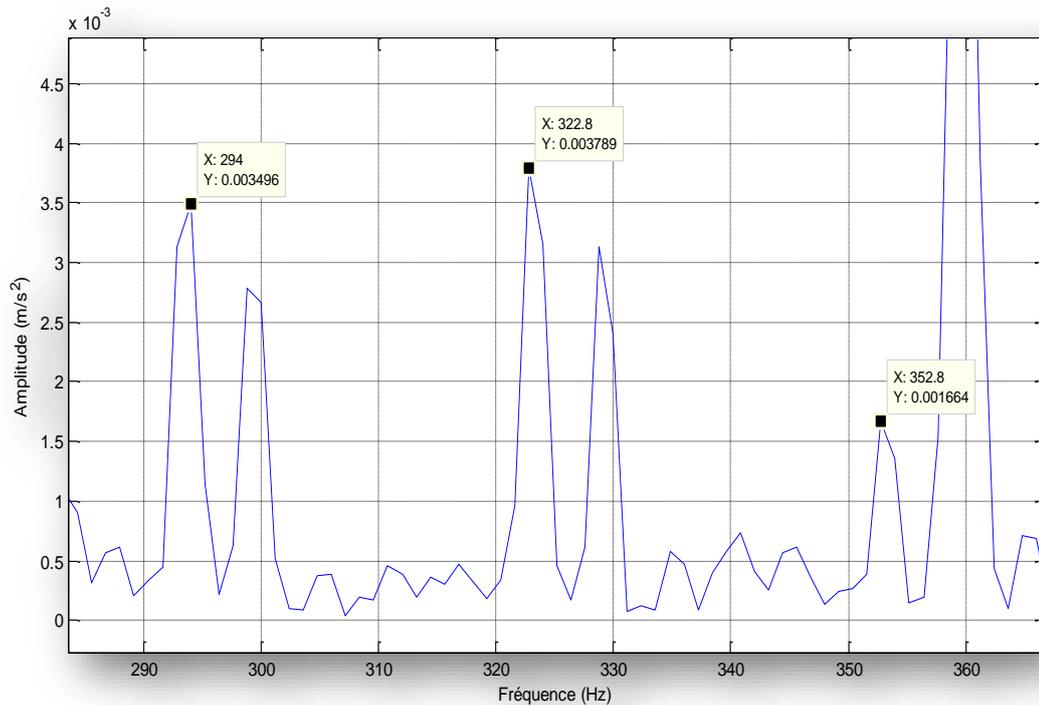


Fig. III.7 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne.

La figure III.5, présente le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne des amplitudes élevées ont été observées dans le spectre en plusieurs points,. L'apparition d'un pic à 162 Hz est proche de la fréquence théorique de défaut de la bague interne qui est de l'ordre de 162.0950 Hz. Des pics proches de multiple de la fréquence théorique de 322.8 à 1616 ont été observés. Finalement, les figures (III.6 et III.7) illustrent les pics aux fréquences de 192 près de 162.095 et (294 352.8) Hz autour de 322.8 Hz ont montré un espacement régulier (environ 29.93 Hz), ce qui correspond à la vitesse de rotation de la machine.

