

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université 8 mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique
Thèse

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

**Contribution au Diagnostic des Défaits dans les Machines
Tournantes par Analyse Multirésolution**

Option : Génie Electrique

Par

BOUDIAF Adel

Devant le Jury :

Pr. Ahcene LEMZADMI	Président	Professeur	Université de Guelma
Pr. Abdelkrim MOUSSAOUI	Rapporteur	Professeur	Université de Guelma
Pr. Tahar BAHI	Examineur	Professeur	Université d'Annaba
Dr. Sebti BELKACEM	Examineur	M.C.A	Université de Batna
Dr. Achour SAADOUNE	Examineur	M.C.A	Université de Biskra
Dr. Athmane ZITOUNI	Examineur	M.C.A	Université de Biskra

Année 2016

إهداء

إلى أهلي

أهدي هذا البحث المتواضع راجياً

عز وجل أن يجد القبول والنجاح

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Mr MOUSSAOUI Abdlekrim, Professeur à l'université de Guelma, pour avoir dirigé ce travail, pour son aide tout au long de ces années de travail en commun. Merci pour ces conseils, orientations et ses encouragements qui m'ont permis de progresser, et d'élargir mon champ de vision du travail de recherche.

Une très grande reconnaissance va au Professeur Ahcène Lemzadmi, à l'université de Guelma, pour l'honneur qu'il nous fait de présider le jury de cette thèse et pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à notre travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au Mr Sebti Belkacem, Maitre de conférences à l'Université de Batna d'avoir accepté de juger ce travail et d'apporter ses critiques tant contractives.

Je remercie chaleureusement le Professeur Tahar BAHY, de l'université de Badji Mokhtar-Annaba, pour avoir bien voulu examiner ce travail et d'apporter ces conseils congruentes.

Comme je remercie infiniment Mr Achour SAADOUNE, Maitre de conférences à l'université de Biskra, d'avoir accepté de prendre part à l'appréciation de ce travail et d'apporter ses suggestions congruentes.

Je tiens également à exprimer ma sincère reconnaissance au Mr Athmane ZITOUNI Maitre de conférences à l'université de Biskra, et je le remercie d'avoir accepté de juger ce travail et d'apporter ses remarques aussi constructives et pertinentes.

Un remerciement assez spécial à tout le personnel de l'URASM, en particulier mon directeur: CHOUCANE, ainsi que Zoheir MENTOURI, Adel BALASKA, Hocine Bendjama, Hichem Maouche, Daoud Idiou...

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

Résumé

La fonction principale de la surveillance vibratoire des machines tournantes est de fournir des connaissances sur l'état de fonctionnement réel de la machine à chaque moment sans arrêter la ligne de production. Ceci permet d'éviter les pertes de production et améliore la fiabilité et la sécurité.

La transformée en ondelettes (TO) est l'une des techniques les plus importantes de traitement du signal vibratoire qui peut être utilisé pour détecter et diagnostiquer les défauts des machines tournantes. Néanmoins, les limites de cette technique sont les suivants: Il faut une présélection de l'ondelette mère convenable et le niveau approprié de décomposition qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts. Afin de résoudre ces problèmes, une nouvelle approche de diagnostic de défauts de roulements sera développée dans ce travail. Cette nouvelle méthode a l'avantage de ne pas souffrir des limitations des techniques de diagnostic usuelles.

Mots-clés : Analyse vibratoire, diagnostiquer les défauts de roulement, Transformée de Fourier Rapide, Analyse temporelle, l'analyse de Cepstre, l'analyse de l'enveloppe, transformées en ondelettes

Abstract

The main function of vibration monitoring of rotating machinery is to provide knowledge about the real working condition of the machinery at each moment without stopping the production line. This allows avoidance of the production losses and improves the availability and safety.

The wavelet transform is one of the most important techniques of vibration signal processing that can be employed to detect and diagnose the faults of rotating machinery. Nevertheless, the limitations of this technique there are: the selection of the suitable mother wavelet, the choice of decomposition level, and its frequency band which contains the necessary information for faults diagnosis. In order to overcome these limitations, this work gives a new approach to diagnosis the bearing faults. This new method has the advantage that it does not suffer from limitations that suffered from the habitual techniques of diagnostic.

Keywords: Vibration analysis, Bearing fault diagnosis, temporal analysis, Fast Fourier transform, Cepstrum analysis, Envelope analysis, Wavelet transforms

المهمة الرئيسية اهتزازات توفير حقيقة
ي . وهذا يسمح وتحسين
يات يمكن وتشخيص ()
هناك مشاكل في هذه التقنية وهي اختيار الموجة واختيار
لتشخيص
لتشخيص الأعطال في هذا . الجديد لديه ميزة انه يعانى من القيود التي يعطي تقنية جديد منه تقنيات التشخيص .

: تحليل الاهتزاز تشخيص الأعطال في المحمل تحويل فورييه السريع التحليل تحليل

تحويل يجات.

Table de matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Abstract.....	III
.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures.....	X

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I :

Généralités sur la maintenance industrielle

I.1 Introduction.....	4
I.2 Maintenance.....	4
I.2.1 Différents types de maintenance.....	5
I.2.1.1 Maintenance corrective.....	6
I.2.1.2 Maintenance préventive.....	6
I.2.1.2.1 Maintenance préventive systématique.....	7
I.2.1.2.2 Maintenance préventive conditionnelle (prédictive).....	7
I.2.3 Choix de type de maintenance.....	9
I.3 Surveillance.....	10
I.3.1 Etapes en processus surveillance.....	11
I.3.2 Types de surveillance.....	12
I.3.2.1 Surveillance On-line ou suivi continu.....	13
I.3.2.2 Surveillance off-line (hors ligne) ou suivi périodique.....	13
I.3.3 Choix du type de surveillance.....	14
I.3.4 Techniques de la surveillance des machines tournantes.....	15
I.3.4.1 La thermographie infrarouge.....	15
I.3.4.2 L'analyse des huiles.....	16
I.3.4.3 L'analyse vibratoire.....	16
I.3.4.4 L'analyse acoustique.....	16
I.3.4.5 Contrôle par ultrasons.....	16
I.3.5 Choix d'outil de surveillance.....	17
I.3.5.1 Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels.....	18
I.3.6 Terminologies utilisées en surveillance.....	18
I.4 Conclusion.....	19
I.5 Références bibliographiques.....	19

Chapitre II :

Surveillance vibratoire

II.1 Introduction.....	22
II.2 Vibration mécanique	22
II.2.1 Définition d'une vibration	22
II.2.2 Caractéristiques d'une vibration	23
II.2.3 Type des signaux vibratoires	24
II.2.3.1 Signaux déterministes	24
II.2.3.1.1 Signaux périodiques	24
II.2.3.1.2 Signaux Non périodiques	26
II.2.3.1.3 Signaux aléatoire	26
II.2.3.2 Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature.....	27
II.2.4 Les grandeurs de mesure d'une vibration	27
II.2.4.1 Choix des grandeurs de mesure	28
II.2.5 Capteurs de vibrations usuels	29
II.2.5.1 Capteur de déplacement	30
II.2.5.2 Capteurs de vitesse	31
II.2.5.3 Capteurs d'accélération	31
II.2.5.4 Comparaison des différents types de capteurs	33
II.2.5.5 Domaine d'utilisation des capteurs de vibration.....	33
II.3 Les outils de surveillance vibratoire	34
II. 4 Défauts des machines électriques tournantes	34
II. 4.1 Défaut de balourd	35
II. 4.1.1 Défaut de Balourd statique	36
II. 4.1.2 Défaut de Balourd dynamique	37
II. 4.2 Défaut d'alignement	37
II. 4.2.1 Défaut de désalignement angulaire	38
II. 4.2.1 Défaut de désalignement axial.....	39
II.4.3 Défauts de serrage.....	39
II.4.4 Défauts des engrenages.....	40
II.4.4.1 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement.....	41
II. 4.5 Défauts de roulements.....	44
II. 4.5.1 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement.....	44
II. 4.5.1.1 Défaut sur la bague extérieure.....	45
II. 4.5.1.2 Défaut sur la bague intérieure.....	46
II. 4.5.1.3 Défaut sur l'élément roulant.....	46
II. 4.5.1.4 Défaut sur la cage.....	47
II.6 Conclusion.....	47
II.7 Références bibliographiques.....	47

Chapitre III :
Théorie des ondelettes et leurs applications

III.1 Introduction	49
III.2 Dispositif expérimental	49
III.3 Défauts des roulements	51
III.4 Transformée en ondelettes des signaux vibratoires	54
III.4.1 Transformée en ondelettes continues (TOC).....	54
III.4.2 Transformée en ondelettes discrètes (TOD).....	55
III.4.3 L'Analyse Multi-résolution en Ondelettes	55
III.4.4 Analyse par paquets d'ondelettes	56
III.5 Application de la TOC pour diagnostiquer les défauts de roulement.....	57
III.6 Application de l'AMRO pour diagnostiquer les défauts de roulement.....	58
III.7 Application de l'analyse par paquets d'ondelettes pour diagnostiquer les défauts de roulement	63
III.8 Contribution à l'amélioration de l'analyse multi-résolution en ondelettes ...	67
III.9 Conclusion	72
III.10 Références bibliographiques	73

Chapitre IV :
Nouvelle approche dans la détection des défauts de roulements et
Étude comparative

IV.1 Introduction	75
IV.2 Description du dispositif expérimental	75
IV.3 Méthodes de diagnostic des signaux vibratoires	76
IV.3.1 L'analyse temporelle	76
IV.3.2 L'analyse spectrale	77
IV.3.3 L'analyse de l'enveloppe	79
IV.3.4 L'analyse cepstrale	82
IV.3.4.1 Cepstre réel	82
IV.3.4.2 Cepstre complexe	83
IV.3.4.3 Cepstre de puissance.....	83
IV.3.5 Transformée en ondelettes	86
IV.3.6 Nouvelle technique.....	86
IV.4 Comparaison entre les différentes méthodes exposées.....	89
IV.5 Conclusion.....	90
III.6 Références bibliographiques	90
<i>Conclusion générale</i>	92

Liste des tableaux

Tableau I-1: Choix de l'outil de surveillance.....	17
Tableau I-2: Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels	18
Tableau II-1: Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature...	27
Tableau II-2 : Comparaison entre les différents types de capteur	33
Tableau III-1: Dimensions et paramètres du roulement Type 6205-2RSL JEM SKF	51
Tableau III-2 : Les fréquences des défauts de roulement	52
Tableau IV-1 : Les fréquences théoriques des défauts de roulement théorique	75
Tableau IV-2 : Résultats de l'Etude comparative des différentes méthodes de détection des défauts de roulements	89

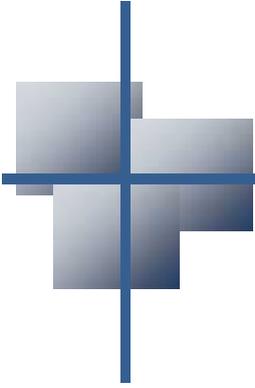
Liste des figures

Figure I-1 : Contenu de la fonction maintenance.....	4
Figure I-2 : Evolution de la maintenance depuis 1940.....	5
Figure I-3 : Différents types de maintenance.....	5
Figure I-4 : Principe de la maintenance corrective.....	6
Figure I-5 : Principe de la maintenance préventive systématique.....	7
Figure I-6 : Principe de la maintenance préventive conditionnelle.....	8
Figure I-7 : Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle.....	8
Figure I-8 : Comparaison entre les différents types de maintenance préventive.....	9
Figure I-9 : Choix de type de maintenance.....	10
Figure I-10 : Architecture générale d'un système de Surveillance en ligne.....	11
Figure I-11 : Composantes de la surveillance industrielle.....	12
Figure I-12 : Les types de surveillance des machines.....	12
Figure I-13 : Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu.....	13
Figure I-14 : Surveillance off-line ou suivi périodique.....	14
Figure I-15 : Le choix du type de suivi.....	14
Figure I-16 : Différentes techniques de la surveillance des machines tournantes.....	15
Figure I-17 : Principe de l'analyse thermographique.....	15
Figure I-18 : Principe de l'analyse vibratoire.....	16
Figure II-1 : Représentation d'une vibration sinusoïdale.....	23
Figure II-2 : Types de signaux vibratoires.....	24
Figure II-3 : Signal périodique.....	24
Figure II-4 : Représentation d'un signal harmonique.....	25
Figure II-5 : Représentation d'un signal périodique non harmonique.....	25
Figure II-6 : Représentation d'un signal non périodique.....	26
Figure II-7 : Représentation d'un signal aléatoire.....	26
Figure II-8 : Grandeurs associées à une vibration.....	28
Figure II-9 : Relation accélération, vitesse, déplacement.....	29
Figure II-10 : Capteurs de vibration.....	30

Figure II-11 : Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement.....	30
Figure II-12 : Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse.....	31
Figure II-13 : Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération.....	32
Figure II-14 : Domaine d'utilisation des capteurs de vibration.....	33
Figure II-15 : Classification des défauts selon leurs origines.....	35
Figure II-16 : Exemples de défauts induisant un balourd.....	36
Figure II-17 : Spectre théorique d'un défaut de balourd.....	36
Figure II-18 : Balourd statique.....	37
Figure II-19 : Balourd dynamique.....	37
Figure II-20 : Signal temporel d'un défaut d'alignement.....	38
Figure II-21 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial.....	38
Figure II-22 : Désalignement angulaire.....	38
Figure II-23 : Désalignement axial (radial).....	39
Figure II-24 : Défaut d'usure d'accouplement.....	39
Figure II-25 : Schéma simplifié d'un engrenage.....	40
Figure II-26 : Spectre d'un engrenage sain.....	40
Figure II-27 : Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage.....	41
Figure II-28 : Différents types d'engrenage.....	41
Figure II-29 : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	42
Figure II-30 : Image vibratoire théorique d'une denture.....	42
Figure II-31 : Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture	43
Figure II-32 : Image vibratoire théorique d'un engrenage pour une trop grande dent détériorée.....	43
Figure II-33 : Image théorique de la modulation d'amplitude de F_c par F_r	44
Figure II-34 : Constitution d'un roulement.....	44
Figure II-35 : Caractéristiques d'un roulement.....	45
Figure II-36 : Image vibratoires théorique d'un défaut de bague extérieure.....	45
Figure II-37 : Image vibratoires théorique d'un défaut de bague intérieure.....	46
Figure II-38 : Image vibratoires théorique d'un défaut de bille.....	46
Figure III-1 : Le dispositif expérimental (banc d'essais).....	50
Figure III-2 : Caractéristiques géométriques d'un roulement.....	52
Figure III-3 : Signaux vibratoires de l'état normal.....	53

Figure III-4 : Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague intérieure du roulement.....	53
Figure III-5 : Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague extérieure du roulement....	53
Figure III-6 : Exemples d'ondelettes mères.....	54
Figure III-7 : Analyse par paquets d'ondelettes.....	56
Figure III-8 : (a) Spectres des défauts de roulement en utilisant la TOC (a) défaut de bague intérieure (b) défaut de bague extérieure.....	57
Figure III-9 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieur mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 2.....	59
Figure III-10 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieur mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1.....	60
Figure III-11 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieur mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1	61
Figure III-12 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieur..... mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1	62
Figure III-13 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre.....	63
Figure III-14 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre.....	64
Figure III-15 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre.....	65
Figure III-16 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre.....	66
Figure III-17 : Distribution d'énergie.....	70
Figure III-18 : Spectre d'enveloppe de défaut de bague intérieure par la nouvelle méthode (a) mesuré à 1797 tr/min, (b) Mesuré à 1730 tr/min.....	71
Figure III-19 : Spectre d'enveloppe de défaut de bague extérieure par la nouvelle méthode (a) Mesuré 1797 tr/min, (b) Mesuré 1730 tr/min.....	71
Figure IV-1 : Kurtosis d'un roulement à l'état saint et à l'état défectueux.....	77
Figure IV-2 : Spectre de l'état saint de roulement.....	78
Figure IV-3 : Spectre d'un défaut sur la bague intérieure obtenue par la transformée de fourrier rapide.....	78
Figure IV-4 : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure obtenue par la transformée de fourrier rapide.....	78
Figure IV-5 : Schéma de fonctionnement de la méthode de l'enveloppe.....	80

Figure IV-6 : Enveloppes de signaux avec défaut de bagues intérieures.....	81
Figure IV-7 : Enveloppes de signaux avec défaut de bagues extérieures.....	81
Figure IV-8 : Spectre d'un défaut sur la bague intérieure obtenue par analyse d'enveloppe.....	82
Figure IV-9 : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure obtenue par analyse d'enveloppe.....	82
Figure IV-10 : Cepstre de puissance.....	83
Figure IV-11 : Cepstre réel d'un défaut de bague intérieure et (b) son zoom [0 – 0.025] s.....	84
Figure IV-12 : Cepstre réel d'un défaut de bague extérieure et (b) son zoom [0 – 0.025] s.....	84
Figure IV-13 : Cepstre de puissance d'un défaut de bague intérieure.....	85
Figure IV-14 : Cepstre de puissance d'un défaut de bague extérieure.....	85
Figure IV-15 : Cepstre complexe d'un défaut de bague intérieure.....	85
Figure IV-16 : Cepstre complexe d'un défaut de bague extérieure.....	85
Figure IV-17 : Organigramme de la méthode proposée.....	87
Figure IV-18 : Spectres de défaut de bague intérieure obtenus par la nouvelle méthode.....	87
Figure IV-19 : Spectres de défaut de bague extérieure obtenus par la nouvelle méthode.....	88



Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, d'usage large et diversifié, les machines tournantes et en particulier les moteurs à induction sont toujours présents et assurent des fonctions très importantes dans les systèmes industriels. Plus que cela, ils sont considérés dans de nombreuses applications industrielles comme étant des équipements critiques tels que dans le cas des complexes pétrochimiques, sidérurgiques,...etc.

Ces machines tournantes sont composées de plusieurs éléments comme le stator, le rotor, l'arbre, et les roulements. Ces derniers sont considérés comme étant les éléments mécaniques les plus importants, et sont employés pour guider et soutenir les arbres dans ces machines tournantes. D'autre part, plusieurs études ont montré que la source majeure de la plupart des défauts mécaniques dans les machines tournantes sont, en fait, des défauts de roulements, dont les conséquences sont inévitablement l'arrêt du process avec les répercussions évidentes au niveau production et équipements et potentiellement au niveau de la sécurité.

Pour ces raisons, la surveillance de l'état de fonctionnement et le diagnostic de défauts de ces roulements est devenu un axe fondamental dans la recherche et le développement de solutions en milieu industriel. La fonction principale de la surveillance de l'état est de fournir des connaissances sur le fonctionnement réel de la machine à chaque moment et sans, pour des raisons plutôt économiques, arrêter la ligne de production.

Récemment, on a vu l'émergence de plusieurs techniques, développées et mises en œuvre pour surveiller la santé des roulements en mesurant le bruit, la température, le courant et les vibrations. Il a été démontré que le phénomène physique qu'est la vibration est riche en informations et est très représentatif de l'état de l'ensemble de la machine et de ses éléments. C'est ainsi que la surveillance du paramètre vibration, est retenue comme étant une piste prometteuse pour disposer de données relatives à l'état de fonctionnement de la machine. Les techniques traitant du domaine de la vibration sont très répandues et largement exploitées pour détecter, localiser et distinguer les différents types de défauts, depuis leur création et avant qu'ils ne deviennent critiques et dangereux. Ces défauts peuvent être distribués ou localisés.

Le système de surveillance des vibrations des machines tournantes se base sur un capteur qui envoie le signal de défaut à travers un système d'acquisition de données relié à un ordinateur. L'efficacité de la technique de traitement du signal appliquée, et dont le rôle est d'extraire les

caractéristiques du signal de diagnostic, reste chose déterminante dans l'efficacité de la tâche de surveillance.

Plusieurs techniques sont à mentionner et qui peuvent être utilisées pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements telles que la transformée de Fourier rapide (TFR) ou (FFT), l'analyse cepstrale (AC), la Transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou (STFT), la Distribution de Wigner-Ville (WVD), l'analyse de l'enveloppe (EA), la Transformée en ondelettes continues (TOC) ou (CWT), l'Analyse Multi-résolution en Ondelettes (AMRO) et l'analyse par paquets d'ondelettes (APO) ou (WPT).

Ces outils possèdent différentes caractéristiques, néanmoins, avec quelques contraintes d'une méthode à une autre, telles que les problèmes de la fréquence de résonance, de la bande de filtrage, du compromis de la résolution temps-Fréquence, du choix de l'ondelette mère approprié ainsi que du choix du niveau de décomposition avec sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires au diagnostic du défaut.

Ainsi, l'objectif du travail à mener est d'évaluer l'efficacité des différentes méthodes appliquées dans la surveillance et le diagnostic des défauts de roulements dans les machines tournantes, rechercher et proposer une nouvelle approche plus efficace et à même de s'affranchir des contraintes relatives aux méthodes existantes et autres limitations.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur la maintenance industrielle et les différents types de maintenance. Nous donnons aussi et d'une manière brève un aperçu sur les techniques les plus utilisées dans la surveillance industrielle et ses applications dans le domaine des machines tournantes.

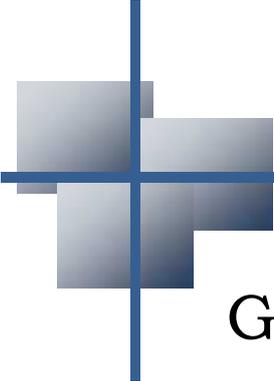
Dans le deuxième chapitre, nous présentons une étude théorique sur la surveillance vibratoire des machines tournantes ainsi que les différentes méthodes de traitement du signal dans ce domaine. Les différents défauts dans les machines tournantes sont, également, introduits dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, on présente les résultats de l'application des différentes techniques de la transformée en ondelettes (TO) telle que la Transformée en Ondelettes Continue (TOC), l'Analyse Multi-résolution en ondelettes (AMRA) et l'Analyse Par Paquets d'Ondelettes (APO); pour la détection et le diagnostic des défauts de roulements. Dans ce même chapitre une recherche d'amélioration de ces méthodes de l'ondelette a été menée.

Une étude comparative est présentée au chapitre quatre. Elle vise l'évaluation des capacités de la nouvelle approche de diagnostic proposée et cela par rapport aux autres méthodes de détection des défauts de roulements telles que transformée de Fourier Rapide (TFR), l'analyse

cepstrale (AC), l'analyse d'enveloppe (AE), la Transformée en Ondelettes Continue (TOC), l'Analyse Multi-résolution en ondelettes (AMRO), l'Analyse Par Paquets d'Ondelettes (APO).

Nous terminons par une conclusion générale sur notre démarche, nos résultats ainsi que les éventuelles perspectives de développement dans ce domaine.



Chapitre I :

Généralités sur la maintenance industrielle

Chapitre I :

Généralités sur la maintenance industrielle

I.1 Introduction

Aujourd'hui, les machines tournantes sont présentes dans d'innombrables applications industrielles, telles que les centrales nucléaires, les usines pétrochimiques, le domaine de l'aéronautique...etc. Leur rôle est si important pour que tout défaut dans ces machines conduirait à des pertes au niveau de la production et des équipements et compromettrait même dans certaines situations la sécurité des travailleurs ou usagers. Pour ces raisons, la maintenance industrielle est devenue un enjeu clef pour la durabilité des machines et des installations mécaniques dont dépend l'accroissement de la productivité des unités de production.

Ce chapitre donne des notions sur la maintenance industrielle et ses différents types. Ainsi qu'un aperçu sur les techniques les plus utilisées et les applications dans la surveillance industrielle des machines tournantes.

I.2 Maintenance

Dans les entreprises, la maintenance est considérée comme fonction stratégique et est définie comme étant un ensemble des actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir un bien industriel en bon état de marche durant un cycle de vie ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [1-3].

Retour et al [4] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles: les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (voir Figure I-1).



Figure I-1 : Contenu de la fonction maintenance

Avec des processus de fabrication plus exigeants et les avancées technologiques enregistrées, donnant lieu à des systèmes de plus en plus performants tout en étant complexes, la notion de maintenance ne pouvait restée figée et a du connaitre une certaine évolution. Cette dernière peut être retracée à travers trois générations depuis les années 40 (voir Figure I-2) [5].

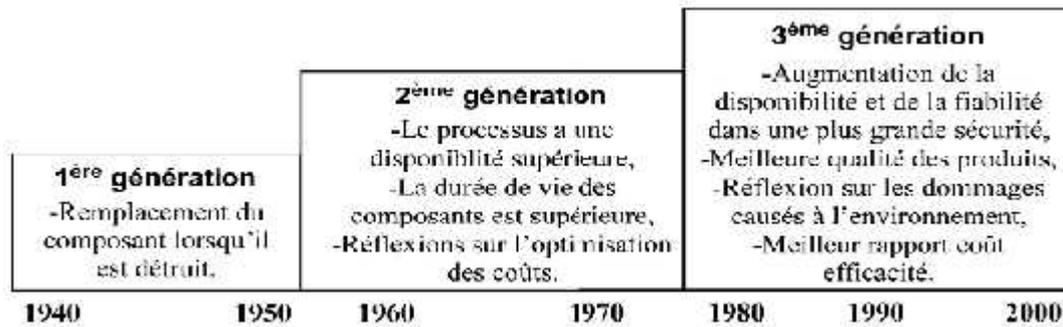


Figure I-2 : Evolution de la maintenance depuis 1940

I.2.1 Différents types de maintenance

Selon l'évolution de la maintenance, on distingue trois types de maintenance [6-8] comme le montre la figure (I-3):

- La maintenance corrective (MC) .
- La maintenance préventive systématique (MPS) .
- La maintenance préventive conditionnelle (MPC).

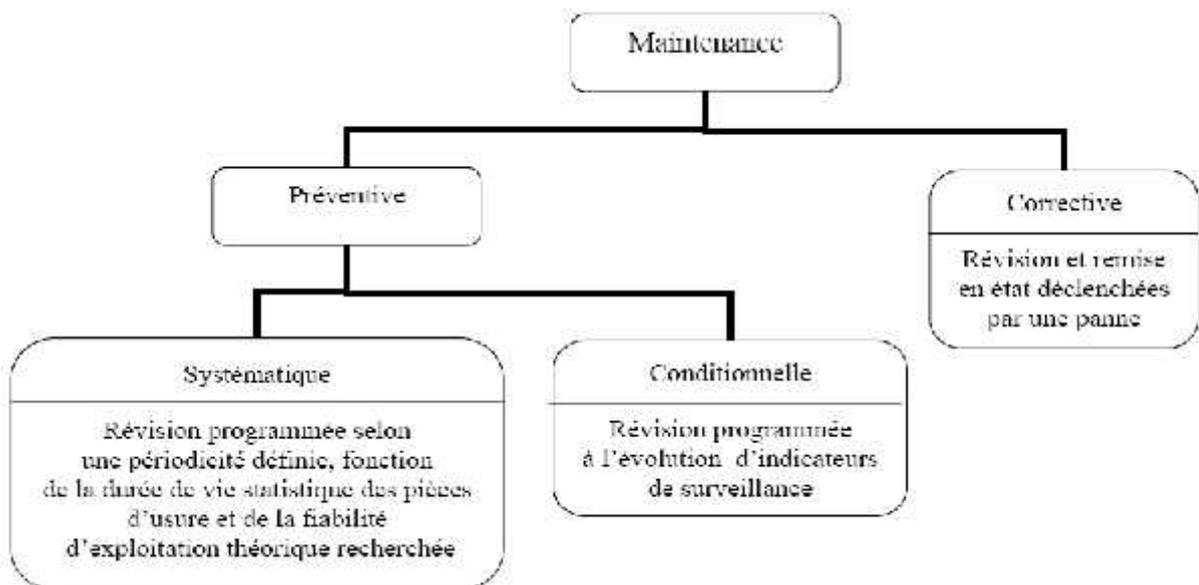


Figure I-3: Différents types de maintenance

I.2.1.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective (appelée également réactive) est exécutée après détection d'une panne et est destinée à remettre un bien dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise. Ainsi l'application d'actions relevant de la maintenance corrective vient en réponse directe à l'apparition d'une défaillance [6-8].

La figure I-4 présente ces activités qui touchent généralement deux types d'intervention :

- Les interventions palliatives qui remettent le système en état de fonctionnement provisoire ;
- Les interventions curatives permettant de réparer le système d'une manière définitive.

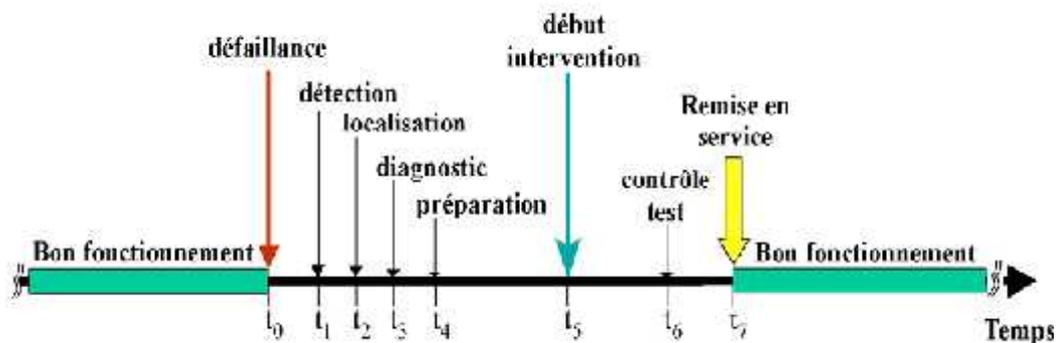


Figure I-4 : Principe de la maintenance corrective

I.2.1.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive dont le but est de minimiser l'apparition des défaillances des équipements, est exécutée avant la détection de toute panne [6-8]. La continuité du service s'en voit, ainsi, assurée, car ce type de maintenance permet :

- ✓ La diminution du temps d'arrêt dû aux pannes ;
- ✓ L'augmentation de la durée de vie des équipements ;
- ✓ La diminution ou même par annulation des défaillances en service ;
- ✓ L'élimination des causes d'accidents dus aux dépannages ;
- ✓ La décision d'opérations de révision au moment des arrêts de travail.

Parmi les techniques de maintenance préventive, on distingue deux types de maintenance (systématique et conditionnelle).

I.2.1.2.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un échéancier fixé sur la base de la durée de vie minimale des composants mécaniques ou électriques d'une machine [6-8]. En d'autres termes, les interventions sont effectuées à des dates planifiées à l'avance, avec une périodicité dépendant de différents facteurs d'usures des matériels (voir figure I-5).

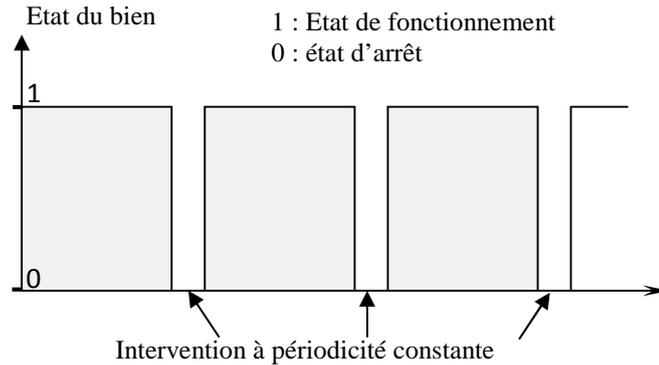


Figure I-5 : Principe de la maintenance préventive systématique

I.2.1.2.2 Maintenance préventive conditionnelle (prédictive)

La maintenance préventive conditionnelle (MPC) s'intéresse plus étroitement à l'état du système. Tout en étant, comme la précédente, exécutée à titre préventif, elle reste conditionnée par l'état de la machine. Ainsi, ce type de maintenance s'appuie sur la surveillance du process et/ou des paramètres significatifs (indicateur vibratoire, température, ..., etc) de son fonctionnement pour décider et intégrer des actions conséquentes [6-9]. Cette définition est illustrée dans la figure I-6.

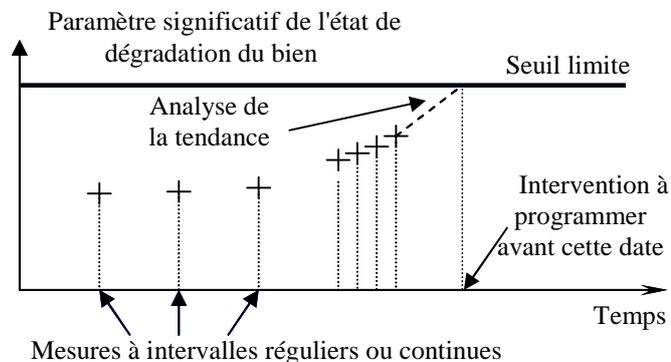


Figure I-6 : Principe de la maintenance préventive conditionnelle

Devant la diversité et les spécificités des systèmes mécaniques, l'application de politique de maintenance préventive conditionnelle dépend des outils disponibles ou à développer et qui doivent être appropriés. La politique adoptée et les moyens mis en œuvre sont à même de permettre à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement et de décider des interventions de réparation (voir Figure I-7).

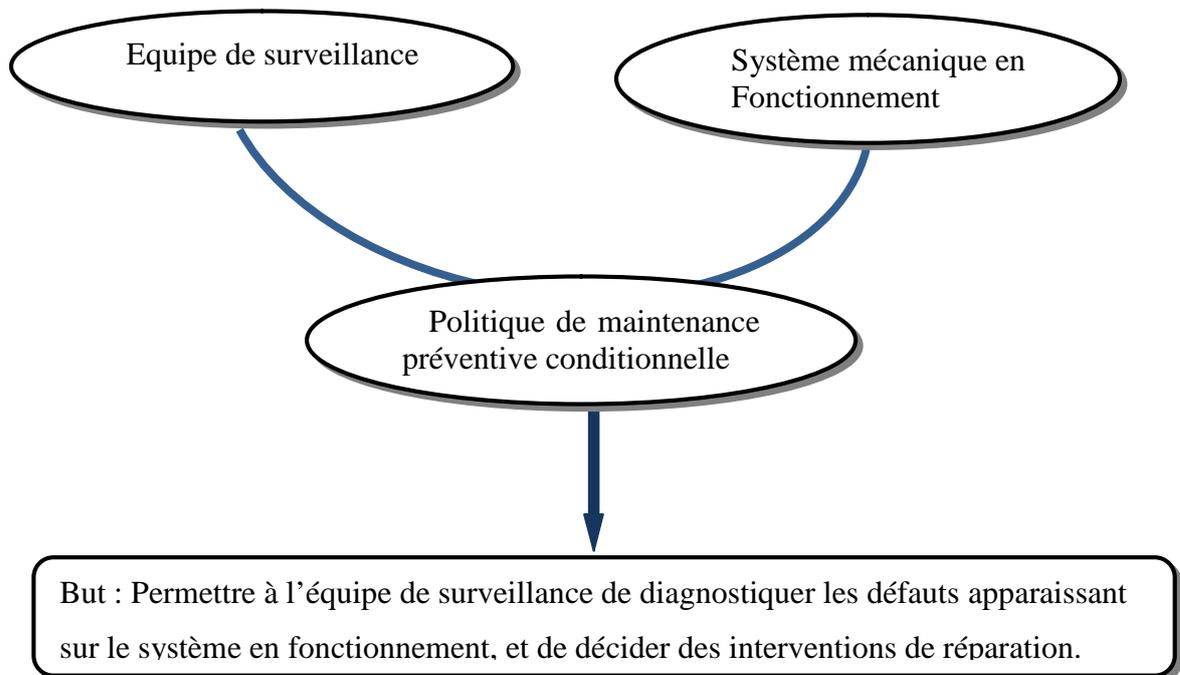


Figure I-7 : Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle

I.2.2 Principaux Avantages de la M. P. C

Répondant au critère d'optimisation de process et au souci de rationalisation des ressources, tous types confondus, la description décrite ci-dessus, semble être très appropriée, notamment lorsqu'il s'agit de process importants et/ou des systèmes complexes. On compte parmi les avantages de la maintenance préventive conditionnelle [6-9], ce qui suit:

- Diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs
- Réparation des machines seulement lorsqu'elles le nécessitent.
- Augmentation de la disponibilité des équipements.
- Suppression des arrêts systématiques.
- Limitation de la gravité des réparations.
- Intervention plus ciblée (localisation préalable des pannes).

- Réduction des coûts de réparation.
- Amélioration de la sécurité.
- Approvisionnement des pièces de rechange selon les besoins réels.

Le choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production est illustrée dans la figure I-8.

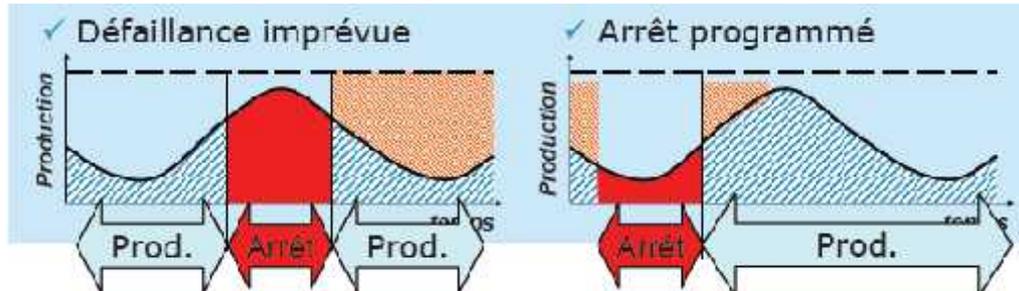


Figure I-8 : Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production

I.2.3 Choix de type de maintenance

Le choix de la mise en place de la maintenance dans une entreprise est résumé dans le schéma de la figure I-9 [10-12]. La rentabilité demeure l'élément déterminant. Il est parfois, économiquement, judicieux d'attendre une panne pour avoir recours à une maintenance curative avec la maîtrise préalable de cette dernière, alors qu'il peut s'avérer plus rentable dans d'autres cas de privilégier prédiction et prévention. Les entreprises opèrent donc des choix parmi les différents types de maintenance en fonction de multiples éléments techniques, économiques, et autres facteurs internes ou externes [10-12]:

- La fréquence des défaillances cycliques ou aléatoires des équipements ;
- Les aptitudes et compétences du personnel de maintenance ou des sous-traitants ;
- Les politiques et modes d'organisation du travail ;
- La position concurrentielle sur le marché ;
- Les produits...

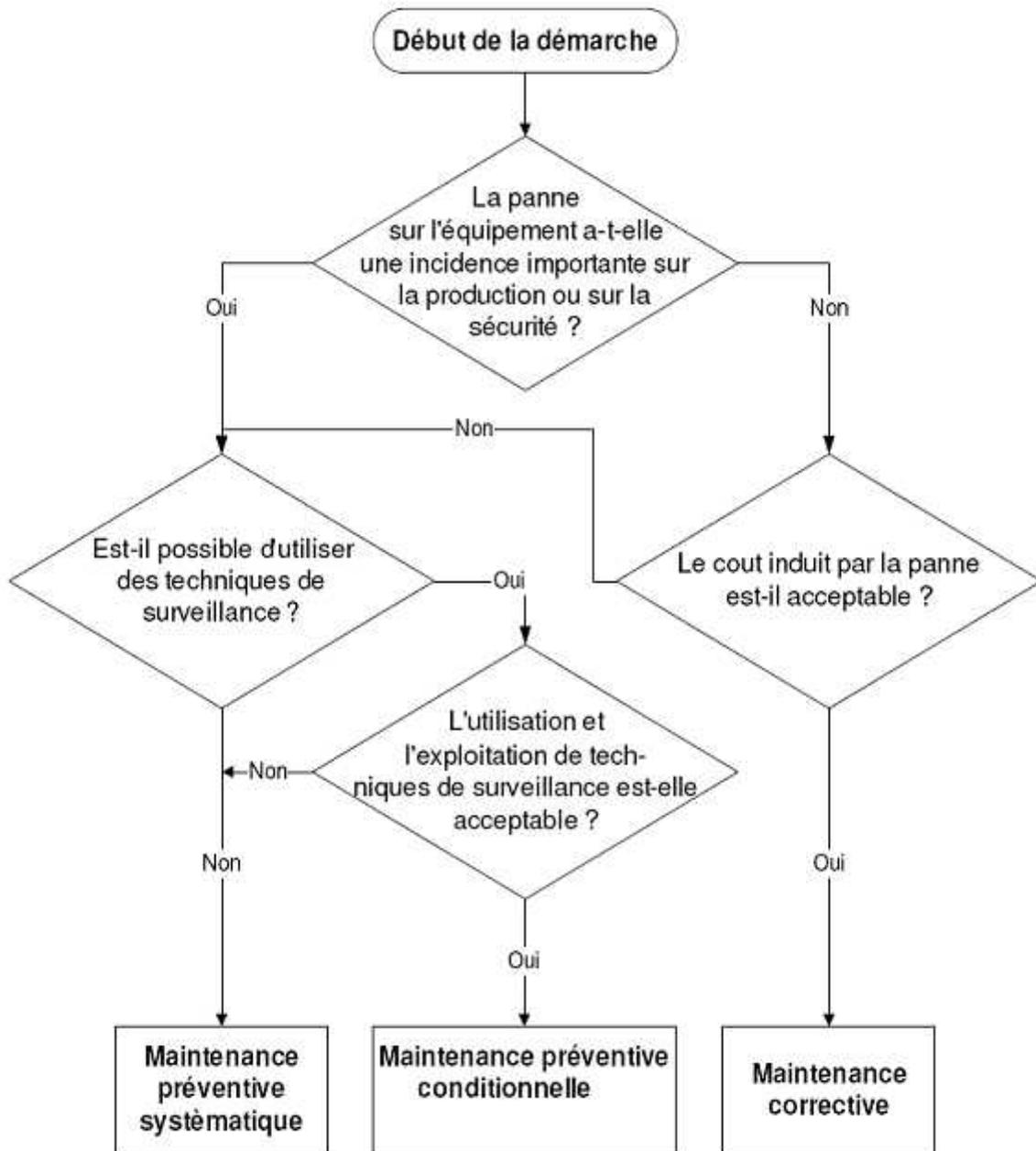


Figure I-9 : Choix du maintenance

I.3 Surveillance

Elément de la maintenance préventive conditionnelle, le rôle principal de la surveillance de des machines tournantes est de fournir, de manière continue, des connaissances sur leurs états sans arrêter la ligne de production. L'objectif à ce niveau est d'améliorer la disponibilité et la sécurité, ainsi que la minimisation des pertes dans la production [12-13].

La figure I-10 représente l'architecture générale d'un système de Surveillance en ligne.

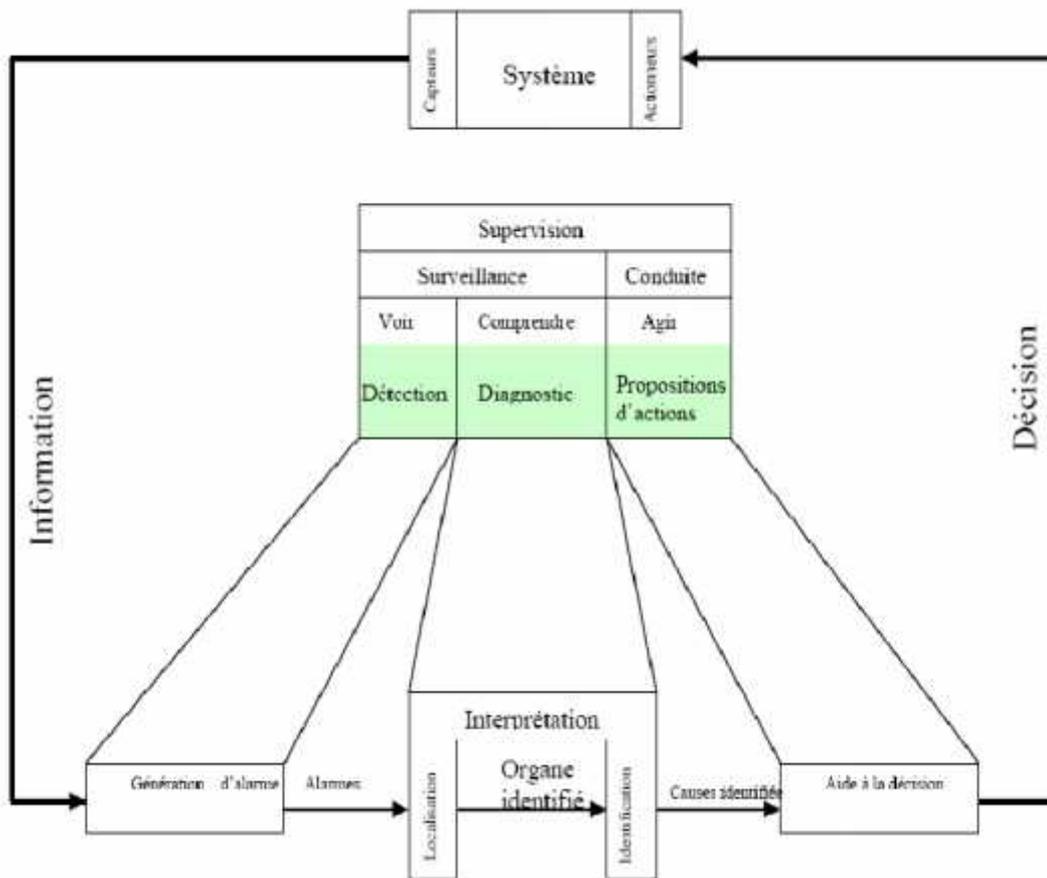


Figure I-10 : Architecture générale d'un système de surveillance en ligne

I.3.1 Etapes en processus de surveillance

La surveillance se compose de deux-phases principales qui sont la détection et le diagnostic (voir la figure I-11) [14]:

- **La détection** : Dont le but est de déterminer la présence ou non d'un défaut affectant le procédé. Elle consiste à analyser et déceler ses effets sur le système (symptômes).
- **Le diagnostic** : Se basant sur les défauts détectés, cette étape consiste en :
 - Une *localisation* : Qui sert à déterminer le type de défaut affectant le procédé en moyen d'indications relatives à l'élément en défaut ;
 - Une *identification* : Qui sert à déterminer exactement la cause de ces symptômes en Identifiant la nature du défaut.