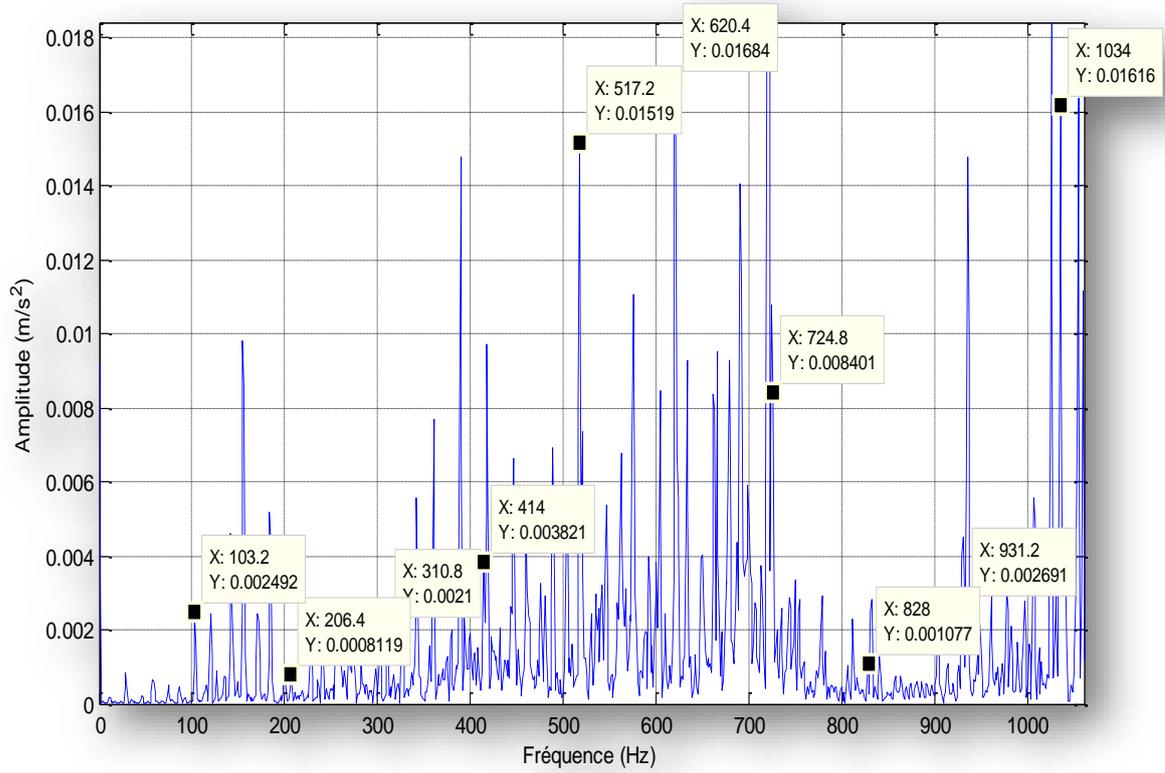


Fig. III.8 : le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe 1725tr/mn.

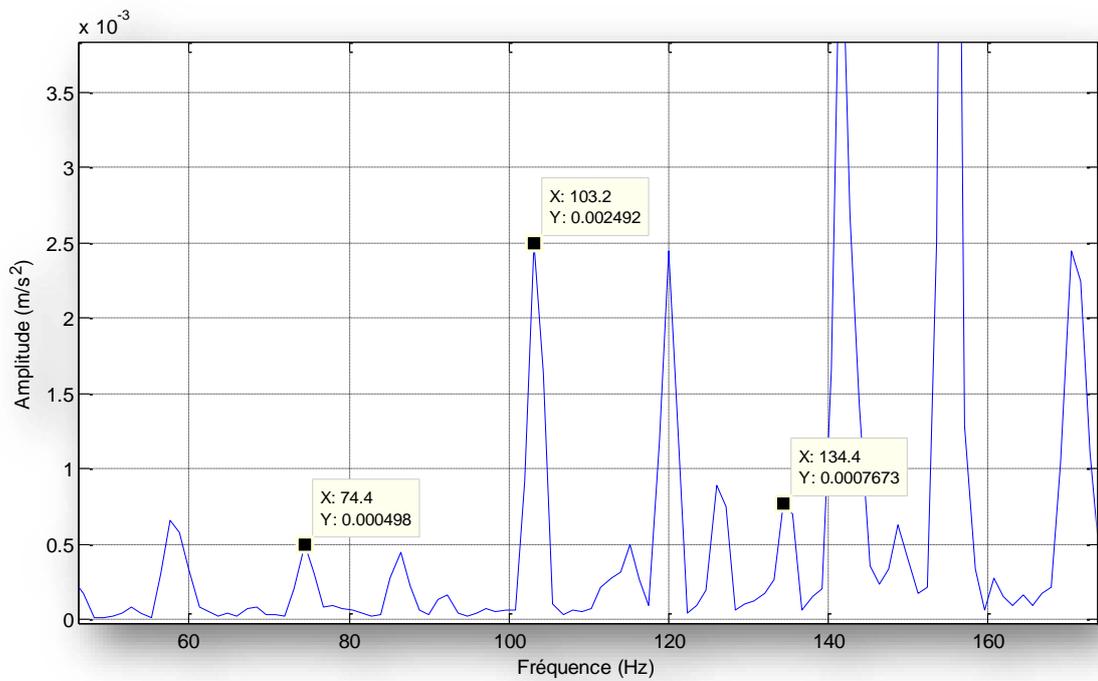


Fig. III.9 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe.