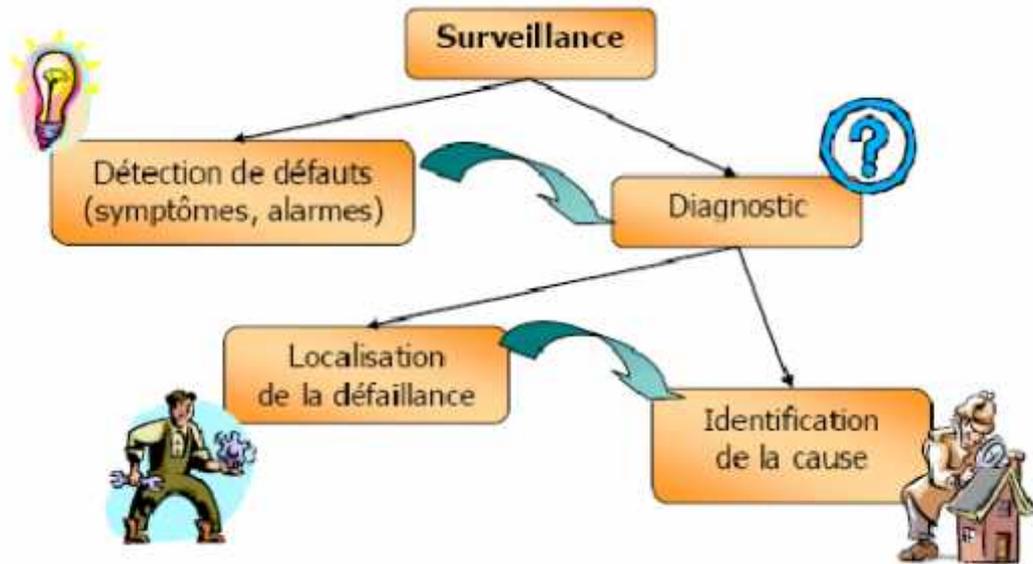


Figure I-11: Composantes de la surveillance industrielle

I-3.2 Types de surveillance

Selon leur importance et leur criticité, les machines peuvent nécessiter un système de surveillance en ligne doté de fonctions de diagnostic ou un système de surveillance hors ligne, tel est le cas des machines simples comme les pompes ou les ventilateurs. On distingue fondamentalement deux types de surveillance (voir figure I-12) [15-16].



Figure I-12 : Les types de surveillance des machines

I-3.2.1 Surveillance "On-line" ou suivi continu

Ce type de surveillance est utilisé en permanence sur des machines spécifiques et dont il surveille constamment les états de fonctionnement par la mesure en continu des paramètres physiques notamment ceux à évolution rapide tels que vitesse, traction, vibrations,..etc. Ainsi, il joue un rôle important dans l'efficacité de la conduite de process, générant immédiatement, dans la salle de contrôle [15-16], un signal d'alarme lors d'un changement soudain de l'état de la machine. Cette technique se base, généralement, sur un diagnostic dit à base de modèles qui repose sur une modélisation comportementale et structurelle du système à diagnostiquer. Son principe consiste à faire une comparaison entre le comportement prédit issu d'un modèle de représentation (de bon fonctionnement) et le comportement réellement observé. Cette comparaison permet de détecter les incohérences afin de déduire les causes de défauts. Le maintien d'un bon fonctionnement de l'ensemble passe donc par la mise en place des outils de détection des défaillances éventuelles et des systèmes de commande robustes.

La figure I-13 représente un système de surveillance en ligne[15-16].

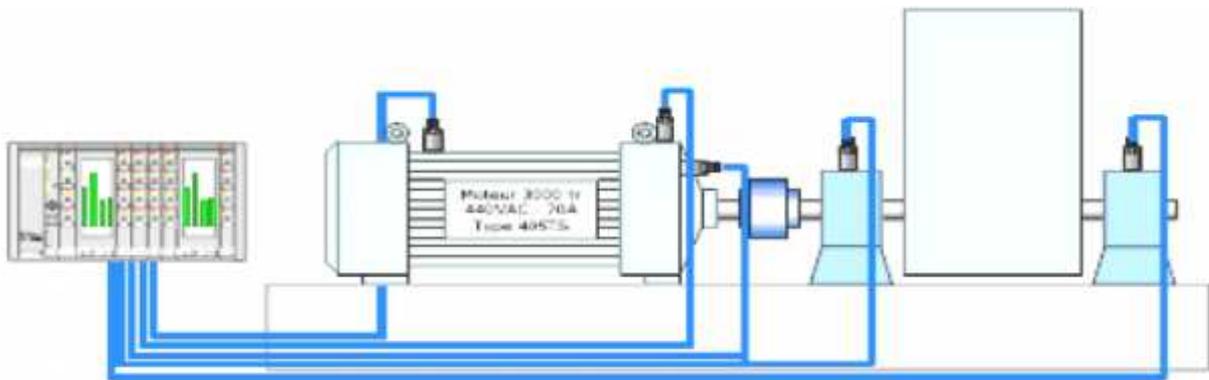


Figure I-13 : Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu

I-3.2.2 Surveillance "off-line" (hors ligne) ou suivi périodique

Avec ce type de surveillance, les mesures, prélèvements, vérifications sont effectués à des moments préétablis et à intervalles réguliers. En thermographie infrarouge ou en analyse d'huiles, par exemple, où l'évolution du paramètre physique est plutôt lente, la surveillance est nécessairement périodique [15-16].

La figure I-14 représente un système de surveillance off-line ou suivi périodique [15-16].

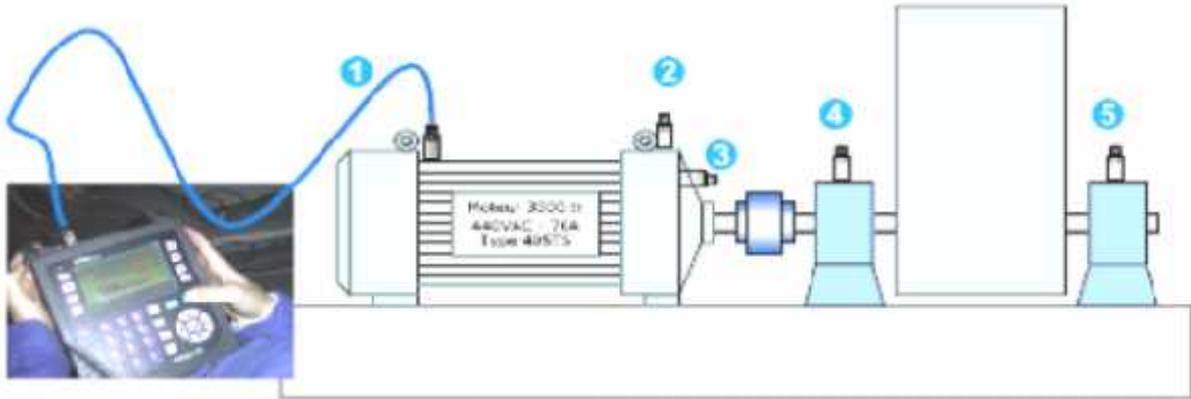


Figure I-14 : Surveillance off-line ou suivi périodique

I-3.3 Le Choix du type de surveillance

Le choix du type de surveillance dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Les questions déterministes sur le choix du type de surveillance sont résumées sur la figure I-15 [15-16].

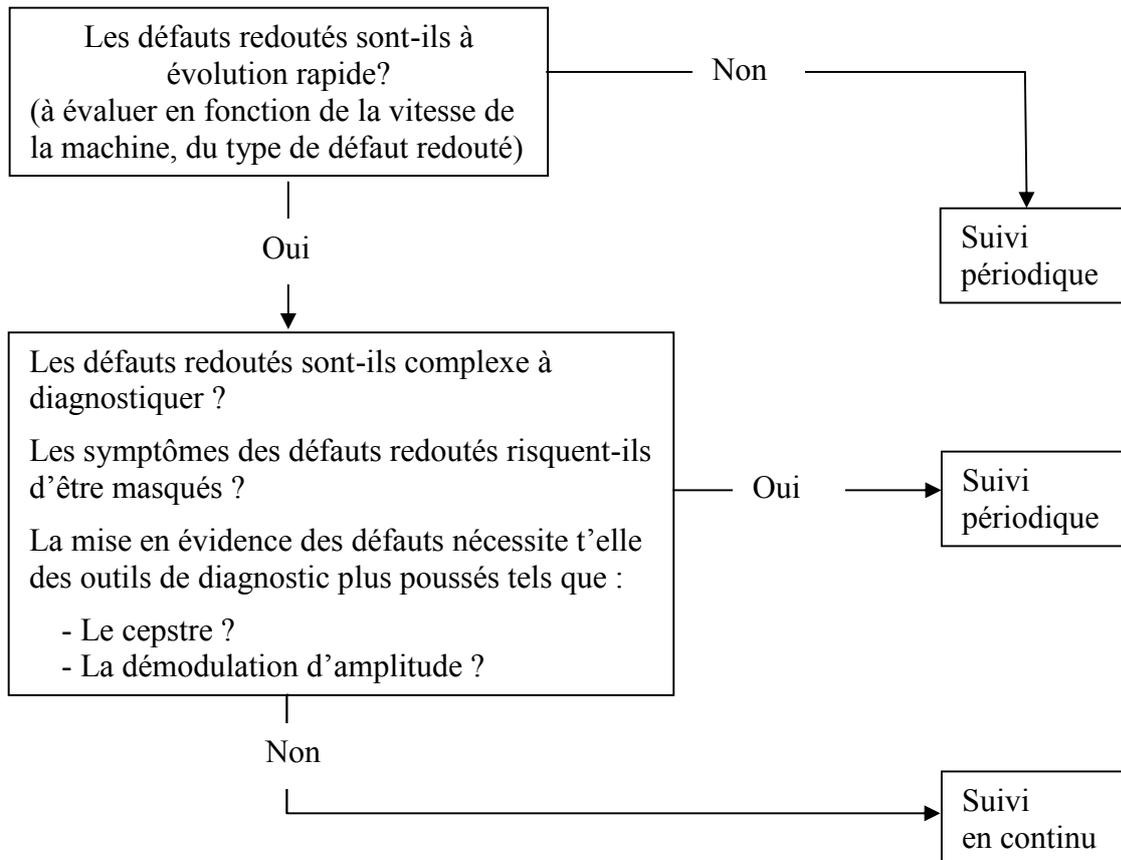


Figure I-15 : Le choix du type de suivi

I-3.4 Techniques en surveillance des machines tournantes

Aujourd'hui, plusieurs techniques peuvent être employées pour surveiller l'état des machines tournantes par l'analyse des vibrations, du bruit, de la température, du courant, ..etc [17-19].

Les différentes techniques de la surveillance des machines tournantes est illustrée dans la figure I-16.

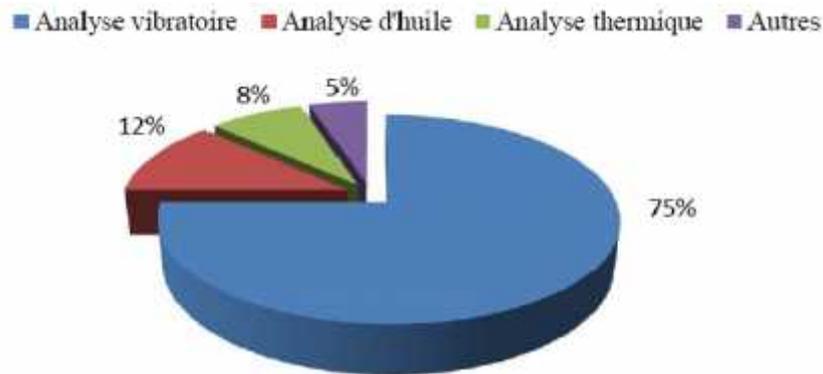


Figure I-16 : Différentes techniques de la surveillance des machines tournantes

I-3.4.1 La thermographie infrarouge

Cette technique permet de mesurer la température de composants sans contact . Elle peut être utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement.

La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée [17-19].

Le principe de l'analyse thermographique est illustrée dans la figure I-17.

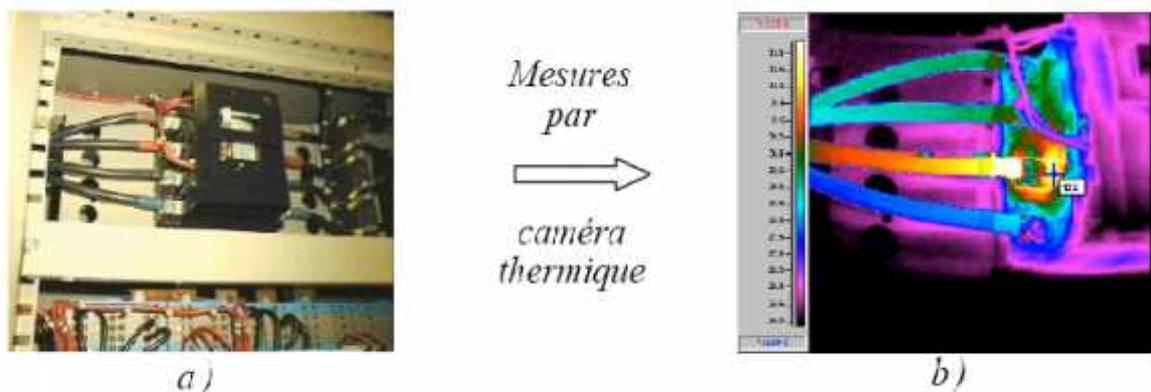


Figure I-17 : Principe de l'analyse thermographique : a) Image visible d'un disjoncteur électrique, b) Visualisation d'un défaut de connexion sur l'image thermique

I-3.4.2 L'analyse des huiles

L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en voit affectée.

L'analyse d'huile est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermique, etc.). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (recherche de particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement [17-19].

I-3.4.3 L'analyse vibratoire

La surveillance vibratoire qui s'adapte le plus aux composants mécaniques des machines tournantes en fonctionnement est la technique la plus utilisée dans l'industrie. Elle permet la détection de la majorité des défauts susceptibles d'apparaître. Les études et analyses menées dans ce domaine ont, non seulement, montré la présence permanente de la vibration dans les machines en cours de fonctionnement, mais encore, l'existence d'une forte corrélation entre ce comportement et l'état de la machine. Ainsi plus l'état de détérioration de la machine est avancé plus les niveaux de vibration sont importants [17-19].

Le principe de l'analyse thermographique est illustrée dans la figure I-18.

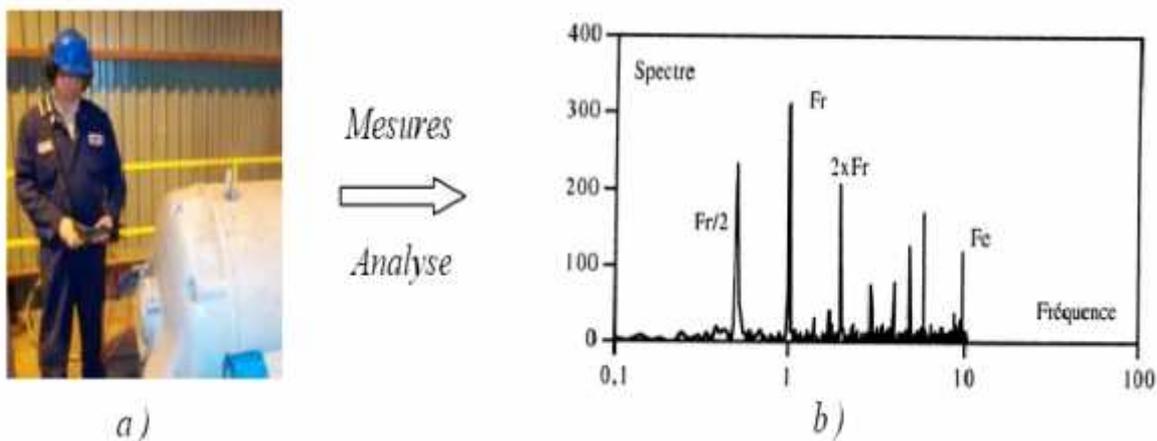


Figure I-18 : Principe de l'analyse vibratoire : a) Mesures des vibrations, b) Représentation du spectre vibratoire

I-3.4.4 L'analyse acoustique ou par Ultrasons

Pour des applications spécifiques et la recherche de défauts bien précis, on retrouve ces deux méthodes, dont la première consiste en une détection de tout bruit anormal en moyen de microphones placés à une certaine distance de l'équipement, tandis que la deuxième est

dédiée à la détection de défauts dont la signature est de faible amplitude et de haute fréquence tel qu'un début de dégradation d'un roulement [17-19].

I-3.5 Choix d'outils de surveillance

Tenant compte des impératifs du process, tel qu'une chaîne de production, de son type, de sa complexité et autres conditions de l'environnement, Le choix d'une technique de surveillance pour le diagnostic, la localisation et l'identification d'une défaillance revêt une grande importance et se doit d'être le plus approprié. Ainsi, en fonction de ces considérations on pourra opter pour un ou plusieurs choix pour un type de surveillance [20-21]. Le tableau I-1 donne un aperçu sur les critères pris en compte pour le choix de l'outil de surveillance.

Tableau I-1: Choix de l'outil de surveillance

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de défauts à un stade précoce - Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi - Autorise une surveillance continue - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> -Spectres parfois difficiles à interpréter - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> -Ne permet pas de localiser précisément le défaut - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité), etc.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation - Interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles - Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic souvent difficile à réaliser - Problèmes de répétabilité des mesures 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

I-3.5.1 Choix de l’outil de surveillance suivant les défauts potentiels

Le tableau I-2 illustre le choix de l’outil de surveillance suivant les défauts potentiels [20-21].

Tableau I-2: Choix de l’outil de surveillance suivant les défauts potentiels

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d’huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s’il y a usure)	Oui (s’il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s’il y a usure)	Oui (s’il y a un échauffement)	Oui (s’il y a une résonance)
Défauts spécifiques aux roulements	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts spécifiques aux engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d’alignement	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés à la lubrification : - dégradation de la qualité de l’huile	Non (sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
manque d’huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

I-3.6 Terminologies utilisées en surveillance

Différentes Terminologies sont utilisées en surveillance, tel que [22-26] :

- **Système** : un est ensemble déterminé d’éléments discrets (composants, constituants) interconnectés ou en interaction.
- **Processus** : un processus est un système, équipement ou machine. Un processus est un ensemble d’éléments ou composants réagissant entre eux et avec le milieu extérieur,

susceptible d'évoluer dans le temps afin d'accomplir une activité clairement définie et générer de la valeur ajoutée.

- **Composant** : un composant industriel est un organe technologique qui forme une partie du processus industriel.
- **Dégradation** : une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.
- **Défaut** : est une déviation par rapport aux conditions acceptables ou normales d'un paramètre caractéristique du système
- **Panne** : une panne est l'état d'un système incapable d'assurer le service spécifié à la suite d'une défaillance.
- **Résidu** : est un signal potentiellement indicateur de défauts.

I.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la maintenance industrielle pour l'importance que présente cette fonction en entreprise. A impact direct sur les taux de production et la qualité des produits, sa maîtrise permet la minimisation des autres postes de dépense pour l'industriel. Nous en avons, ainsi, présenté, dans ce premier chapitre, les concepts, et exposé ses différents types avec les techniques de surveillance relevant de ce domaine. Nous avons, également, donné un aperçu sur les différentes stratégies de surveillance, en mettant en évidence les inconvénients et les avantages de chacune d'elles-

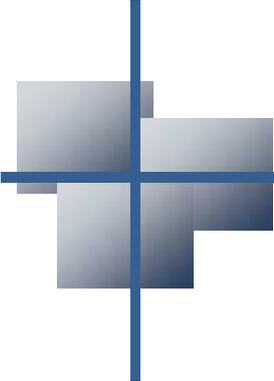
Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des notions de base de l'analyse vibratoire, ainsi que les différents défauts des machines tournantes.

I.5 Références bibliographiques

- [1] Afnor, "Terminologie de la maintenance", NF EN 13306 X 60-319, 2001.
- [2] V. Zille, "Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants", Thèse de doctorat l'Université de Technologie de Troyes , France, 2009.
- [3] H .Mahgoun, "Analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances",Thèse de doctorat , Université de ferhat abbas – setif , Algerie, 2013.

- [4] D. Retour, M. Bouche and V. Plauchu, “ OÙ va la maintenance industrielle ? ”, Problèmes économiques No. 2.159, pp. 7-13, 1990
- [5] P. Vrignat, “Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne”, Thèse de doctorat l'Université d'Orléans, France, 2010.
- [6] M. Eltabach, “ Surveillance des équipements industriels en fonctionnement” Journée Maintenance prévisionnelle, France, 2013.
- [7] X.Chimentin" Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes" Thèse de doctorat de l'Université de reims champagne ardenne , France, 2007.
- [8] O. Djebili, " Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement" Thèse de doctorat universite de reims champagne ardenne, France, 2013.
- [9] A. Kabouche, " Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué" Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, France, 2011.
- [10] D.Halimi, " Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures " Thèse de Doctorat universite m'hamed bougara-boumerdes , algerie, 2014.
- [11] V G. Duchemin, " Maintenance des machines et des moteurs ", Technique de l'ingénieur Référence BM 4 188 ,2006.[
- [12] N. Tandon, A. Parey , "Condition Monitoring of Rotary Machines",Springer Series in Advanced Manufacturing , Vol.5, pp. 109-136,2006.
- [13] A. Boudiaf, S. Bouhouche, A.K. Moussaoui, S. Taleb, "An effective method for bearing faults diagnosis", In: IEEE Proceeding of 3rd International Conference on Control Engineering & Information Technology, pp. 1–6, 2015
- [14] D. Racoceanu, " Contribution a la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artérielle", These de Habilitation a diriger des recherches de l'universite de l'Université de FRANCHE-COMTÉ de Besançon, France,2006.
- [15] B. Samira, " contribution a l'optimisation de la maintenance predictive Par l'utilisation du logiciel omnitrend (systeme on line) Cas : cimenterie hamma bouziane", Thèse de magister universite de Mentouri de Constantine, Algerie, 2008.

- [16] M. Zemouri, "contribution a la surveillance des systemes de production a l'aide des reseaux de neurones dynamiques : application a la e-maintenance", These de doctorat de l'universite de Franche-Comte, France, 2003.
- [17] T. Bensana, " Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur", These de Magister universite de Annaba, Algerie, 2008.
- [18] C. Lurette, " developpement d'une technique neuronale auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives. Application a la supervision d'une presse hydraulique", These de doctorat des Sciences et Technologies de lille, France, 2003.
- [19] C. Rahmoune, " Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques", Thèse de Magister universite m'hamed bougara-boumerdes , Algerie,2011.
- [20] M .Lyons, S Adams, M. Woloshynowych, , C. Vincent, "Human reliability analysis in healthcare: A review of techniques", International Journal of Risk & Safety in Medicine, Vol.16, pp. 223–237, 2004.
- [21] J .Moubray Reliability, " Centered Maintenance", RCM, edition 2000.
- [22] M. Demers, " developpement d'une methodologie d'optimisation de la maintenance par la fiabilite pour les systemes complexes: application a un groupe electrogene diesel de secours ", Thèse de Magister universite m'hamed bougara boumerdes , algerie, 2011.
- [23] M. Fathi Karoui, " Surveillance des processus dynamiques événementiels", Thèse de doctorat l'universite de grenoble, France, 2011.
- [24] K. M. Pekpe, "Identification par les techniques des sous-espaces application au diagnostic", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2004.
- [25] H. Derbel, " Diagnostic à base de modèles des systèmes temporises et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides", Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier – Grenoble, France, 2009.
- [26] A .Takrouni Hedfi, " Surveillance par observateurs des systèmes dynamiques hybrides", Thèse de Doctorat, Université de lille, France, 2013.



Chapitre II :

Surveillance vibratoire

Chapitre II :

Surveillance vibratoire

II.1 Introduction

De nos jours, plusieurs techniques sont employées pour la surveillance de paramètres tels que le bruit, la température, le courant électrique, les vibrations...etc, dans différentes installations. Il est montré dans la littérature que la technique basée sur la surveillance vibratoire est l'une des plus efficaces de par sa capacité à détecter, localiser et distinguer les différents types de défauts dès leurs créations, et avant qu'ils ne deviennent critiques et dangereux. Ces défauts peuvent être distribués ou localisés. Chaque machine a une signature de vibration spécifique et qui est liée à sa conception et son état. Si ce dernier change, il en sera de même pour la signature-vibratoire. Ce changement peut être utilisé pour détecter tous défauts naissants. Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude théorique sur la surveillance vibratoire des machines tournantes, les outils de surveillance vibratoire, ainsi que les différents défauts des machines tournantes.

II.2 Vibration mécanique

II.2.1 Définition d'une vibration

La norme ISO 2041 « vibrations et chocs - vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration comme étant la variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Ce déplacement par rapport à cette position peut être provoqué par une force mécanique non désirable. Ainsi, un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il oscille autour de sa position d'équilibre [1-6].

II.2.2 Caractéristiques d'une vibration

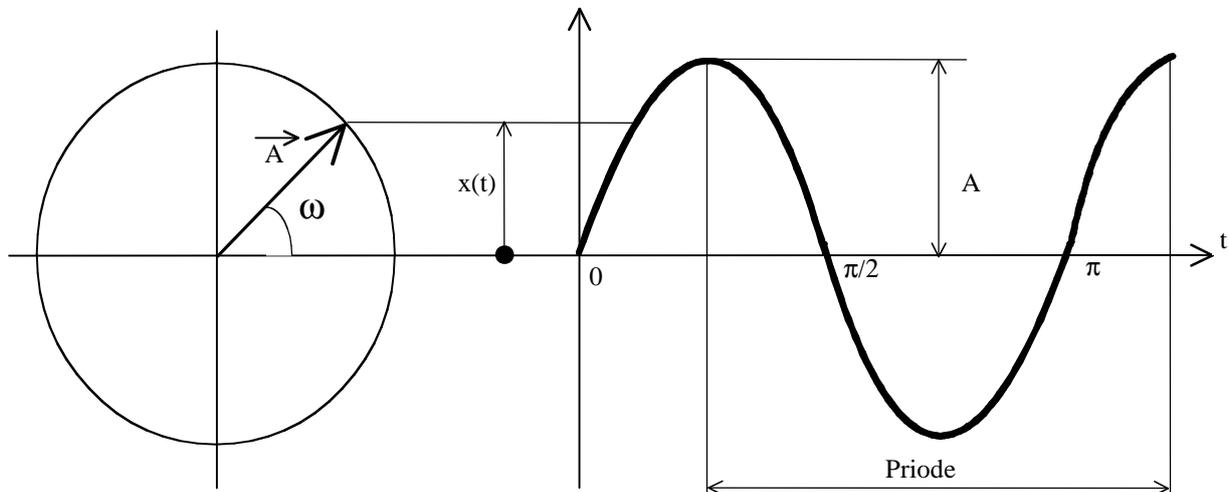
Une vibration se caractérise principalement par, son amplitude, sa période et sa fréquence (voir Figure II-1) [1-6].

- **Son amplitude A** qui est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre.
- **Sa période T**, durée correspondant à l'intervalle de temps entre deux positions successives identiques. La période se note **T** et s'exprime en **seconde (s)**.
- **Sa fréquence f**, qui est le nombre de cycles par seconde, et qui est l'inverse de la période T. La fréquence se note **f** et s'exprime en **Hertz (Hz)**. ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).

La fréquence s'exprime en fonction de la période par la relation suivante : $f = \frac{1}{T}$

La forme la plus simple d'un signal vibratoire est un signal périodique que l'on représente sous la forme d'un mouvement sinusoïdal. Le mouvement sinusoïdal peut être représenté par la projection sur un axe vertical d'un vecteur tournant \vec{A} ayant une vitesse angulaire constante ω . La rotation de ce vecteur provoque une variation de sa projection x, dont l'équation est :

$$x(t) = A \times \sin(\omega t) \quad (\text{II-1})$$



Période $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Fréquence $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

Figure II-1 : Représentation d'une vibration sinusoïdale

II.2.3 Types des signaux vibratoires

On compte plusieurs types de signaux vibratoires, comme les signaux périodiques, stationnaires, non stationnaires, non linéaires, déterministes, etc. La figure II-2 représente les différents types de ces signaux [1-6].

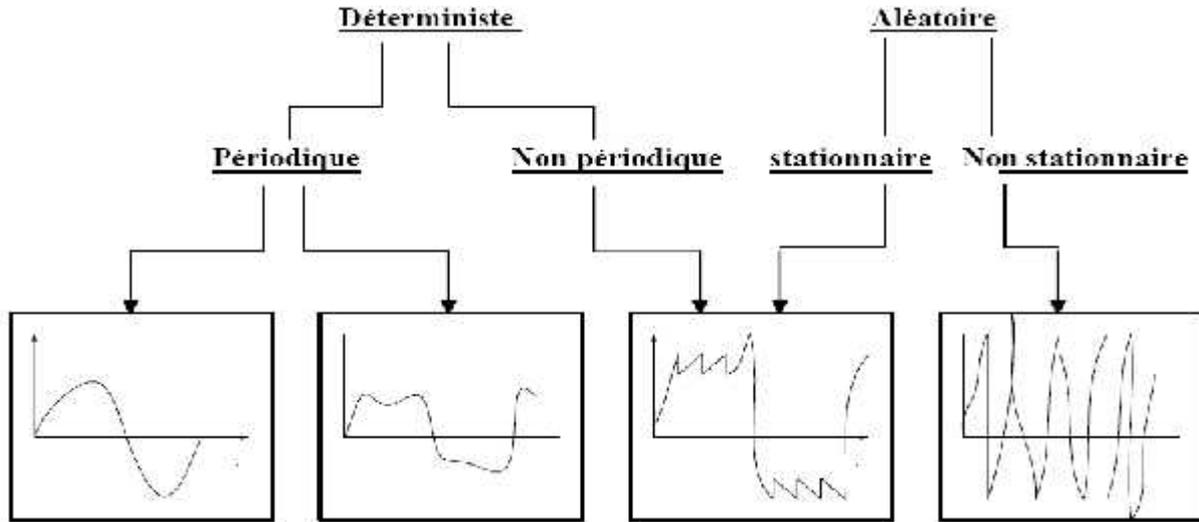


Figure II-2 : Types de signaux vibratoires

II.2.3.1 Signaux déterministes

Un signal est appelé déterministe s'il est possible de déterminer son amplitude pour tout instant « t ». Il peut être périodique ou non [1-6].

II.2.3.1.1 Signaux périodiques

Le signal est dit périodique, si la propriété suivante est vérifiée : $x(t+nT)=x(t)$ pour toute valeur de n. D'une manière générale, , comme l'illustre la figure II-3.

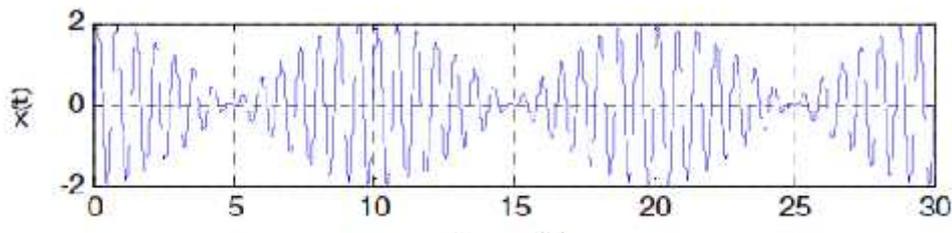


Figure II.3: Signal périodique

Les différents signaux périodiques peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

- **Signaux périodiques harmoniques** : est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde, comme l'illustre la figure II-4.

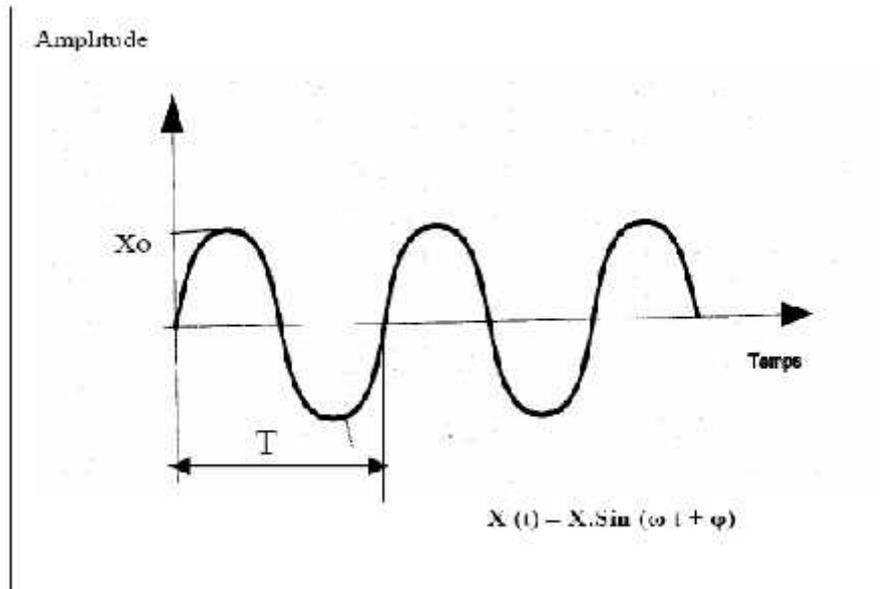


Figure II-4 : Représentation d'un signal harmonique

- **Signaux périodiques non harmoniques** : est une somme de signaux harmoniques de différentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la figure II-5.

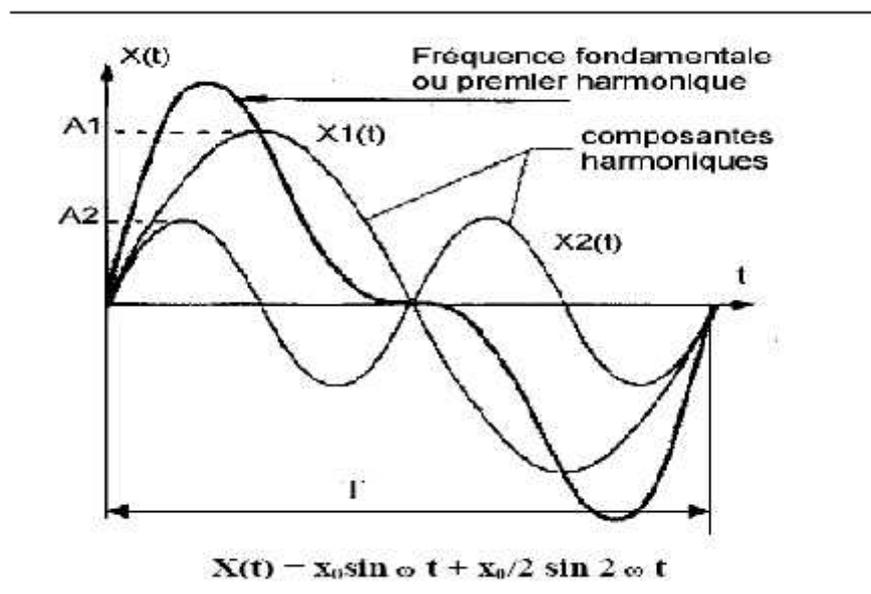


Figure II-5 : Représentation d'un signal périodique non harmonique

II.2.3.1.2 Signaux Non périodiques

Un signal est dit non périodique s'il n'est pas périodique, mais, existe à tout instant « t ».

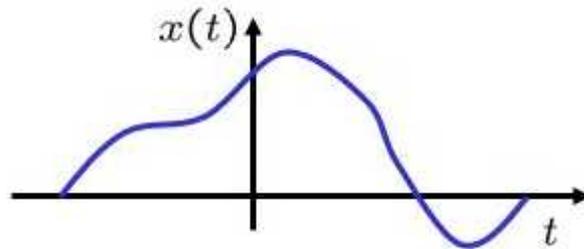


Figure II-6 : Représentation d'un signal non périodique

II.2.3.1.3 Signaux aléatoires

Les signaux aléatoires sont caractérisés par le fait qu'il n'est pas possible de prédire leurs amplitudes à un instant donné. Ils sont classés en deux types : stationnaires dont le contenu fréquentiel ne change pas dans le temps et non stationnaires dans le cas contraire [1-6].

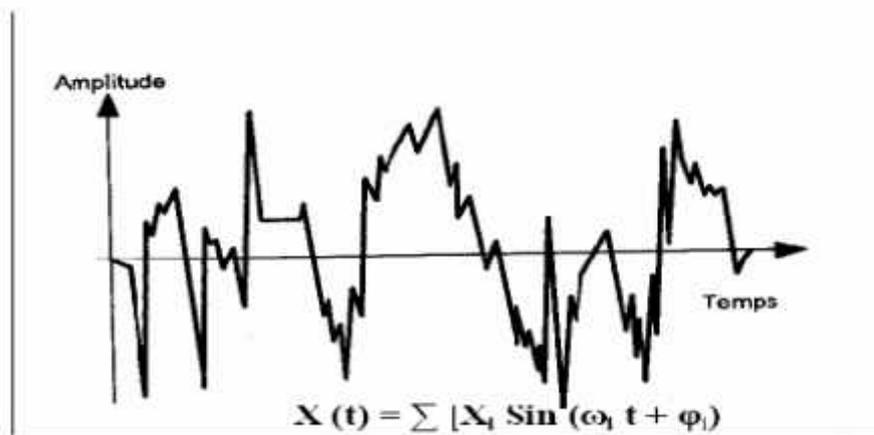


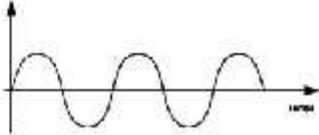
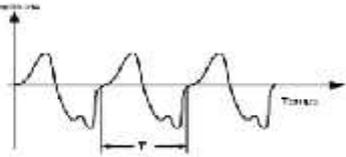
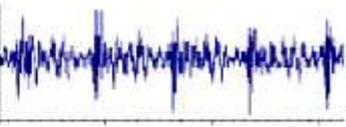
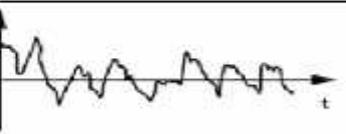
Figure II-7 : Représentation d'un signal aléatoire

- **Stationnaires** : ce sont des signaux dont les caractéristiques statistiques sont indépendantes de l'origine du temps.
- **Non stationnaires** : ce sont des signaux qui ont les caractéristiques contraires à celles des stationnaires.

II.2.3.2 Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature

Le tableau II-1 illustre la représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature.

Tableau II-1 : Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature

Nature des vibrations	Représentation temporelle des vibrations	Causes possible
A : Périodique de type sinusoïdal simple		balourd
B : Périodique de type sinusoïdal complexe		Engrènement
C : Périodique de type impulsionnel		Ecaillage des roulements
D : Aléatoire de type impulsionnel		Défauts de lubrification sur des roulements cavitation

II.2.4 Les grandeurs de mesure d'une vibration

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes [1-6] :

- **Déplacement**

$$d = A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (\text{II-2})$$

- **Vitesse** (variation du déplacement par unité de temps)

$$v = A2\pi ft \cos(2\pi ft) \quad (\text{II-3})$$

- **Accélération** (variation de la vitesse par unité de temps)

$$a = -A(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) \quad (\text{II-4})$$

La figure II-8 illustre les grandeurs associées à une vibration.

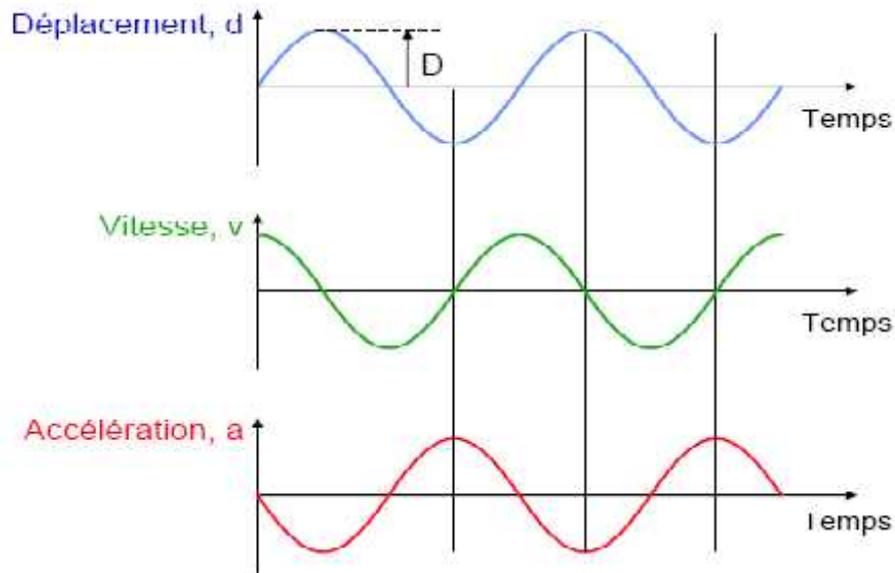


Figure II-8 : Grandeurs associées à une vibration

II.2.4.1 Choix des grandeurs de mesure

On choisira préférentiellement :

- La grandeur déplacement pour détecter des phénomènes à basse fréquence $F < 100$ Hz;
- La grandeur vitesse pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence $F < 1000$ Hz.
- La grandeur accélération pour détecter des phénomènes se situant à haute fréquence $0 < F < 20000$ Hz.

La Figure II-10 illustre la relation accélération, vitesse, déplacement.

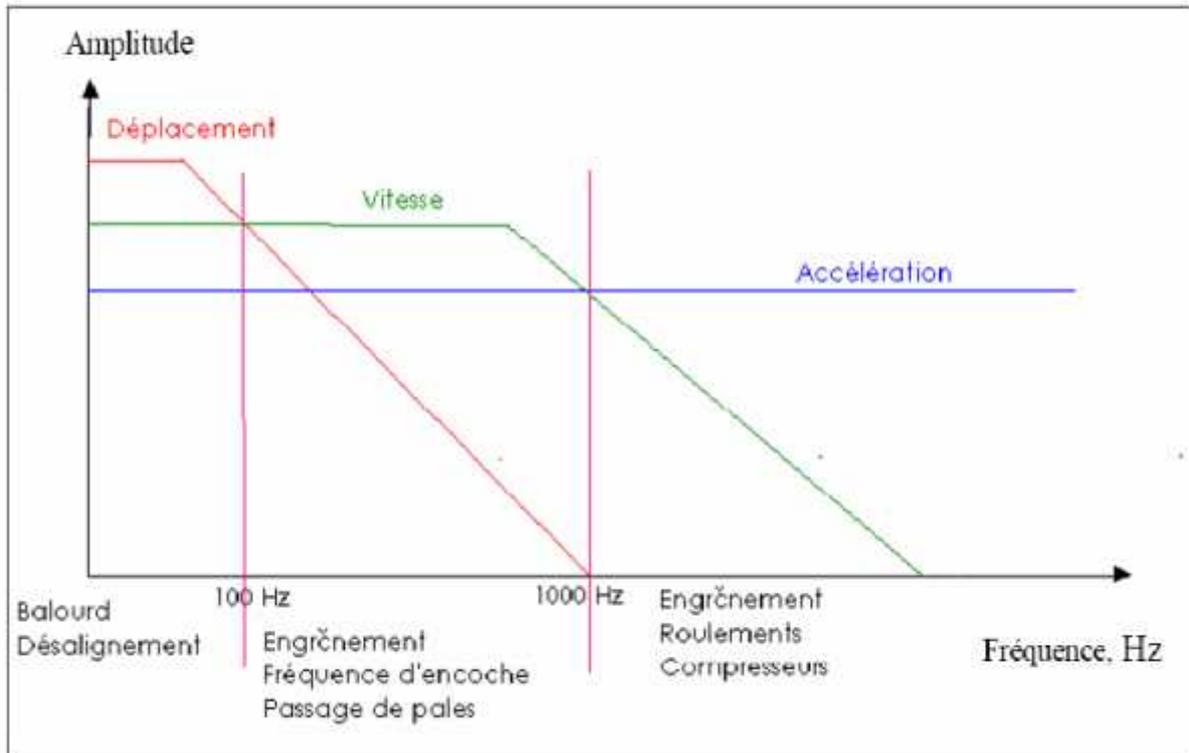


Figure II-9 : Relation accélération, vitesse, déplacement

II.2.5 Capteurs de vibrations

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le but de ce capteur est de transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Les capteurs de vibration utilisés peuvent être actifs, ne nécessitant aucune alimentation et ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie auxiliaire [7-9].

On distingue :

- Les capteurs de déplacement ;
- Les capteurs de vitesse (vélocimètres) ;
- Les capteurs d'accélération (accéléromètres).

La Figure II-10 illustre les types des capteurs de vibration.

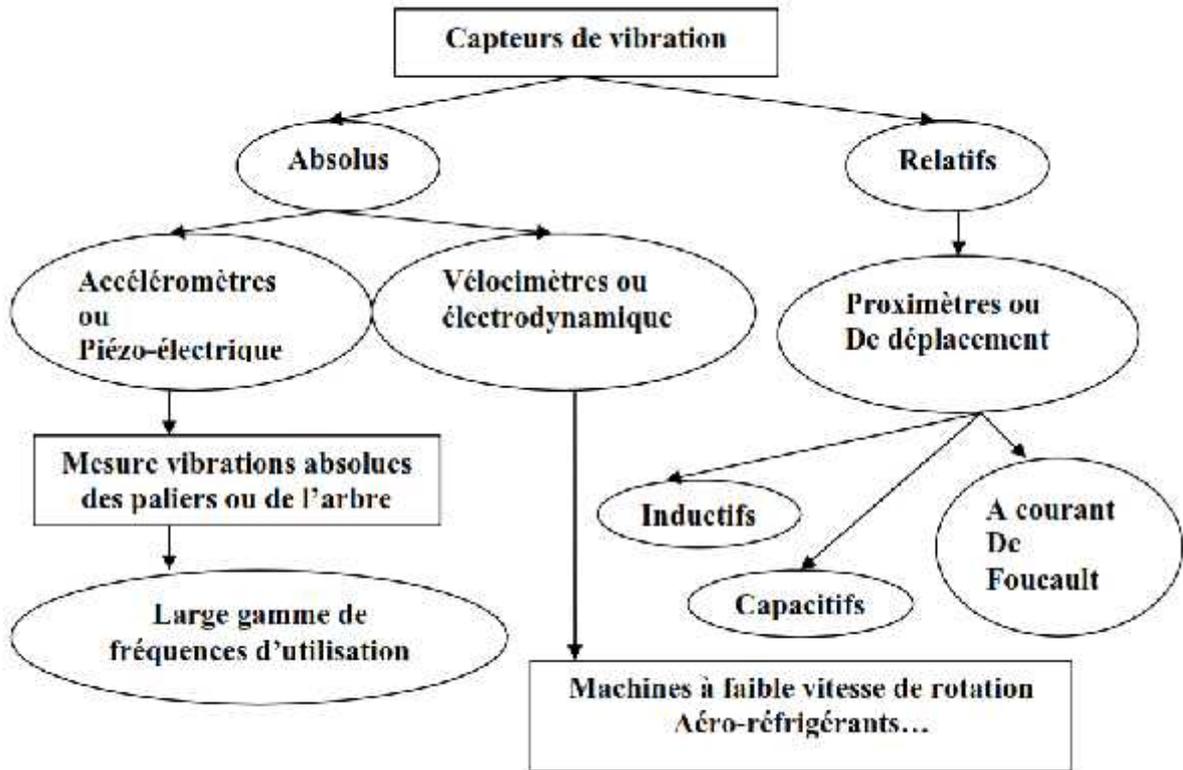


Figure II-10 : Capteurs de vibration

II.2.5.1 Capteur de déplacement

Un capteur de déplacement mesure le déplacement relatif entre l'arbre et le palier qui est du aux vibrations. La bobine et le conditionneur intégrés forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure II-11 présente le principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement.