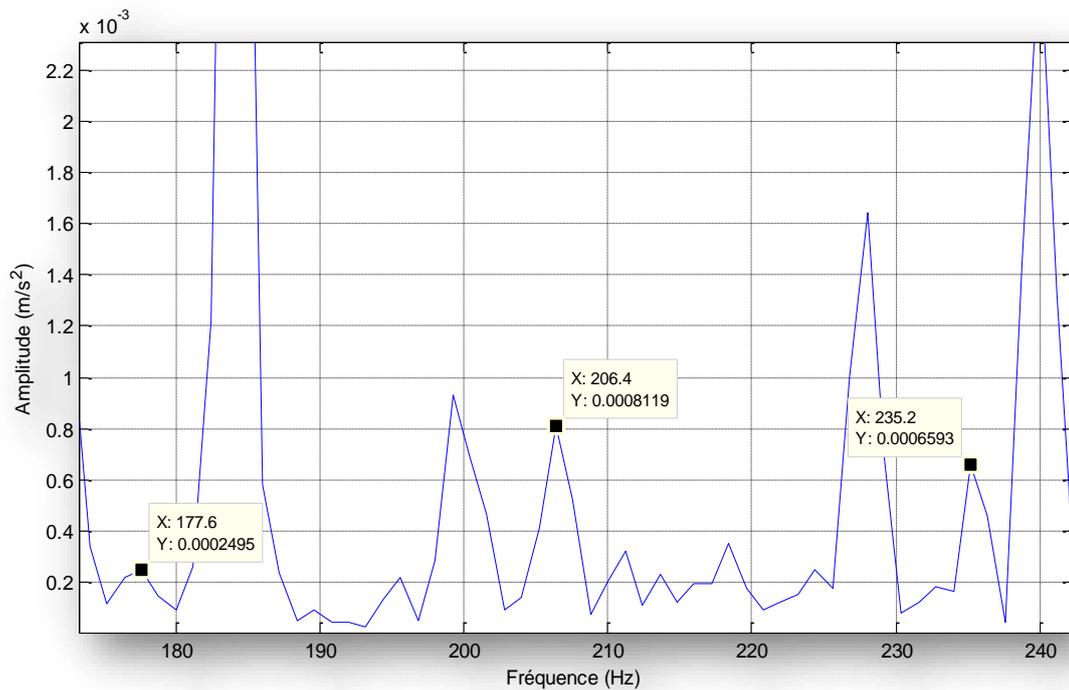


Fig. III.10 : Zoom de spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues externe.

L'analyse du spectre pour un roulement avec un défaut de bague externes est illustré aux figures (III.8 à III.10), à partir de la figure (III.8), on constate la présence d'un harmonique (103.2) proche de la fréquence théorique qui est de Hz. 103.0630. Cette fréquence est apparue à faible amplitude, cependant, les amplitudes relatives aux multiples de cet harmonique augmentent avec l'augmentation de l'indice de multiplicité. L'espacement régulier est bien évident, des petits pics sont également répartis entre les fréquences de 103.2 et 206.4 Hz et qui vaut 28.75 Hz.

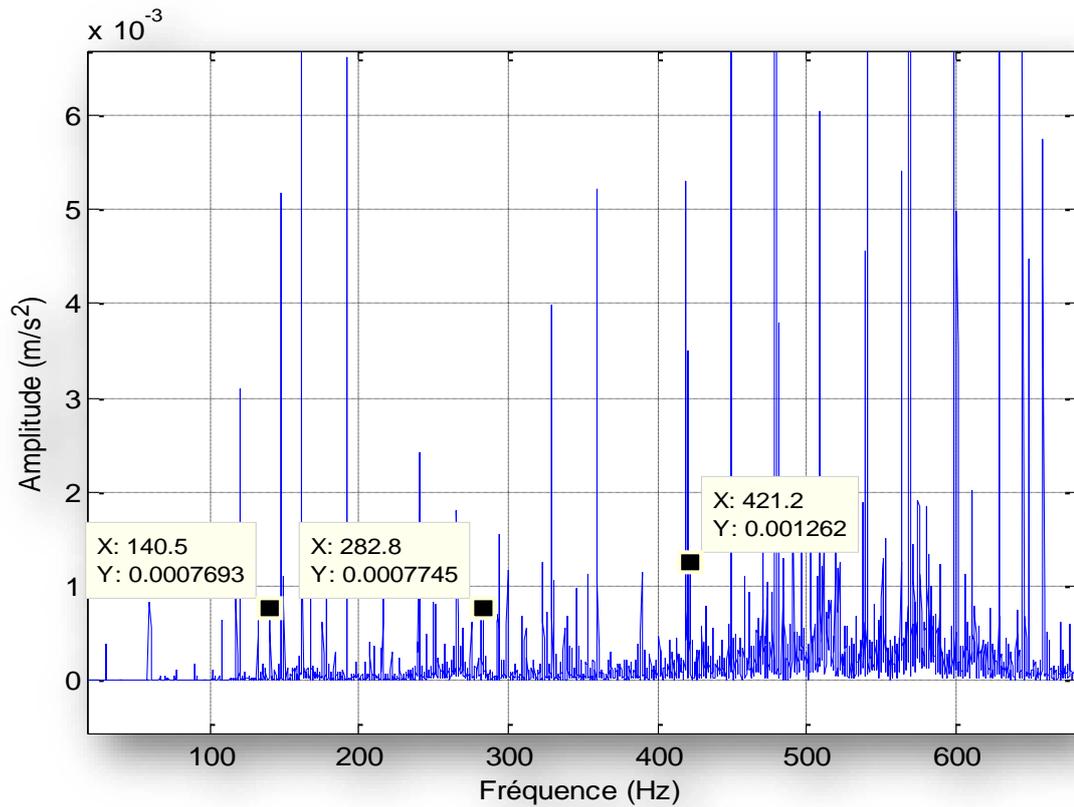


Fig. III.11 : Spectre de vibration avec défaut de bille(0.21inch) pour une vitesse de 1796 tr/mn.

A partir de la figure (III.11) la fréquence de défaut de bille a été observée à la fréquence de 140.5 Hz, ce qui est proche de la fréquence théorique de ce composant (141.0908 Hz). De même des pics, de fréquences multiples de 140.5 et dont l'amplitude augmente avec l'augmentation de l'ordre, ont été observés.

III.3.4 Diagnostic par l'utilisation de l'enveloppe du signal vibration

La figure (III.12) représente les signaux vibratoires, pour un roulement sain et un autre avec un défaut de balle, obtenus au sein de laboratoire (LGEB). Le signal enveloppe est obtenu par l'utilisation de la transformation de Hilbert. D'après ces résultats, on remarque que l'enveloppe permet d'extraire du signal original que les harmonique de bases fréquences, ce qui facilite le diagnostic. Ces résultats montrent nettement (Fig. III.12) le discernement entre l'état sain est défectueuse.