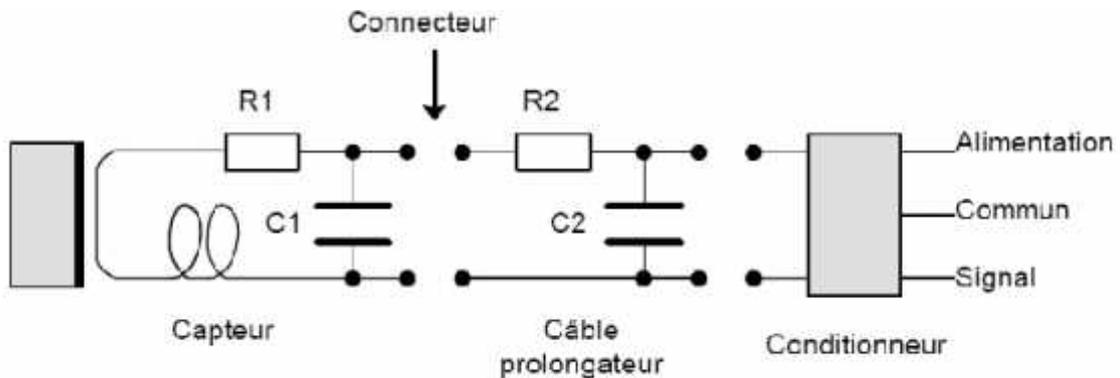


Figure II-11 : Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement

Le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Cette transformation d'énergie est d'autant plus importante que le corps métallique est proche de la bobine et que sa susceptibilité magnétique est élevée [7-9].

II.2.5.2 Capteurs de vitesse

Un capteur de vitesse (vélocimètre) est un capteur actif qui n'est pas alimenté.

La figure II-12 illustre le fonctionnement d'un capteur de vitesse [7-9].

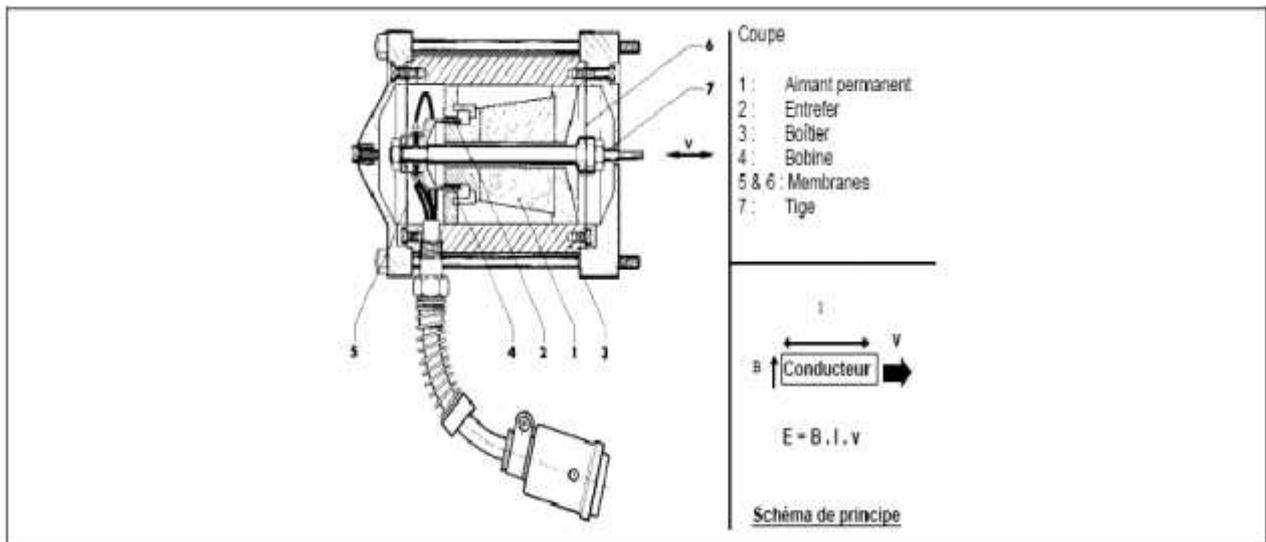


Figure II-12 : Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse

L'aimant permanent (1) génère une induction magnétique constante B . Les lignes de champ se referment par l'intermédiaire du boîtier (3). Une bobine (4) suspendue par des membranes (5) et (6) peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice (f_{em}) d'induction E est alors générée, qui est le produit de la vitesse v de vibration, de l'induction magnétique B et de la longueur l de l'enroulement.

II.2.5.3 Capteurs d'accélération

Les capteurs d'accélération (accéléromètres) mesurent des vibrations absolues de la cage ou les vibrations relatives dans l'espace [7-9].

La figure II-13 illustre le principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération.

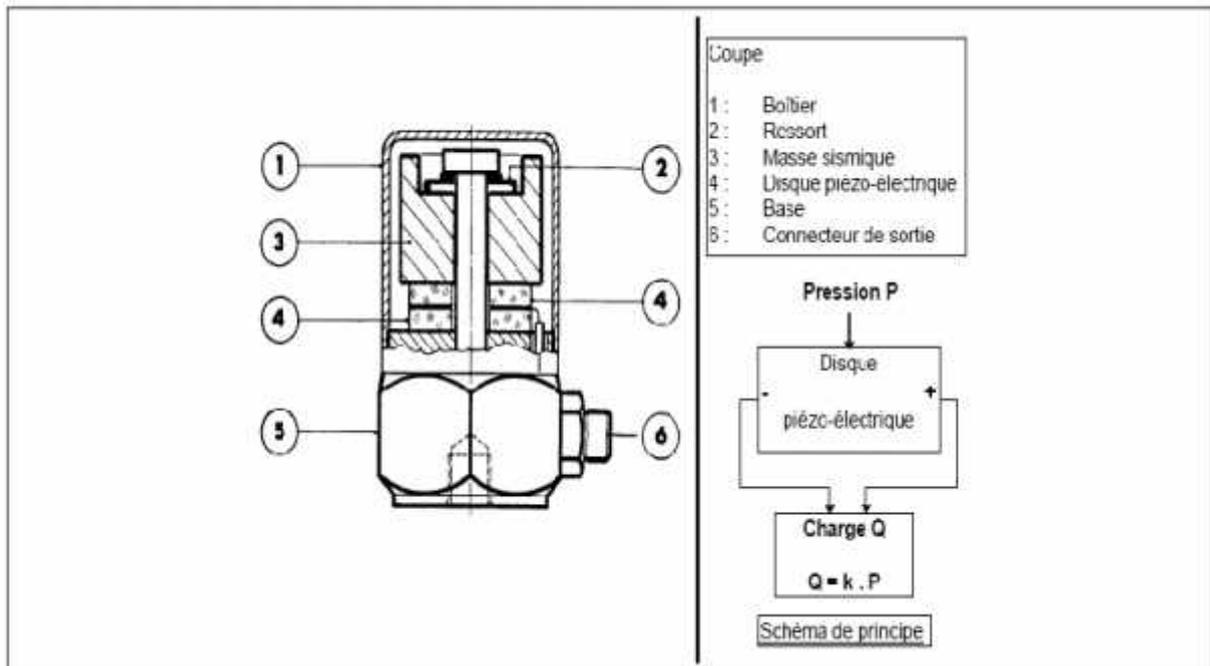


Figure II-13 : Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézo-électrique présentant la propriété de transformer une sollicitation mécanique (pression ou cisaillement) en charges électriques. Ces disques sont pris entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort de tarage élevé. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézo-électrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses [7-9].

II.2.5.4 Comparaison des différents types de capteurs

Le tableau II-3 illustre les avantages et les inconvénients de chaque capteur [7-9].

Tableau II-3 : Comparaison entre les différents types de capteur

	Avantages	Inconvénients
Capteur d'accélération	<ul style="list-style-type: none"> • Facile à installer • Bonne détection des défauts HF • Bonne gamme dynamique/fréquentielle • Petit, léger • Supporte les hautes températures • Pas de pièce mobile 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une double intégration pour le déplacement • Nécessite une source extérieure • Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre • Médiocre pour les faibles vitesses
Capteur de déplacement	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure directement les mouvements d'arbre • Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse • Mesure directement le déplacement • Mesures DC (position d'arbre) • Pas de pièce mobile 	<ul style="list-style-type: none"> • Problème de « run-out » • Sensible au matériau de l'arbre • Installation • Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements • Restriction de températures • Oscillateur externe nécessaire

II.2.5.5 Domaine d'utilisation des capteurs de vibration

La figure II-14 illustre le domaine d'utilisation de différents types de capteurs de vibration.

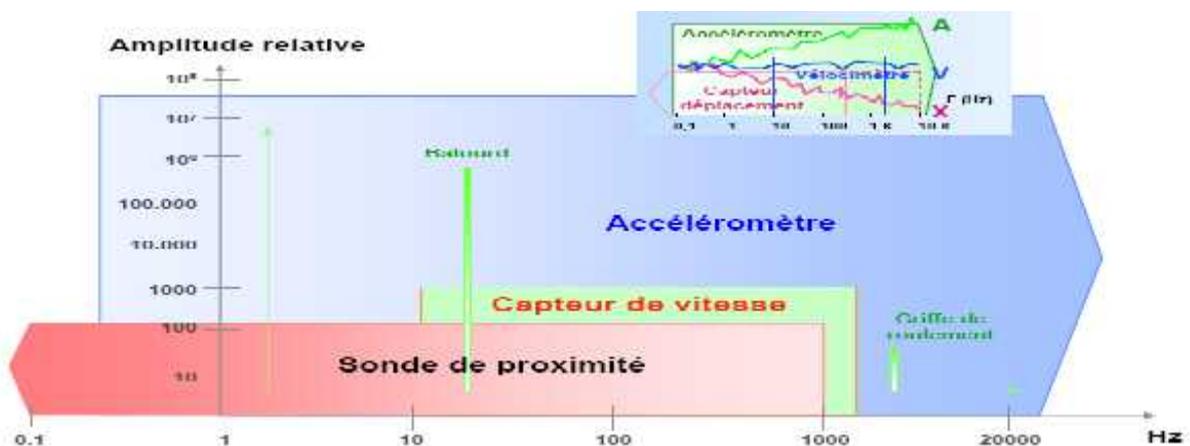


Figure II-14 : Domaine d'utilisation des capteurs de vibration

II.3 Les outils de surveillance vibratoire

Les outils utilisés pour la surveillance vibratoire peuvent être classés en deux catégories [9] :

- Des outils propres à la surveillance (valeur efficace de l'accélération ou RMS, facteur de crête, Kurtosis) qui permettent, lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alerte, de détecter la présence d'une anomalie.
- D'autres outils propres au diagnostic (FFT, spectre d'enveloppe, cepstre, ondelette et analyse multi résolution) permettant d'identifier la signature vibratoire de chaque défaut.

Pour plus de détails, voir les chapitres **III** et **IV**.

II. 4 Défauts des machines électriques tournantes

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée. En d'autres termes, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts et la cinématique de la machine, il serait possible de formuler un diagnostic de l'état de cette dernière.

Par ailleurs, les défauts qui caractérisent les machines électriques et les systèmes d'entraînement peuvent être classés, selon leurs origines, en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [10-12].

La Figure II-15 présente la classification des défauts selon leurs origines.

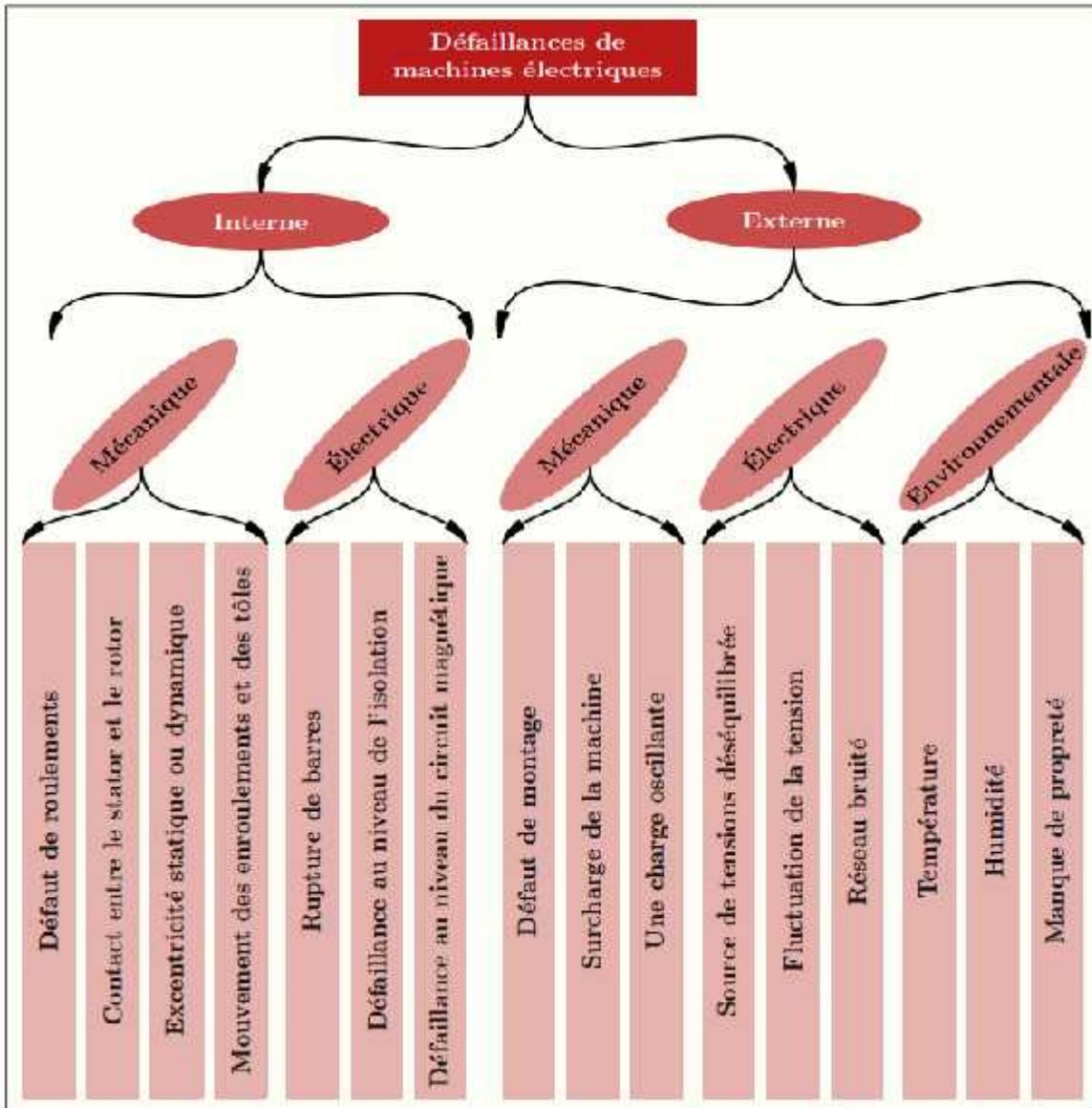


Figure II-15 : Classification des défauts selon leurs origines

II. 4.1 Défaut de balourd

Le défaut de balourd est le générateur de vibrations le plus commun dans une machine tournante et il est dû à la distribution non symétrique de la masse autour de l'axe de rotation. Un rotor est bien équilibré si son centre de masse appartient à l'axe de rotation et si cet axe est l'axe principal d'inertie. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, qui peuvent être la conséquence:

- D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement, ... (Figure II-16).

- D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées ...

On distingue le balourd statique, de couple, et dynamique [10-12].

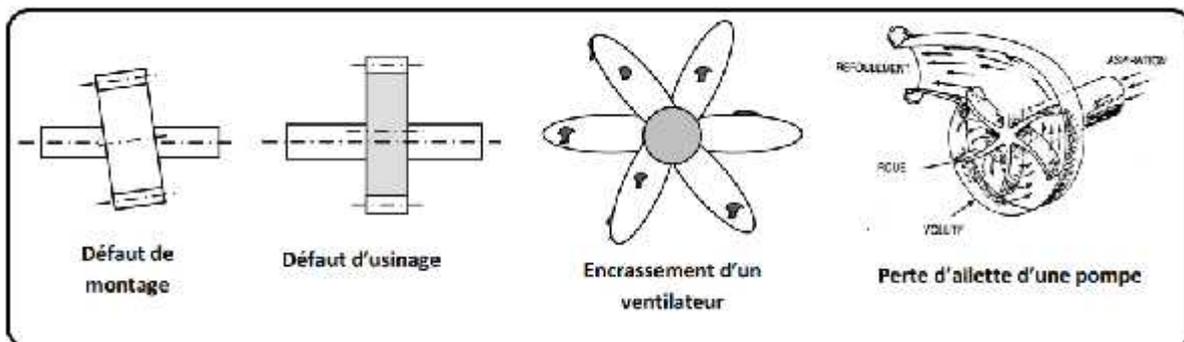


Figure II-16 : Exemples de défauts induisant un balourd

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont la fréquence de base d'une composante du correspond à la fréquence de rotation F_r . Elle représente alors le pic le plus élevé avec d'autres pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de F_r .

La Figure II-18 présente le spectre théorique d'un défaut de balourd.

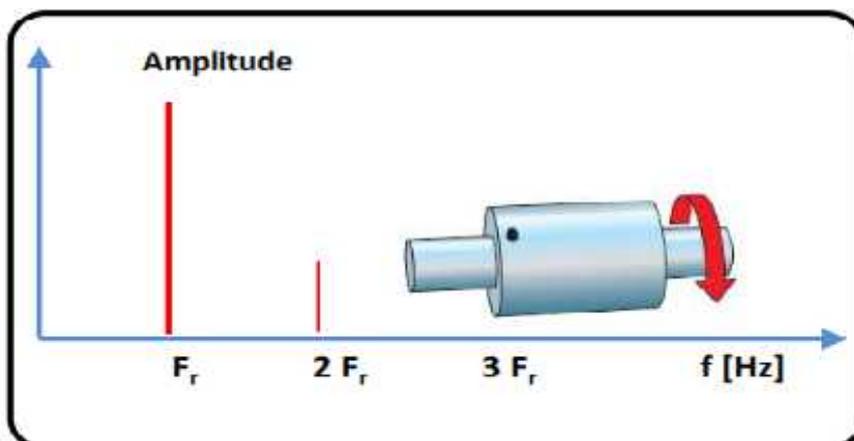


Figure II-17 : Spectre théorique d'un défaut de balourd

II. 3.1.1 Défaut de Balourd statique

Le balourd statique apparaît dans le cas où le centre de la masse (centre de gravité) du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation (voir figure II-18).

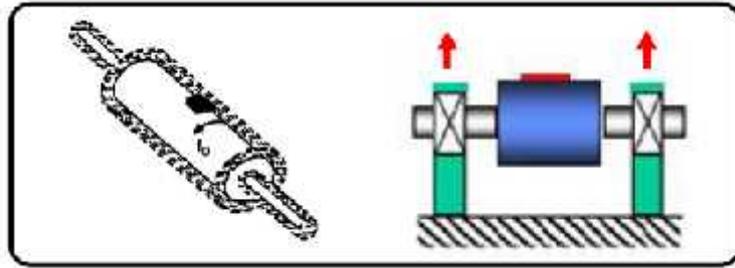


Figure II-18 : Balourd statique

II. 3.1.2 Défaut de Balourd dynamique

Dans un rotor flexible, même si le centre de celui-ci coïncide avec l'axe de rotation (on dit que le rotor est statiquement équilibré), on peut avoir dans certains cas les deux parties du rotor (suivant l'axe de rotation) statiquement déséquilibrées avec la même quantité. Les centres de gravité des deux parties se trouvent de part et d'autre de l'axe de rotation. Il s'agit d'un balourd dynamique figure II-19.

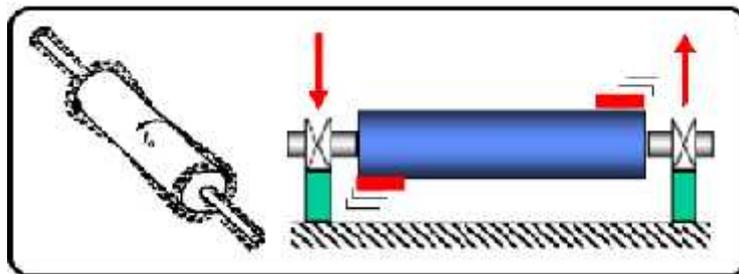


Figure II-19 : Balourd dynamique

II. 3.2 Défaut d'alignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (axial) ou défaut de concentricité ou la combinaison des deux [10-12].

Le signal temporel d'un défaut de désalignement a l'allure présentée à sur la figure II-20.

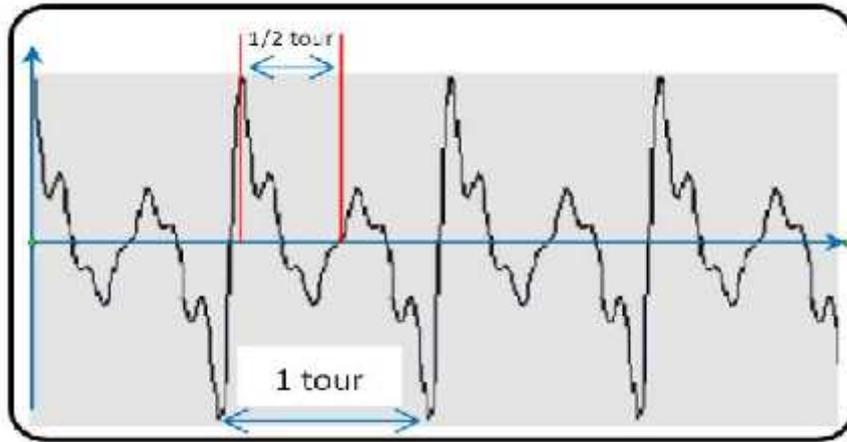


Figure II-20: Signal temporel d'un défaut d'alignement

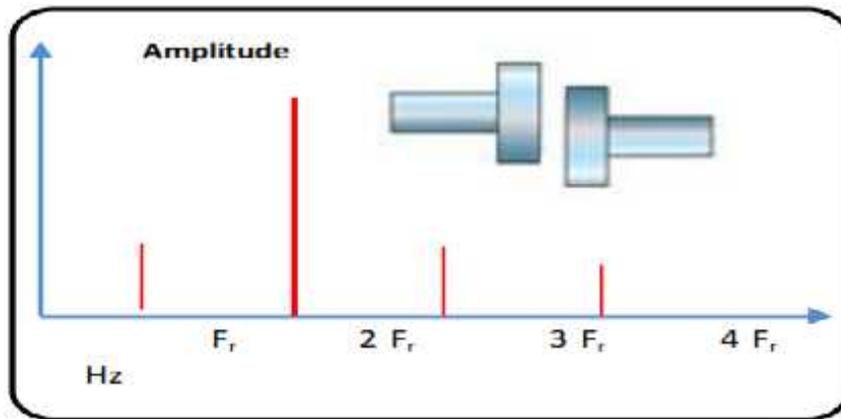


Figure II-21: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

II. 3.2.1 Défaut de désalignement angulaire

Désalignement angulaire est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais non parallèles [10-12].