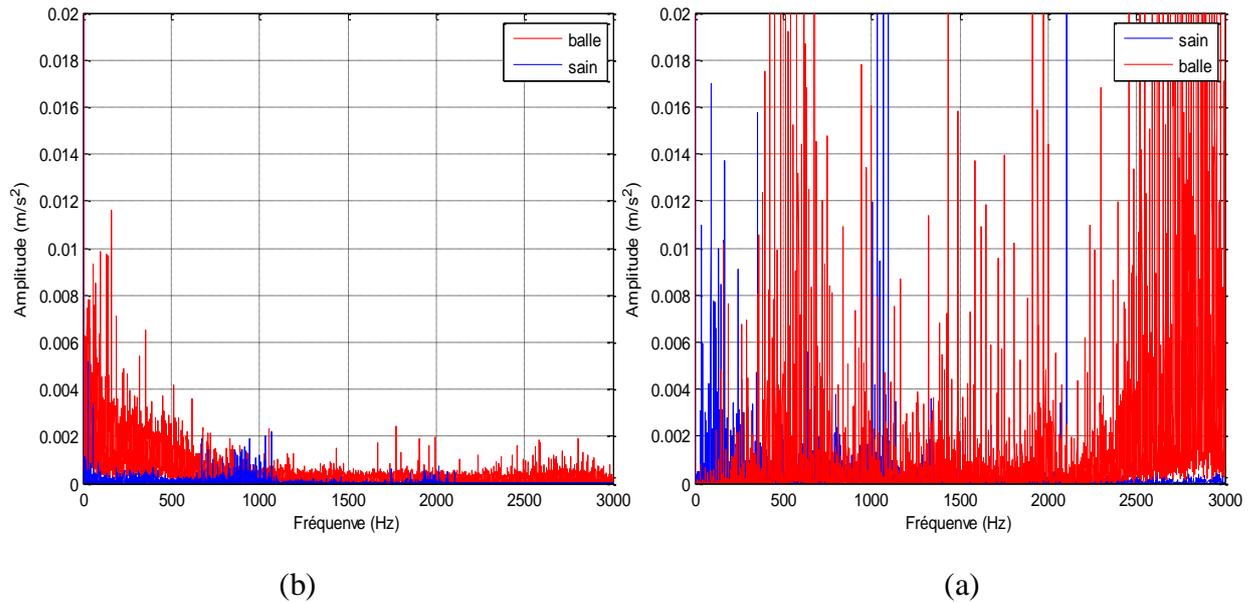


Fig. III.12 : (a) Spectre de vibratoire, (b) spectre de l'enveloppe du signal vibration

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois approches de diagnostic de défaut de roulements. La première repose sur l'utilisation des indicateurs scalaire qui utilise les grandeurs temporelles. Lors de cette étude, nous avons trouvé l'impuissance de ces indicateurs de discerner entre un roulement sain et un autre avec défaut de balle. Cette limitation nous a poussé à pencher vers l'analyse spectrale. Comme le signal vibration est très riche en harmoniques et que les fréquences caractéristiques et leurs multiples se trouvent dans les basses fréquences, une troisième technique a été adoptée. cette dernière utilise l'enveloppe pour extraire les basses fréquences, ce qui nous facilite l'étude.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations ou de défaillances. Ces défauts influent sur la qualité du produit, et peuvent provoquer un arrêt immédiat d'une machine. Le diagnostic de défauts de ces machines, s'appuie essentiellement sur la surveillance de symptômes liés à différentes conditions de dégradation

Dans le premier chapitre, après présentation de quelques notions fondamentales en diagnostic, nous avons rappelé les principaux éléments constitutifs de la machine afin de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci. Ensuite, nous avons présenté aussi les principales méthodes de diagnostic.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons étudié les caractéristiques cinématiques correspondant au comportement vibratoire basse fréquence des roulements, en montrant l'image spectrale du signal vibration pour différent types de défaut de roulement. Durant cette étude, nous présenté quelque méthodes de diagnostic des défauts de roulement.

Le troisième chapitre est destiné à au diagnostic des quatre principaux défauts de roulement. Pour ce faire, nous avons exploité une base de données disponible sur site web, aussi nous avons utilisé les résultats expérimentaux obtenus lors des essais pratiques réalisés au sein de laboratoire LGEB. Par l'utilisation de logiciel Matlab, nous avons utilisé trois approches pour le diagnostic:

La première utilise les indicateurs scalaires obtenus à partir de signal vibratoire. Ces indicateurs nous informent avec précision sur l'état du roulement mais ils échouent à discerner entre un état sain et un autre avec défaut de balle.

Pour surmonter le problème rencontré dans l'approche précédente, nous avons utilisé l'analyse spectrale du signal vibration où nous avons pu détecter les fréquences caractéristiques des différents défauts et leurs multiples. Vue que le spectre du signal vibration est riche en harmoniques et à fin de faciliter le processus de diagnostic, nous avons utilisé le spectre de l'enveloppe du signal vibration. Ce dernier permet de ne garder que les basses fréquences, où les amplitudes des fréquences caractéristiques sont bien claires.

En perspectives, nous proposons d'étudier l'effet de l'emplacement des Accéléromètres sur le signal vibratoire, par conséquent sur la détection des défauts de roulement.

Bibliographie

Bibliographie

[MAH17] :F.MAHMOUDI 'Diagnostic des défauts de la machine asynchrone: Analyse expérimentale' thèse de master ,Université de biskra 2017.

[YAH12] :K.Yahia 'Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Modèle' thèse de doctora université mohamed khider Biskra 2012.

[KHA09] :A.Khatir 'Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts' thèse de magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF - UFAS (ALGERIE) 2009 .

[BOU16] : H. Boussaggama ' La modélisation des cassures des barres de la machine asynchrone par flux 2D ' thèse de master thèse de doctora Université Mohamed khider Biskra 2016.

[SCH 99] : E. Schaeffer « Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défaut ». Thèse de doctorat, Université De Nantes 1999.

[HAL15] :N. Halem thèse de Doctorat ' Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis ' 2015.

[BAB09] : V. Babak 'CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation, DOCTORAT DE L'I.N.P.L – Réduction du courant de défaut Nancy Université 2009.

[MER16] : K. Karima thèse de magister ' Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ' Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2016.

[MED12] : A. MEDOUED thèse de doctora ' SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES 'Université du 20 Août 1955-Skikda 2012.

[OLI06] : O. Olivier thèse de doctora 'DIAGNOSTIC PAR RECONNAISSANCE DES FORMES: APPLICATION A UN ENSEMBLE CONVERTISSEUR – MACHINE ASYNCHRONE ' L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON 2006.

[CHAO.CHET16] : R. Chaouche, S. Chetti thèse de master' Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560 ' UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2016.

[AZO11] : K. Azouzi ' Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défaut rotorique par l' approche de la fonction d' enroulement 'mémoire de magister ,université d 'oran mohamed boudiaf 2011.

[DID04] : G. Didier ' Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances' . Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.

[LAA17] : W . Laala thèse de doctora " contribution à la détection des défauts dans les machine à induction et à leur diagnostic par l'utilisation des technique se basant sur l' IA(système experts et logique floue) université mohamed khider biskra .2017 .

[SAD15] : N. Sadki thèse de master' SIMULATION DES DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR A ASYNCHRONE' UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2015.

[SAH10] : M. Sahraoui thèse de doctora ' Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones' université de mohamed khider biskra 2010.

[TRA08] : B. Trajin, J. Regnier, J. Faucher, Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis, Power Electronics Machine and Drives Conference, Avril 2008.

[MEV92] : B. Mevel, Comportement dynamique des roulements à billes, Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1992.

[LAN13] : F.Landolsi.' COURS DE TECHNIQUES DE SURVEILLANCE'
<https://www.coursehero.com/file/p68k854/COURS-DE-TECHNIQUES-DE-SURVEILLANCE-Landolsi-Foued-Page-49-e-Remarque-II-ne/> 2013

[BIG95] : R. Bigret, J. L. Féron, C. Pachaud, Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes - modèles, mesurages, analyses des vibrations, Masson, Paris, 1995.

[AUG01] : D. Augeix, Analyse vibratoire des machines tournantes, Techniques de l'Ingénieur, Janvier 2001.

[CHE96] : Z. Chen, J. C. Cuneo, J. J. Mecholsky Jr., S. Hu, Damage processes in Si₃N₄ bearing material under contact loading, *Wear*, 1996.

[MIS03] : M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, *Les ondelettes et leurs applications*, Hermes, Paris, 2003.

[Zha05] : T. X. Zhang, X. J. Guo, Z. Wang, On the application of envelope-wavelet analysis in the fault diagnosis of rolling bearing, *Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, Aout 2005.

[BDC] :site- Case Western Reserve University –Bearing Data Center .

Annexe

I.1 Description du banc d'essai

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein de Laboratoire de Génie Électrique de Biskra (LGEB). Le moteur triphasé asynchrone à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur tétra polaire de 3 kW fabriqué par *Azazga* dont les caractéristiques principales sont données dans l'annexe A. Ce dernier entraine une machine triphasée asynchrone à rotor bobiné qui est utilisée comme charge, donc comme générateur qui alimente une charge résistive variable. la mesure des signaux est réalisée par la carte d'acquisition de type NI (National Instrument) piloté par LabView avec une fréquence d'échantillonnage de. $f_e=12800$ Hz (Fig. III.1).