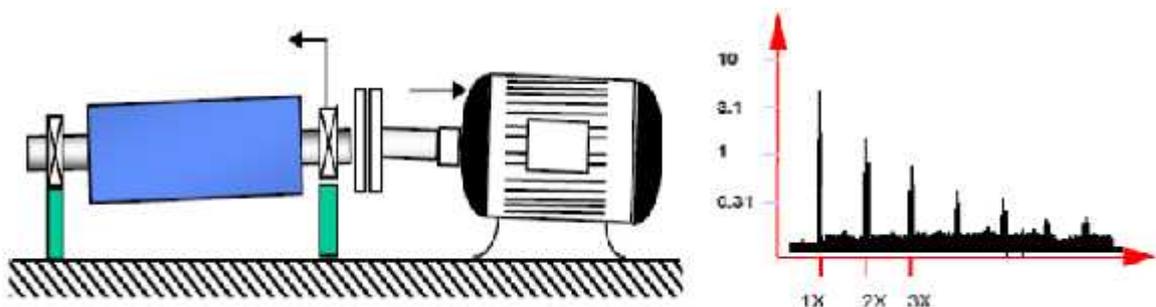


Figure II-22 : Désalignement angulaire

II. 3.2.1 Défaut de désalignement axial

Désalignement axial: il se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas.

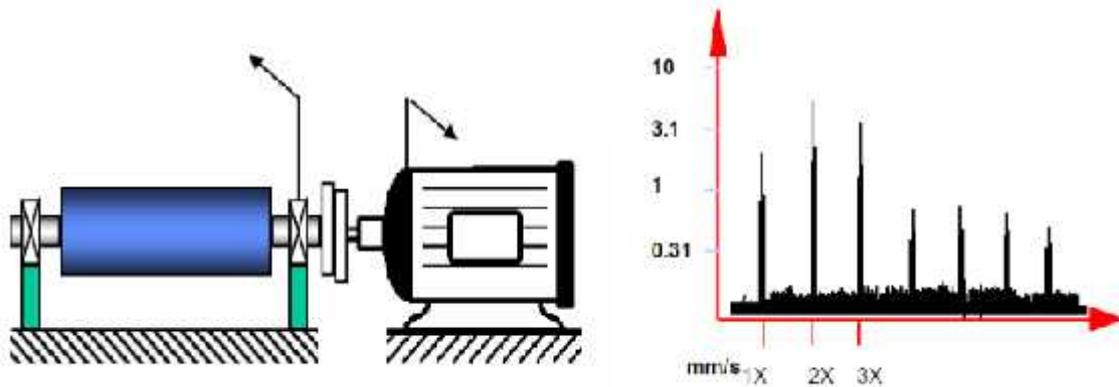


Figure II-23 : Désalignement axial (radial)

II.3.3 Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. . Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique $\frac{1}{2}$ ($\frac{1}{2}$ de la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. La figure II-24 montre un exemple de spectre d'une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz.

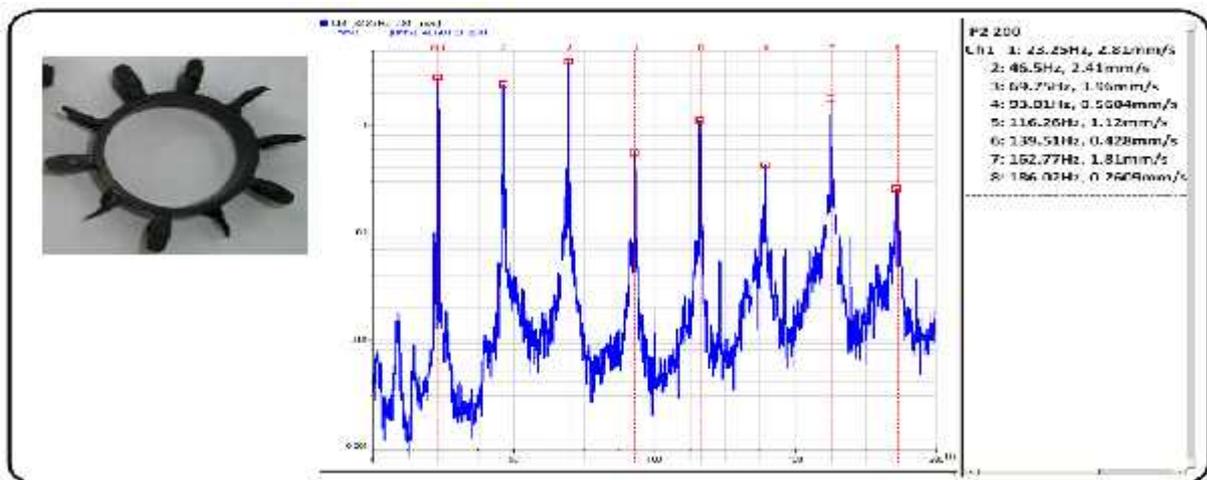


Figure II-24 : Défaut d'usure d'accouplement

II.3.4 Défauts des engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées Z_1 et Z_2 tournant avec des vitesses n_1 , n_2 correspondant aux fréquences de rotation f_1 et f_2 . Les deux roues dentées s'engrènent à une fréquence dite la fréquence d'engrènement f_c (Gear Mesh Frequency GMF), elle est donnée par la formule suivante :

$$GMF=Z_1*f_1=Z_2*f_2 \quad (II-5)$$

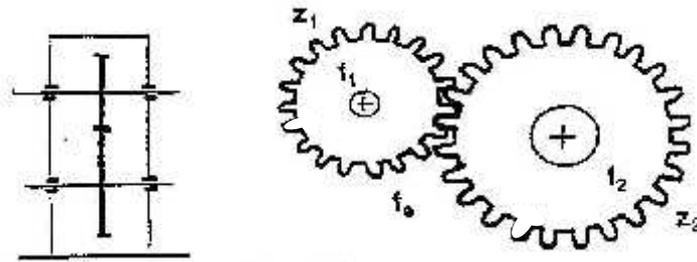


Figure II-25 : Schéma simplifié d'un engrenage

Si la denture est correcte, le spectre est constitué de composante dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

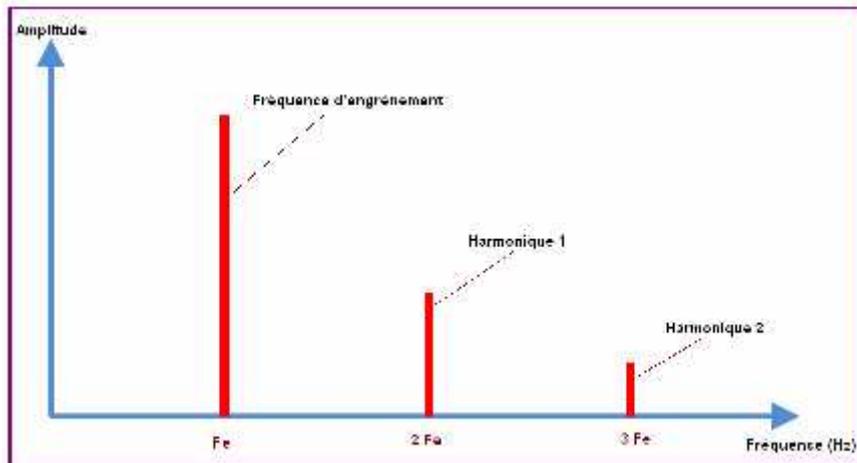


Figure II-26 : Spectre d'un engrenage sain

Le défaut d'engrenage introduit une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre, ce qui se traduit par l'apparition dans le spectre, de raies à la fréquence de rotation des arbres et des bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques. Ces bandes latérales se composent de plusieurs raies espacées de f_1 et f_2 . La figure II-28 montre le spectre théorique d'un défaut d'engrenage[10-12].

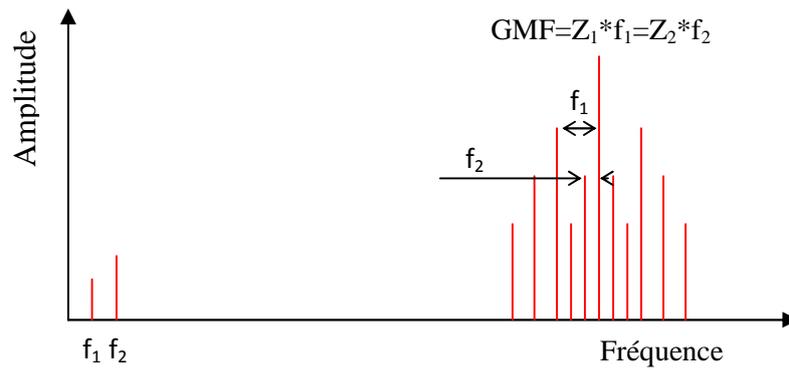


Figure II-27 : Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes (voir figure II-29):

- Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque)



Figure II-28 : Différents types d'engrenage

II.3.4.1 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

- **Détérioration d'une dent**

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (Figure II-29).

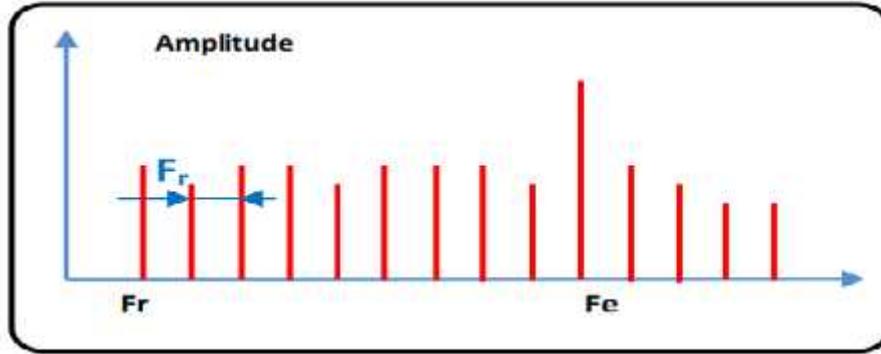


Figure II-29 : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

- **Détérioration de l'ensemble de dentures**

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée (voir figure II-30). Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits [10-12].

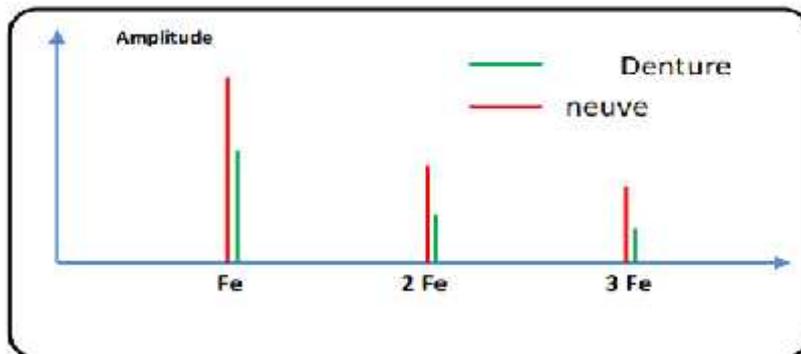


Figure II-30 : Image vibratoire théorique d'une denture

- **Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)**

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrènement en fond de denture. La dent menant force à l'engagement et au dégageant ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture. En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence (Figure II-31).

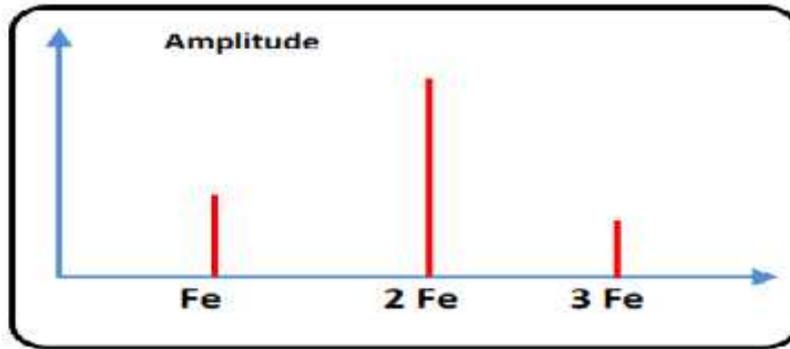


Figure II-31 : Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture

- ***Jeu de fond de denture trop grand***

Un jeu de fond de denture trop grand a pour conséquence un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient alors un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveaux de même ordre de grandeur) (Figure II-32) [10-12].

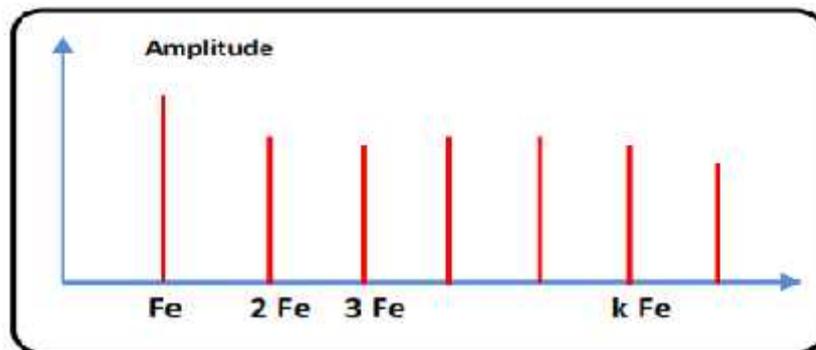


Figure II-32 : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

- **Défauts induisant une modulation d'amplitude**

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal vibratoire par la fréquence de rotation due à la modélisation de l'effort d'engrènement (Figure II-33).

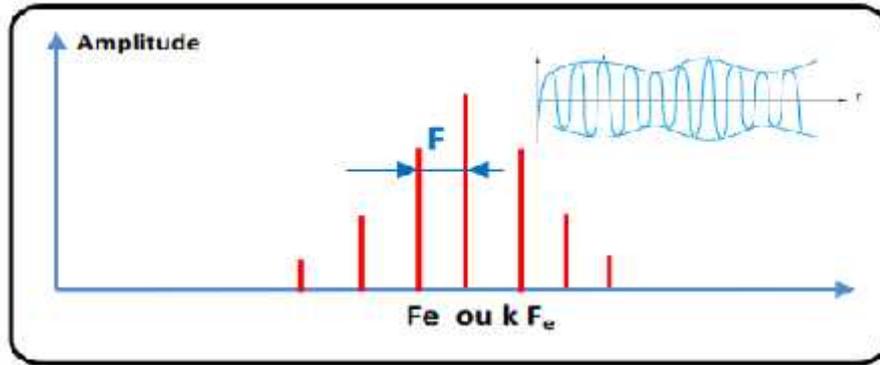


Figure II-33 : Image théorique de la modulation d'amplitude de F_e par F_r

II. 3.5 Défauts de roulements

Les roulements sont les éléments mécaniques les plus importantes des machines tournantes. Ils sont employés pour guider et soutenir les arbres de machines tournantes. Etant donné leurs grandes sollicitations ils sont la source de panne fréquente. De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels Une bague extérieure, une bague intérieure, des organes roulants (billes) et un organe de lubrification (cage) (Figure II-34).

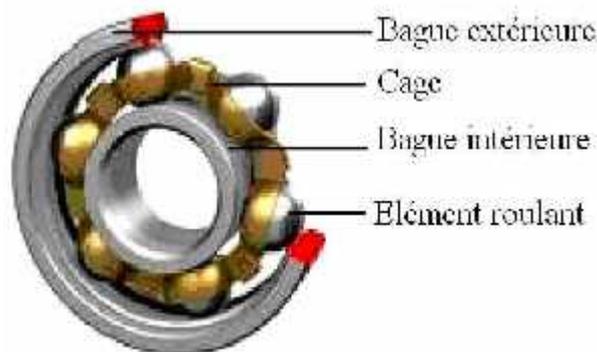


Figure II-34 : Constitution d'un roulement

II. 3.5.1 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues [10-12].

d : le diamètre de la bille
 D : le diamètre du cercle primitif
 α : l'angle de contact

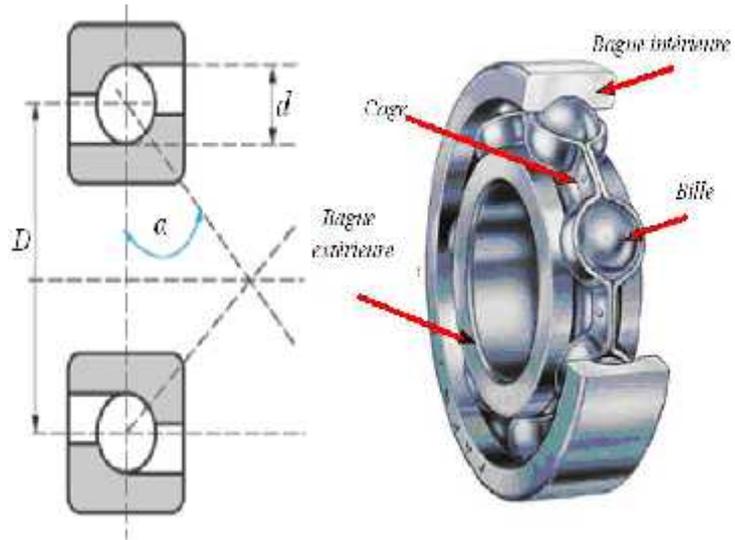


Figure II-35 : Caractéristiques d'un roulement

II. 3.5.1.1 Défaut sur la bague extérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire 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 espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante [figure II-36] [10-12].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II-6).

$$f_{BE} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (II-6)$$

Où, f_r est la fréquence de rotation, d le diamètre de la bille, D le diamètre du cercle primitif, n le nombre de billes et α l'angle de contact

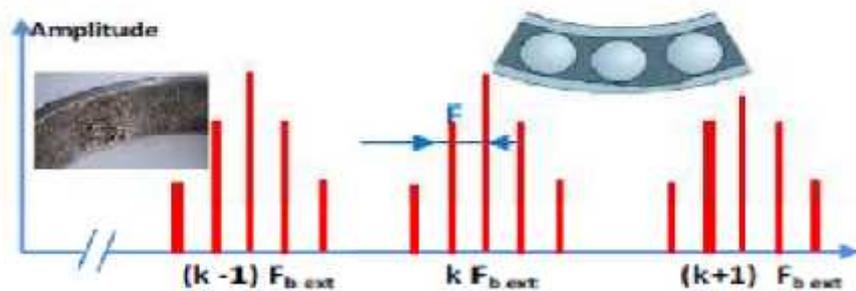


Figure II-36 : Image vibratoire théorique d'un défaut de bague extérieure

II. 3.5.1.2 Défaut sur la bague intérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (figure II-37) [10-12].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II-7).

$$f_{BI} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \gamma \right) \quad (\text{II-7})$$

Où, f_r est la fréquence de rotation, d le diamètre de la bille, D le diamètre du cercle primitif, n le nombre de billes et γ l'angle de contact

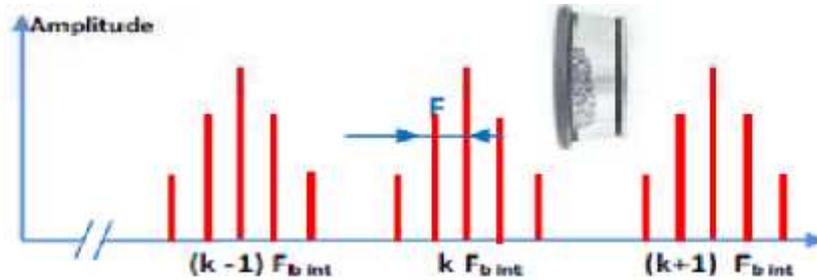


Figure II-37 : Image vibratoires théorique d'un défaut de bague intérieure

II. 3.5.1.3 Défaut sur l'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 espacées de la fréquence de la cage (figure II-38) [10-12].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II-8).

$$f_B = \frac{D}{d} f_r \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \gamma \right)^2 \right) \quad (\text{II-8})$$

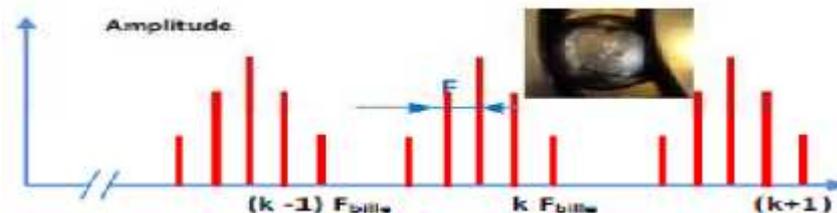


Figure II-38 : Image vibratoires théorique d'un défaut de bille

II. 3.5.1.4 Défaut sur la cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (I.9) : Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence f_c et ses harmoniques. [10-12]. Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II-9).

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 \pm \frac{d}{D} \cos \gamma \right) \quad (\text{II-9})$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique sur la surveillance vibratoire des machines tournantes. Aussi, nous avons étudié les différents défauts des machines tournantes. On retient, deux grandes catégories d'outils de surveillances vibratoires :

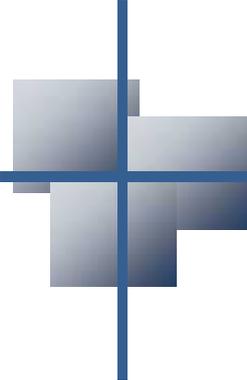
- Des outils propres à la surveillance (valeur efficace de l'accélération ou RMS, facteur de crête, Kurtosis) qui permettent, lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alerte, de détecter la présence d'une anomalie.
- D'autres outils propres au diagnostic (l'analyse fréquentielle, l'analyse de l'enveloppe, L'analyse cepstrale, la transformée en ondelettes (TO)) permettant d'identifier la signature vibratoire de chaque défaut.

Le chapitre suivant sera consacré à la théorie des ondelettes et leurs applications pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements dans les machines tournantes.

IV.7 Références bibliographiques

- [1] R. Chaib, " Contribution a l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire", Thèse de Doctorat, Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2010.
- [2] I. Touafek, " Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT)", Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas - Setif, Algérie, 2013.

- [3] N. Chikh, “ Analyse spectrale des vibrations Application à la maintenance des équipements mécaniques ”, Thèse de Magister, Université Mouhamed BOUGARA Boumerdes, Algérie, 2005.
- [4] H .Bendjama, “ Contribution a la détection et au diagnostic des défauts .Application aux systèmes dynamiques et aux matériaux ”, Thèse de Doctorat, École national polytechnique USTHB, Algérie, 2012.
- [5] G. Zwingelstein, “ Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels ”, Traité des Nouvelles Technologies - Série Diagnostic et Maintenance. Editions Hermès, Paris 1995.
- [6] J. Morel, “ Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique ”, Edition Eyrolles (Paris) 1992.
- [7] Z. Ghemari, “ Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.
- [8] Z. Ghemari, “ Modélisation Et Simulation D’un Capteur De Vibration (Accéléromètre)”, Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar , Annaba, Algérie, 2006.
- [9] F. Landolsi , “ Cours De Techniques De Surveillance”,2010.
- [10]T. Bensana, “ Diagnostic des défaillances basé sur l’analyse vibratoire d’une turbine à vapeur.”, Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2008.
- [11] S. Bourdim, “ Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones”, Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas -Setif, Algérie, 2011.
- [12]H. Cherif, “ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes”, Thèse de Magister, Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 2014.



Chapitre III :

Théorie des ondelettes et leurs applications

Chapitre III :

Théorie des ondelettes et leurs applications

III.1 Introduction

Dans les machines tournantes le roulement est au cœur du mécanisme mobile et affecte considérablement son rendement. C'est l'élément indispensable dans le guidage et le soutien des arbres tournants et tout défaut qui s'y produit, entraîne des pertes au niveau de la production et des équipements et peut même créer un environnement de travail dangereux pour l'homme. Pour ces raisons, un grand intérêt a été alloué au diagnostic des défauts de roulements de la part des communautés de recherche et d'ingénierie au cours des dernières années.

L'une des méthodes qui a fait l'objet de plusieurs applications pour la détection des défauts de roulements est l'analyse par ondelettes qui est une méthode récente de traitement des signaux venant combler les limites de la FFT. Elle est spécialement adaptée pour l'analyse des signaux transitoires et demeure, aujourd'hui, un domaine de recherche d'actualité dans plusieurs secteurs.

Dans Ce chapitre nous présentons la théorie des ondelettes et leurs applications pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements dans les machines tournantes, ainsi que nous apportons une contribution à l'amélioration de l'analyse multi-résolutions en ondelettes.