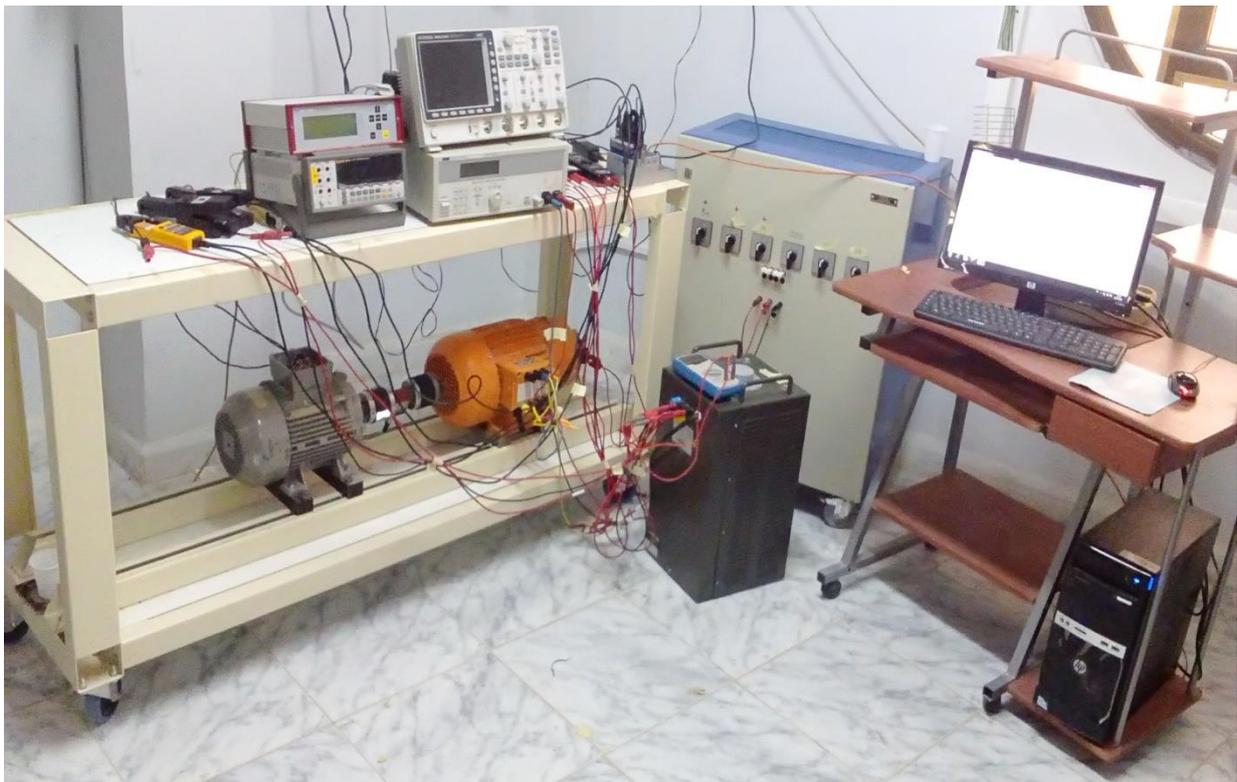


Fig. I.1 : Le banc d'essai expérimental

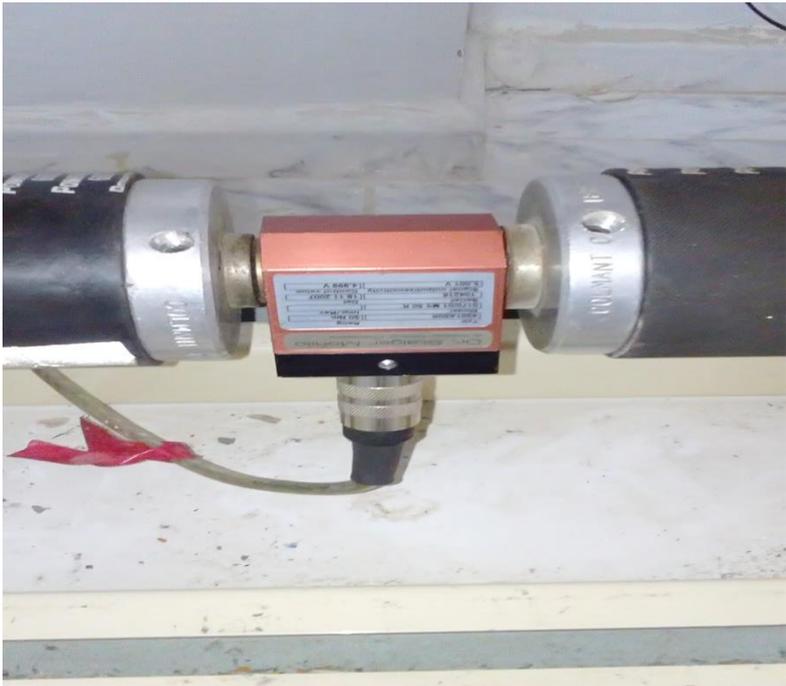


Fig. I.2 : Capteur de couple.



Fig. I.3 : Capteur de courant.



Fig. I.4 : Capteur de tension.

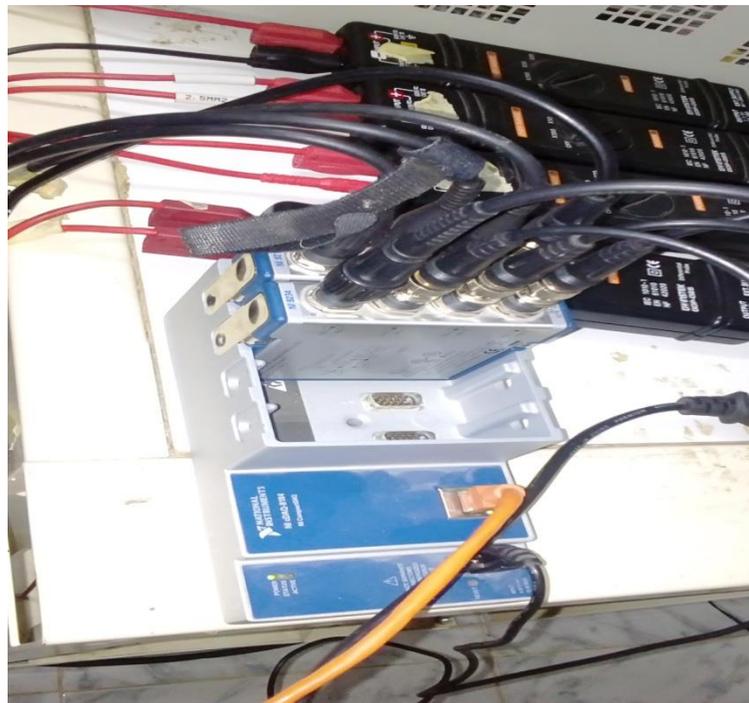


Fig. I.5 : La carte d'acquisition de type NI (National Instrument) piloté.



Fig. I.6 : Source d'alimentation.



Fig. I.7 : Machine triphasée asynchrone à rotor bobiné.



Fig. I.8 : Moteur triphasé asynchrone à cage .

• caractéristiques de la machine

Puissance.	3 kW.
La fréquence	50 Hz.
Tension nominale.	220/380 V / couplage triangle.
Courant nominal.	7 A.
Vitesse nominale.	1410 tr/mn.
Le facteur de puissance	$\cos(\varphi) = 0,8.$

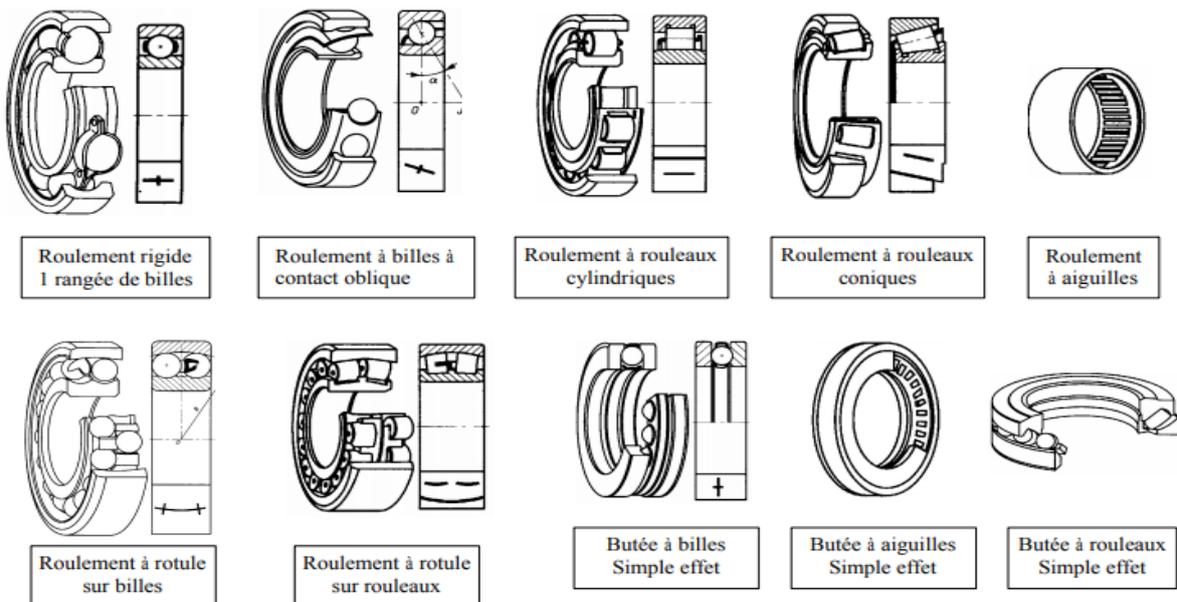


Fig. I.9 : Les types de roulements.