III.2 Description du dispositif expérimental

Les signaux de vibration utilisés dans cette étude ont été obtenus à partir d'un dispositif expérimental implanté à l'université de Case Western Reserve (USA) [1]. Ces signaux ont été pris à partir d'un accéléromètre monté sur le boîtier de palier à l'extrémité de l'entraînement d'un moteur à induction, couplé à un dynamomètre, qui joue le rôle d'une charge. Le dispositif expérimental est présenté dans la figure III-1.

Ce site Web "www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm", permet d'accéder à la base de données des essais de roulements à billes, soit les roulements normaux ou défectueux.

Les signaux de vibration des roulements ont été obtenus à partir de différents états:

- (1) l'état de fonctionnement normal;
- (2) défaut de bague intérieure;
- (3) défaut de bille;
- (4) défaut de bague extérieure ;

A des vitesses différentes du moteur: 1730, 1750, 1772, et 1797 tours par minutes [1]. Les diamètres des défauts créés sur la bague intérieure, la bague extérieure et les billes sont respectivement de 0,007 pouce, 0,014 pouce et 0,021 pouce (1 pouce = 25,4 mm).

Tous les défauts ont une profondeur de 0,011 pouce. Les expériences ont été répétées pour quatre différentes conditions-de charge de puissance : 0, 1, 2 et 3 chevaux (hp : horse power ou cheval-vapeur). Les données sont échantillonnées à une fréquence de 12 kHz et la durée de chaque signal de vibration est de 10 secondes [1].

Le roulement utilisé dans cette étude est du type (6205-2RSL JEM SKF) à gorge profonde. C'est un roulement à billes, dont les dimensions et les caractéristiques sont classées dans le tableau III-1.

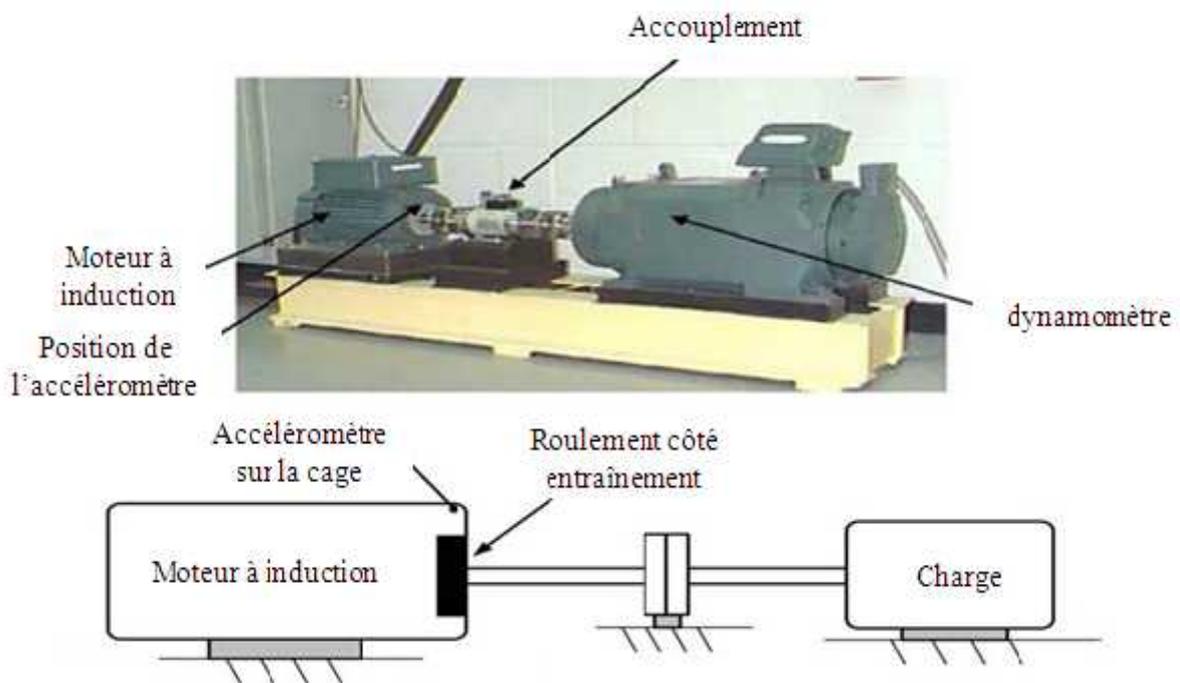


Figure III-1 : Le dispositif expérimental (banc d'essais)

Tableau III-1: Dimensions et paramètres du roulement Type 6205-2RSL JEM SKF [1]

Paramètres	Valeurs (mm)
Diamètre de bague intérieure 2Ri	25.001
Diamètre de bague extérieure 2Ro	51.998
Diamètre d'une bille	7.940
Diamètre moyen du roulement	39.04
Nombre de billes	9

III.3 Défauts des roulements

Le roulement est composé des éléments suivants (Figure III.2) :

1. deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure,
2. comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants), des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal,
3. une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

Les roulements défectueux produisent des pics de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque élément du roulement [2-4]. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, de la cage et au passage des billes sur les bagues intérieure et extérieure.

Les fréquences de défauts du roulement se distinguent comme suit:

- La fréquence de la bague intérieure est donnée par l'équation suivante:

$$f_{IR} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \gamma \right) \quad (\text{III.1})$$

- La fréquence de défaut de la bague extérieure est donnée par l'équation suivante

$$f_{OR} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \gamma \right) \quad (\text{III.2})$$

Où, f_r est la fréquence de rotation, d le diamètre de la bille, D le diamètre du cercle primitif, n le nombre de billes et γ l'angle de contact, comme il est montré dans la Figure III-2.

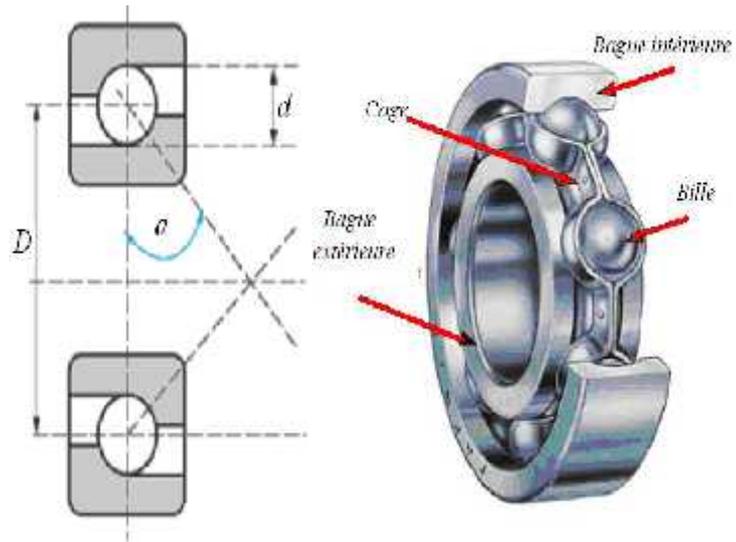


Figure III-2 : Caractéristiques géométriques d'un roulement

Afin d'évaluer la méthode proposée, les données mesurées sont collectées à des vitesses de 1797rpm (30Hz) pour une charge d'une puissance nulle (0 hp) et 1730 rpm (29Hz) pour une charge d'une puissance de (3 hp) et ce à l'état de fonctionnement normal et dans le cas de défaut de la bague intérieure et de défaut de la bague extérieure.

La fréquence d'échantillonnage d'acquisition est de 12000Hz et le nombre d'échantillons de chaque signal est de 4096 points.

Les fréquences calculées de ces défauts de roulement sont regroupées le tableau III-2.

Tableau III-2 : Les fréquences des défauts de roulement

Diamètre du défaut	0,007 pouce			
Type de défaut	défaut de bague intérieure		défaut de bague extérieure	
Charge du moteur (hp ou cheval-vapeur)	0	3	0	3
Vitesse du moteur (tr/min)	1797	1730	1797	1730
Fréquence de Vitesse de moteur f_r (Hz)	29,94	28,83	29,94	28,83
Les fréquences des défauts de palier en Hz calculées par les équations (1) et (2)	162,2	156,13	107,37	103,37

Les figures III-3, III-4 et III-5 représentent les signaux de vibration de l'état normal, du défaut de bagues intérieure et du défaut de bagues extérieure respectivement.

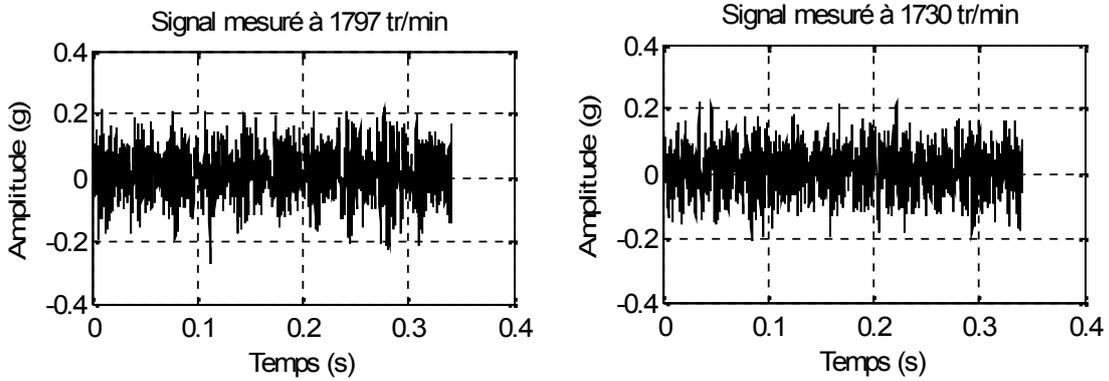


Figure III-3 : Signaux vibratoires de l'état normal

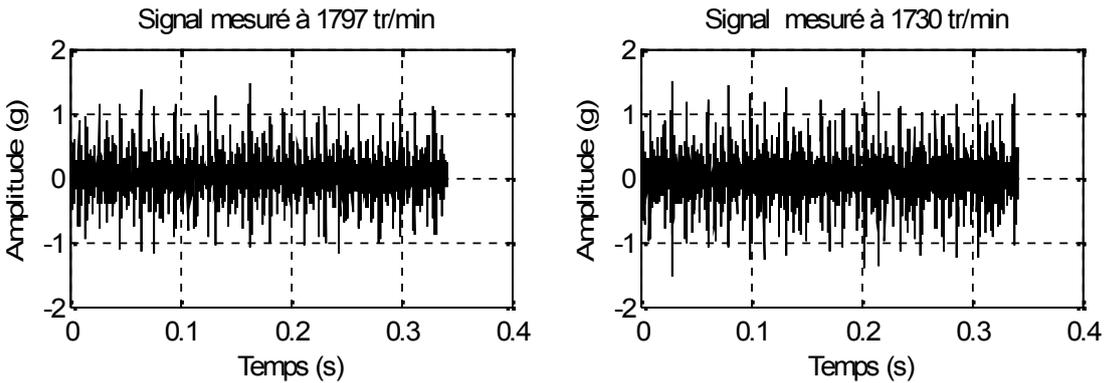


Figure III-4 : Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague intérieure du roulement

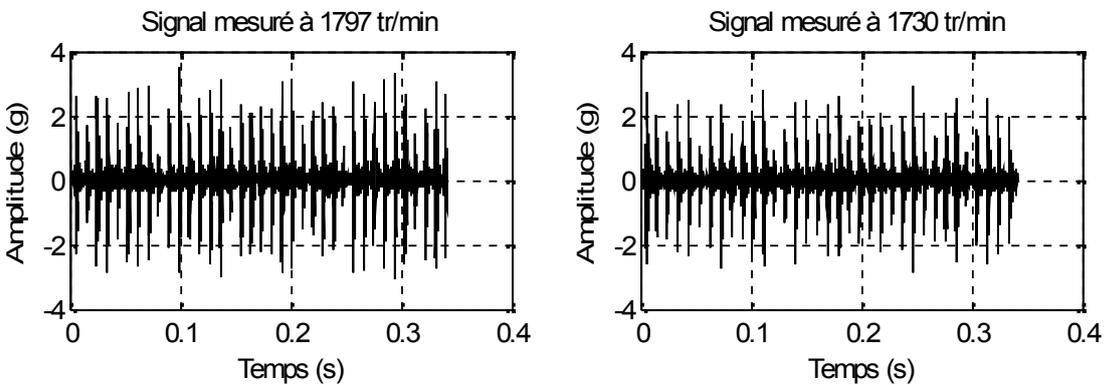


Figure III-5 : Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague extérieure du roulement

III.4 Transformée en ondelettes des signaux vibratoires

La théorie des ondelettes est apparue au début des années 1990, elle touche de nombreux domaines des mathématiques, notamment le traitement du signal et des images.

Le terme ondelette désigne une fonction qui oscille sur un intervalle de longueur finie. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro. 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 [5-16].

La transformée en ondelettes est un nouvel outil mathématique particulièrement appropriée à l'analyse des signaux de vibration non stationnaires. Contrairement à la Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT) en anglais (Short-Time Fourier Transform (STFT)) où la taille de la fenêtre est fixée pour l'analyse de la totalité du signal, la transformée en ondelettes utilise des tailles de fenêtre variables (l'ondelette mère) pour l'ensemble du signal; ce qui permet d'obtenir une bonne résolution en temps et en fréquence.

Son principe est basé sur la décomposition d'un signal en coefficients d'ondelettes de différentes échelles dans le domaine temporel [5-14].

Il existe plusieurs types d'ondelettes mères qui peuvent être utilisés pour détecter et diagnostiquer les défauts dans les machines tournantes comme : Haar, Meyer, Daubechies, Morlet, etc. Par conséquent, la TO donne de bons résultats si l'ondelette mère est soigneusement sélectionnée (voir figure III-6).

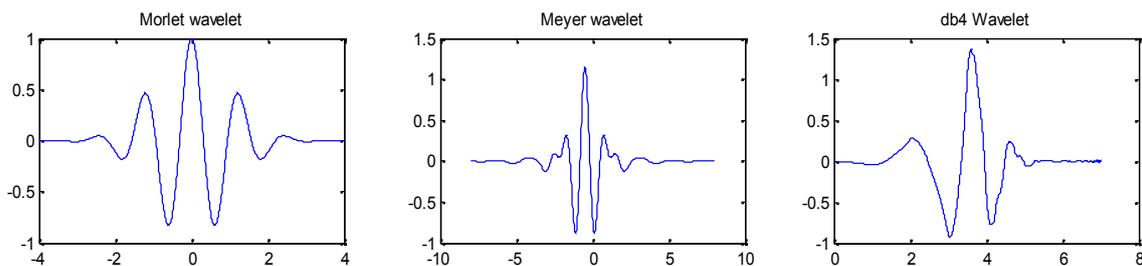


Figure III-6 : Exemples d'ondelettes mères

III.4.1 Transformée en ondelettes continue (TOC) ou (CWT)

La T.O.C est semblable à la transformée de Fourier à court terme (TFCT). Seulement la fenêtre glissante utilisée pour l'analyse est variable en fonction du temps.

La transformée en ondelette continue d'une fonction $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ est définie dans le domaine temporel par le produit scalaire suivant [5-16]:

$$\hat{f}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \mathfrak{E}_{a,b}^*(t) dt \quad (\text{III.3})$$

Les ondelettes sont donc définies par :

$$\mathfrak{E}_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \mathfrak{E}\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in \mathfrak{R}^{**}, \quad b \in \mathfrak{R} \quad (\text{III.4})$$

L'équation (1.4) devient :

$$\hat{f}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \mathfrak{E}^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III.5})$$

Où b est le coefficient de translation. Il s'agit d'un nombre réel.

a est le coefficient d'échelle, également appelé facteur de dilatation de . Il s'agit d'un nombre réel.

$\mathfrak{E}(t)$ est l'ondelette mère.

$\mathfrak{E}^*(t)$ dénote le complexe conjugué de

III.4.2 Transformée en ondelettes discrète (TOD) ou (DWT)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue. A la différence de cette dernière, La TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée [5-16].

Une discrétisation de la transformée est possible en posant $a = a_0^m$ et $b = nb_0 a_0^m$ avec $a_0 \in \mathfrak{k}$ et $b_0 \in \mathfrak{k}$.

La transformée en ondelettes discrète est donnée par :

$$\hat{f}(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \mathfrak{E}(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (\text{III.6})$$

Si on choisit $a = 2$ et $b = 1$, on se place dans le cas dyadique. On a alors :

$$\hat{f}(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \mathfrak{E}(2^{-m} t) dt \quad (\text{III.7})$$

III.4.3 L'Analyse Multi-résolution en Ondelettes

L'Analyse Multi-résolution en Ondelettes (AMRO), a été introduite pour la première fois par Mallat en 1989. Elle consiste à faire introduire le signal à analyser dans deux filtres : passe-bas (L) et passe-haut (H). A ce niveau, deux vecteurs seront obtenus : A_{K1} et D_{K1} . Les éléments du vecteur A_{K1} sont appelés coefficients d'approximation. Ils correspondent aux

plus basses fréquences du signal, tandis que les éléments du vecteur D_{k1} sont appelés coefficients de détail, et correspondent aux plus hautes d'entre elles. La procédure peut être répétée avec les éléments du vecteur A_{k1} et successivement avec chaque nouveau vecteur A_{kj} obtenu. Le processus de décomposition peut être répété j fois, avec j le nombre maximal de niveaux [5-14].

Donc le signal décomposé s'écrit sous la forme (II.8):

$$\text{Signal} = \text{détail 1}(D1) + \text{détail 2}(D2) + \text{détail 3}(D3) + \text{détail 4}(D4) + A4 \quad (\text{III.8})$$

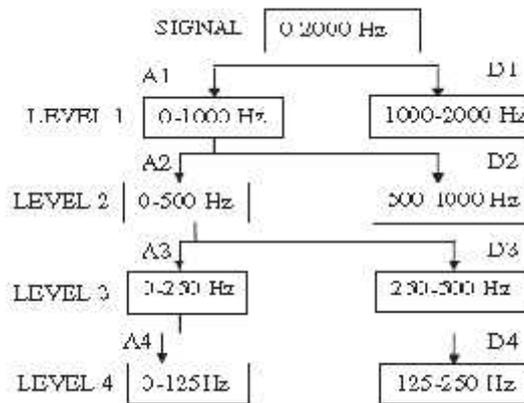


Figure III-6 : Principe de l'analyse Multi-résolution.

III.4.4 Analyse par paquets d'ondelettes

Dans l'analyse par paquets d'ondelettes (APO) ou Wavelet Packet Transform (WPT), les détails ainsi que les approximations peuvent être décomposés. L'arbre de la décomposition de l'analyse par paquets d'ondelettes est représenté sur la figure III-7 [14-16].

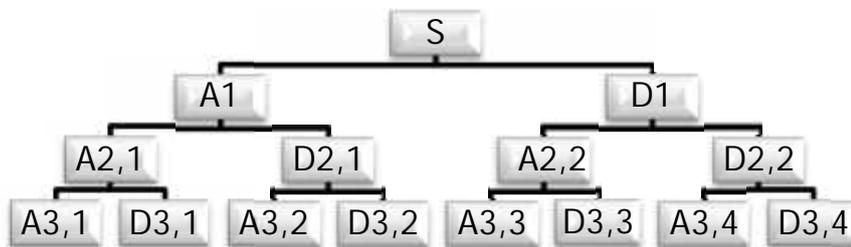


Figure III-7 : Analyse par paquets d'ondelettes

III.5 Application de la TOC pour diagnostiquer les défauts de roulements

Les spectres de défauts de roulements par TOC en utilisant l'ondelette mère de Morlet sont illustrés sur la figure III-8.

A partir de la figure III-8 (a), on observe les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz et leurs multiples. Il est remarqué que les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz sont très proches des pics de fréquences calculées d'un défaut de bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un défaut de bague intérieure.

La figure III-8 (b) montre clairement la présence des pics de fréquence à 108 Hz et 103 Hz. Les pics de fréquence à 108 Hz et 103Hz sont très proches de fréquences calculées d'un défaut de bague extérieure à 107.37 Hz et 103,37 Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Cela indique clairement qu'il s'agit d'un défaut de bague extérieure.

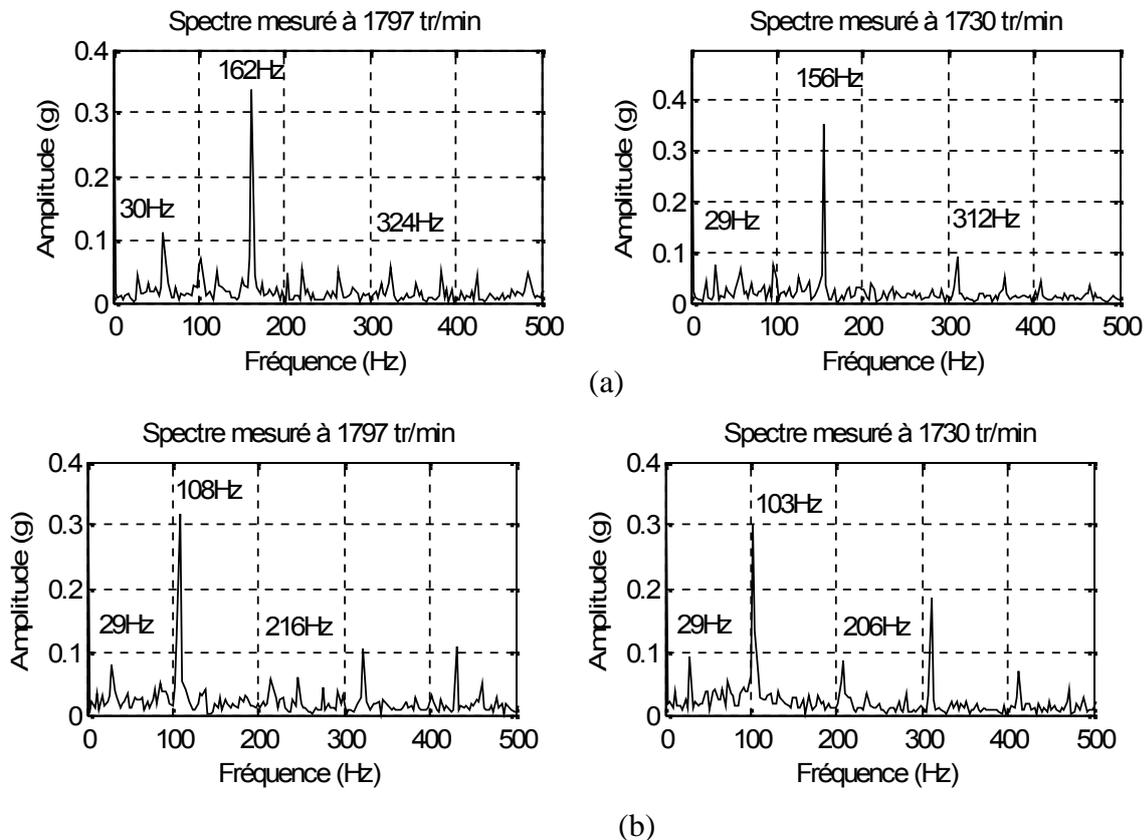


Figure III-8 : (a) Spectres des défauts de roulement en utilisant la TOC (a) défaut de bague intérieure (b) défaut de bague extérieure

Par conséquent, les résultats de simulation, confirment la possibilité de l'identification des défauts de roulement à l'aide de La transformée en ondelettes continue (TOC). Néanmoins, les principales limites de cette technique sont la distorsion de la frontière qui doit être traitée différemment des autres parties du signal, les fuites d'énergie. En outre, en raison de l'existence de nombreuses fonctions d'ondelettes, la sélection de la fonction la plus appropriée demeure un élément déterminant.

III.6 Application de l'AMRO pour diagnostiquer les défauts de roulement

Les décompositions des signaux des défauts de roulement obtenus par l'analyse Multi-résolution en utilisant l'ondelette mère de Daubechie 4 sont illustrées sur les figures III-9(a), III-10(a), III-11(a) et III-12(a).

Les spectres de défauts de roulement obtenus par cette même méthode sont illustrés sur les figures III-9(b), III-10(b), III-11(b) et III-12(b).

On peut voir clairement sur les figures III-9 (b) et III-10 (b) les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz et de leurs multiples. Les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz sont très proches de fréquences calculées de défaut de bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Cela indique clairement un défaut de bague intérieure.

Quant à la figure III-11 (b) et III-12 (b), On peut voir clairement les pics de fréquence à 108 Hz et 103 Hz et de leurs multiples. Les pics à 108 Hz et 103Hz sont très proches des fréquences calculées de défaut de bague extérieure à 107.37 Hz et 103,37 Hz telles que mentionnées, précédemment, dans le tableau III-2. Cela indique clairement un défaut de bague extérieure.

Par ailleurs, les défauts de roulement peuvent également être identifiés à l'aide de l'analyse multi- résolution. Malheureusement, la technique reste contraignante au vu de la difficulté dans le choix approprié de l'ondelette mère et du niveau de décomposition.

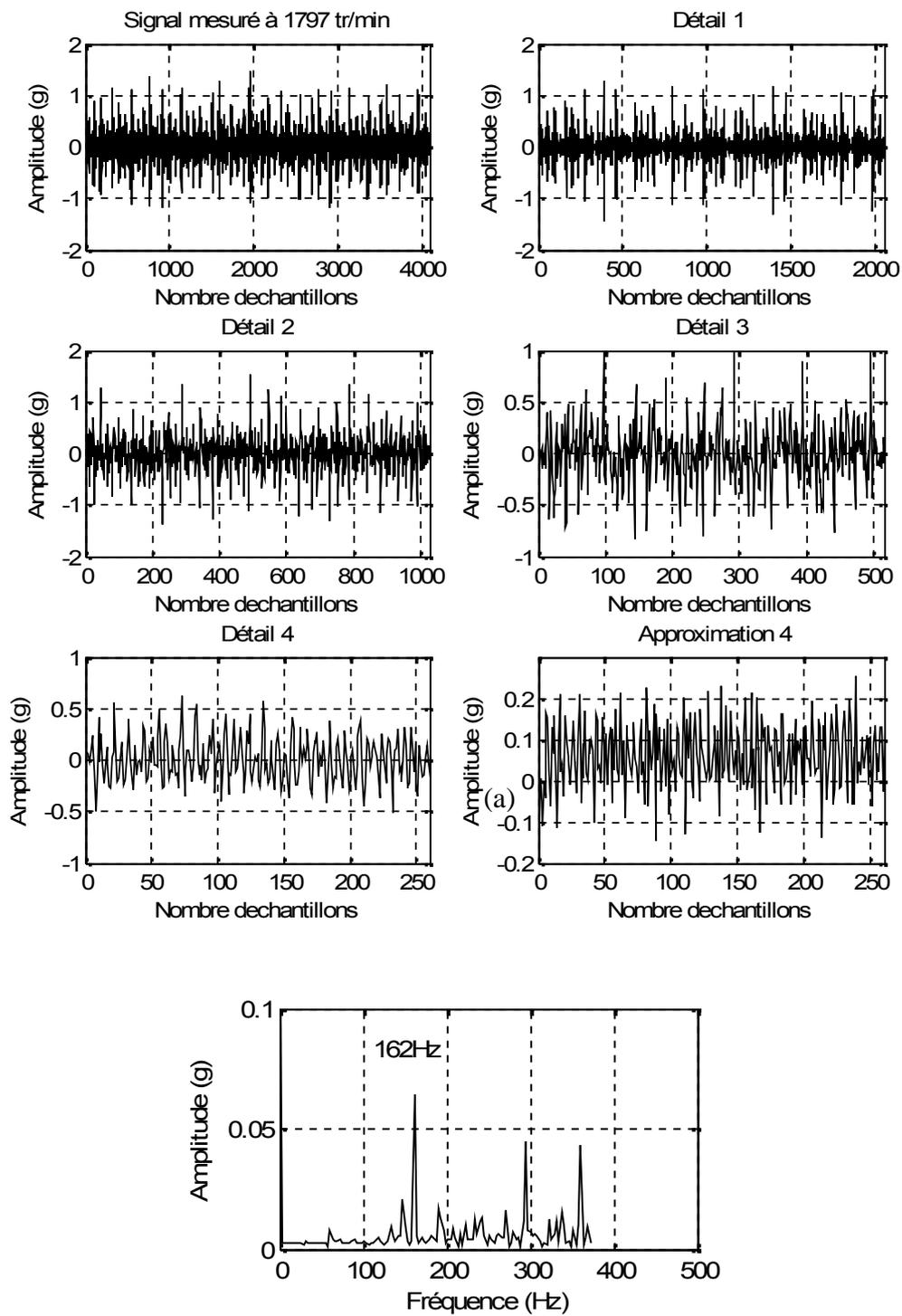


Figure III-9 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 2

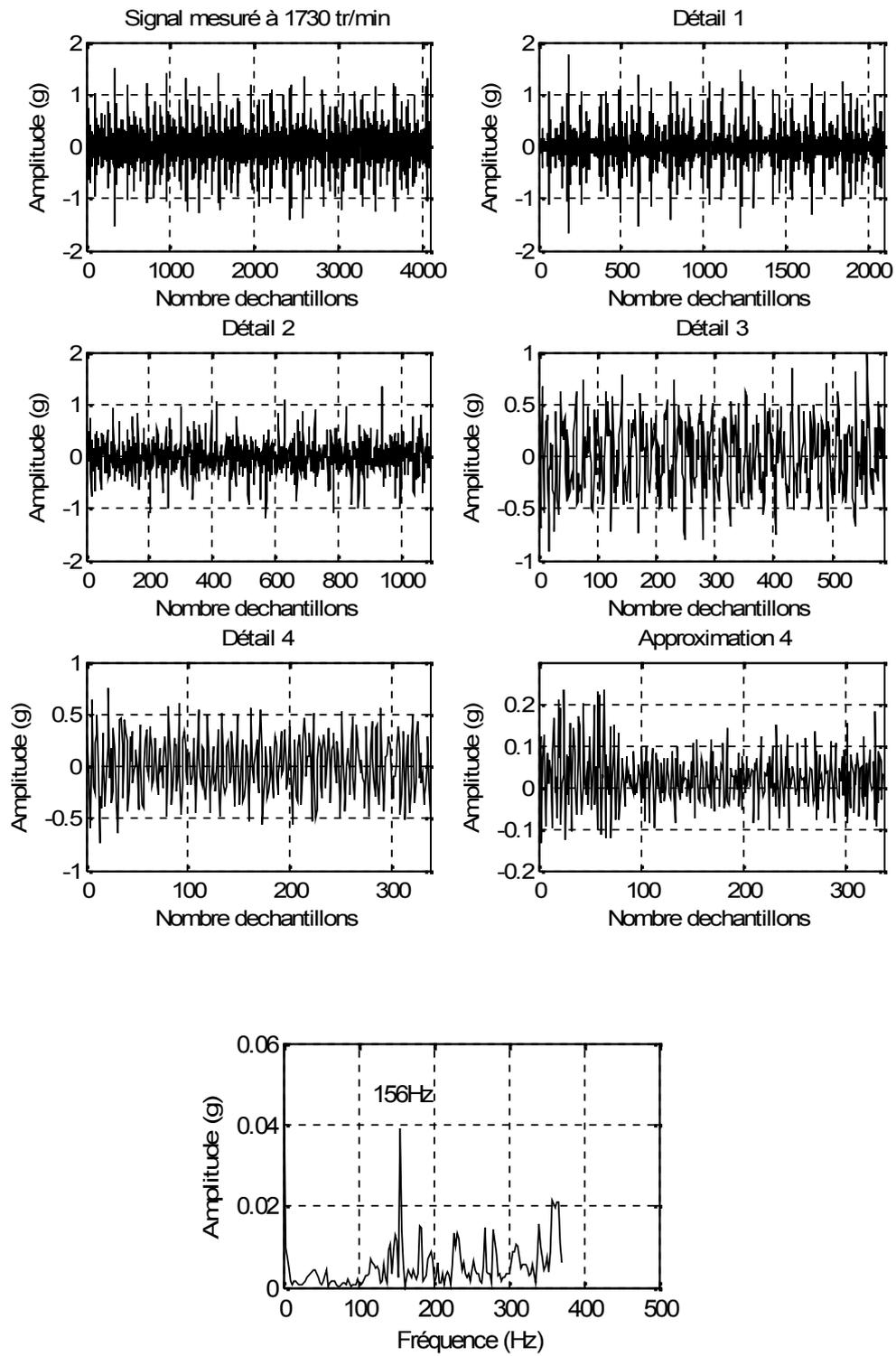
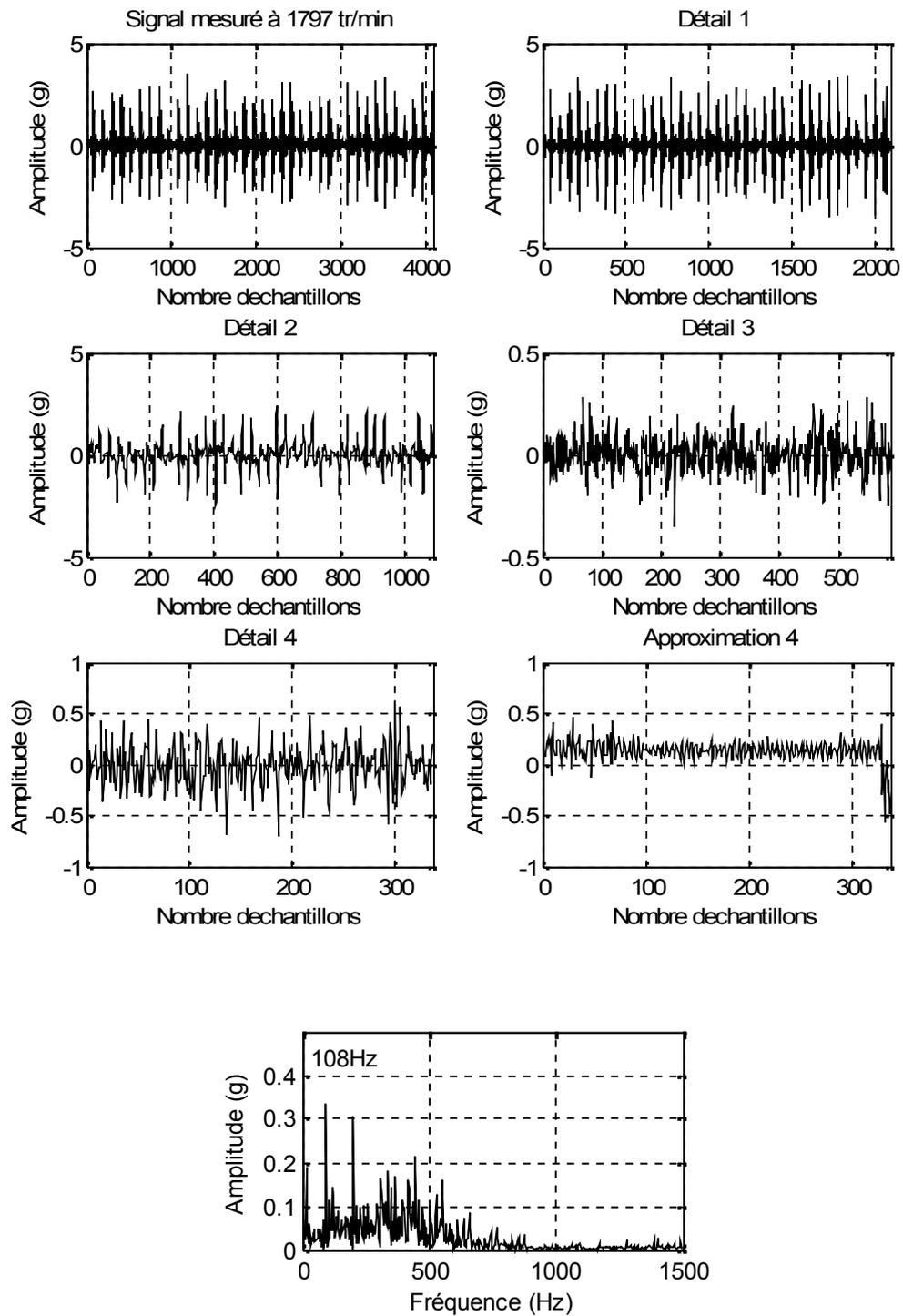


Figure III-10 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieur mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1



(b)

Figure III-11 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1

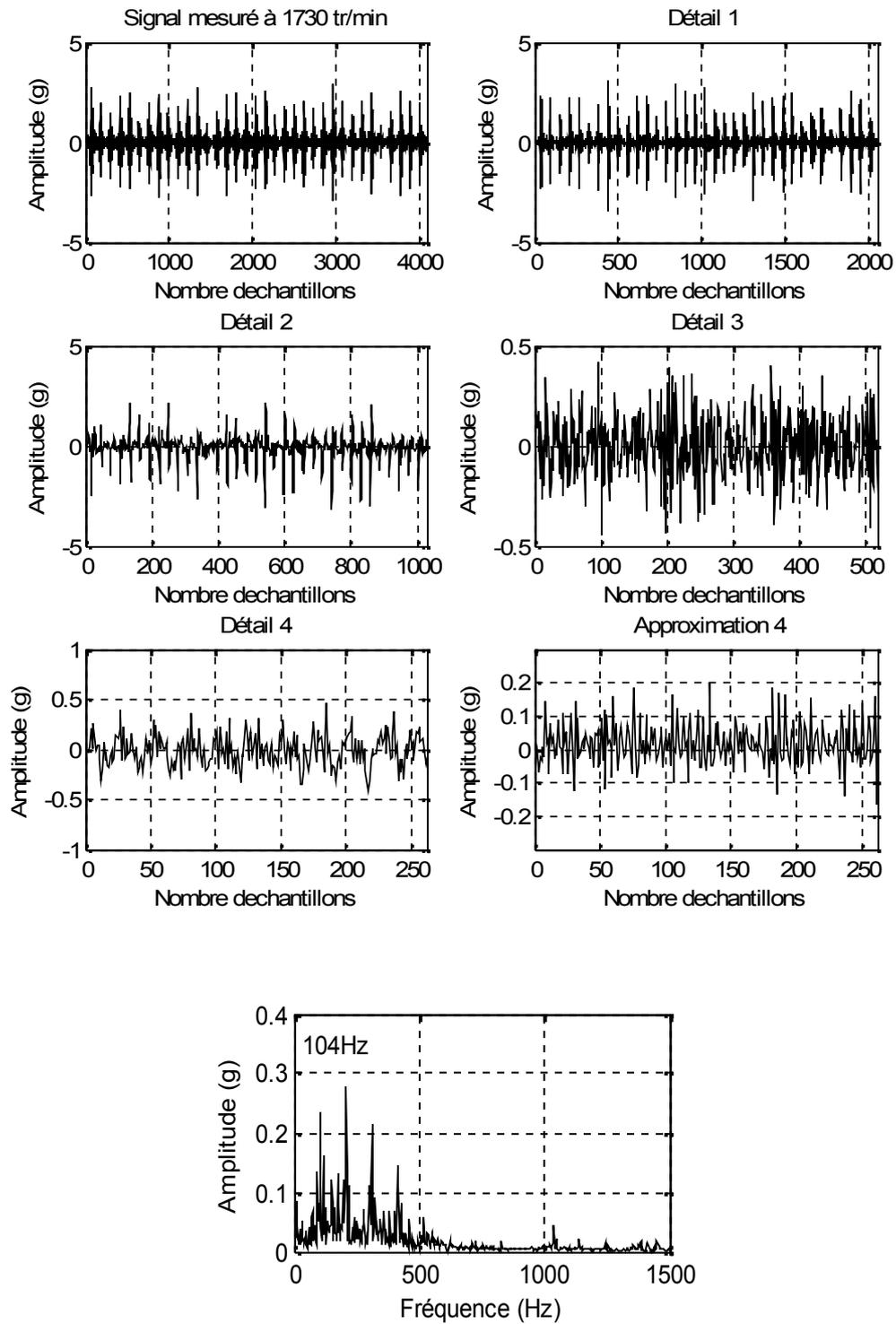


Figure III-12 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut détail 1

III.7 Application de l'analyse par paquets d'ondelettes pour diagnostiquer les défauts de roulement

Les décompositions des signaux des défauts de roulement et de leurs Spectres obtenus par l'analyse de paquets d'ondelettes en utilisant l'ondelette mère de Daubechie 4 sont illustrées sur les figures III-13, III-14, III-15 et III-16.

A partir de les figures III-13, III-14, on observe les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz et leurs multiples. Il est remarqué que les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz sont très proches des pics de fréquences calculées d'un défaut de bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un défaut de bague intérieure.

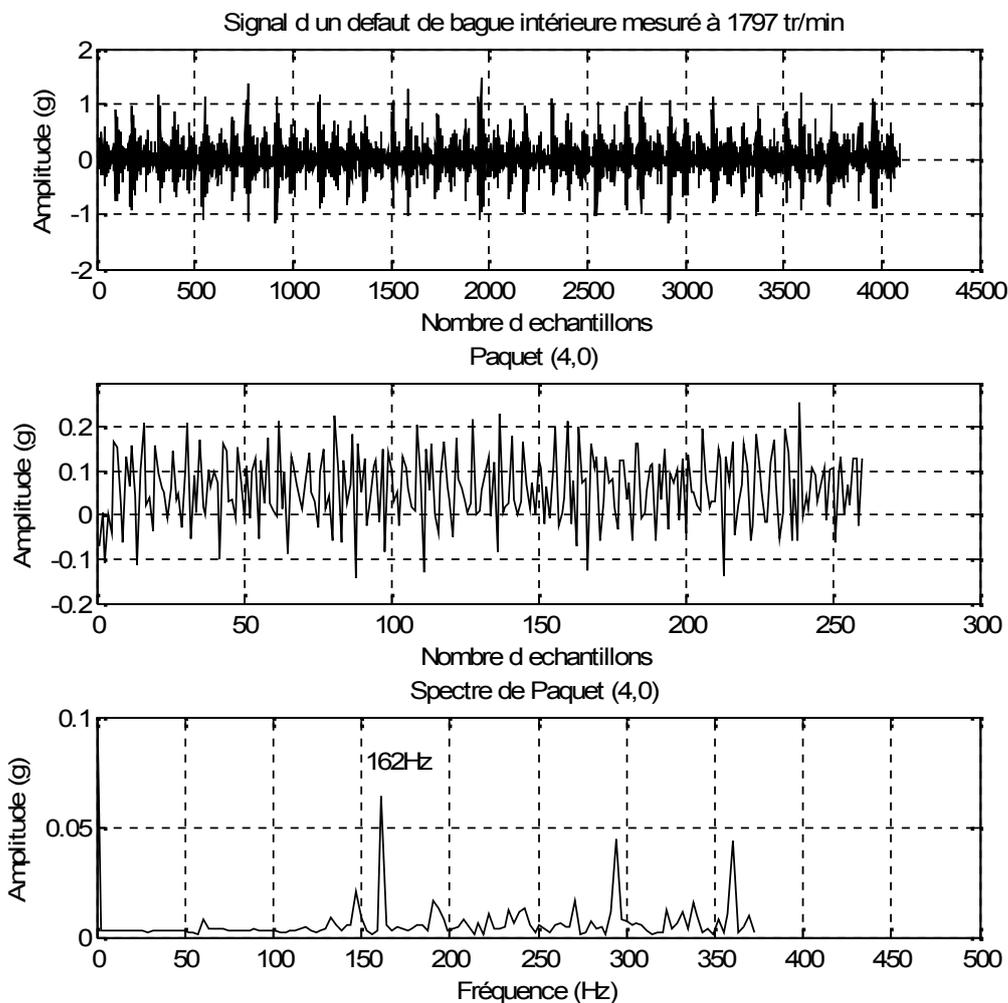


Figure III-13 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

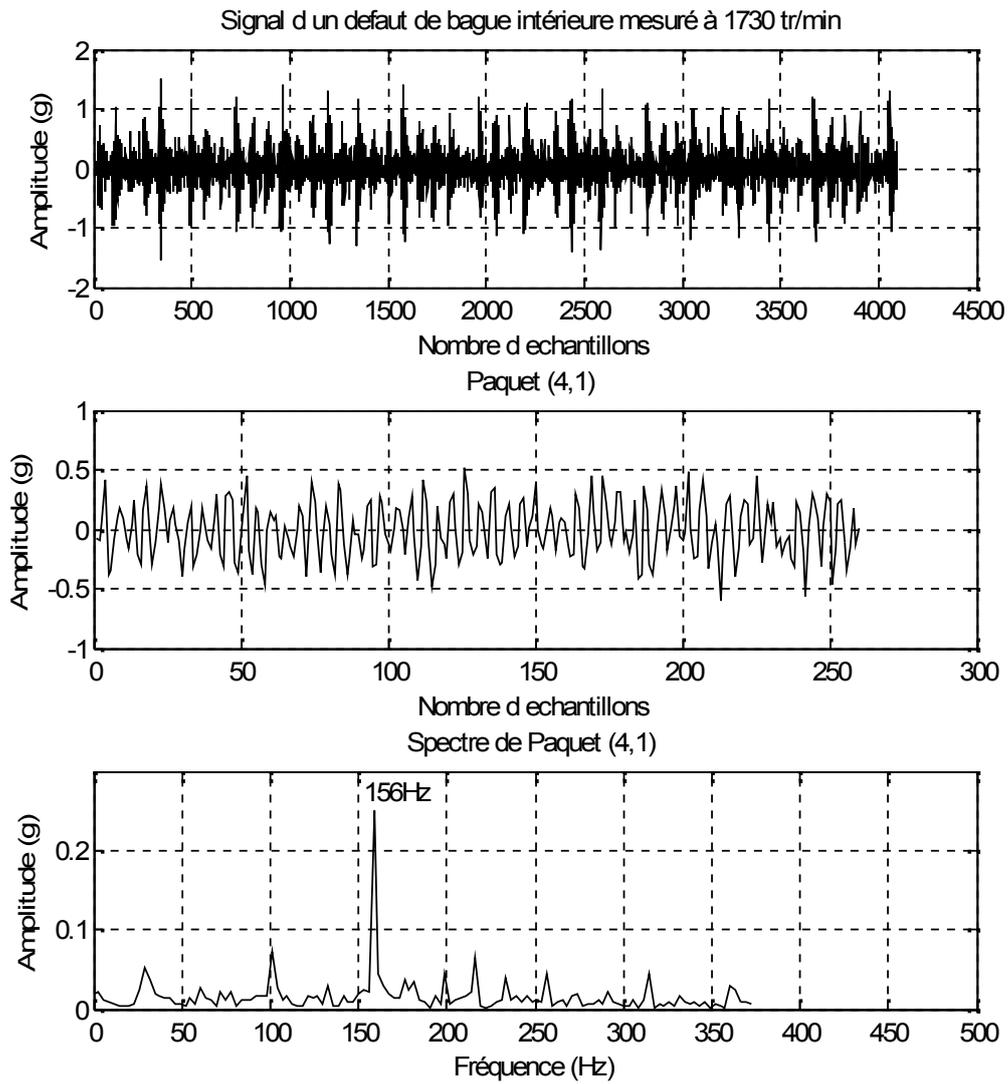


Figure III-14 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

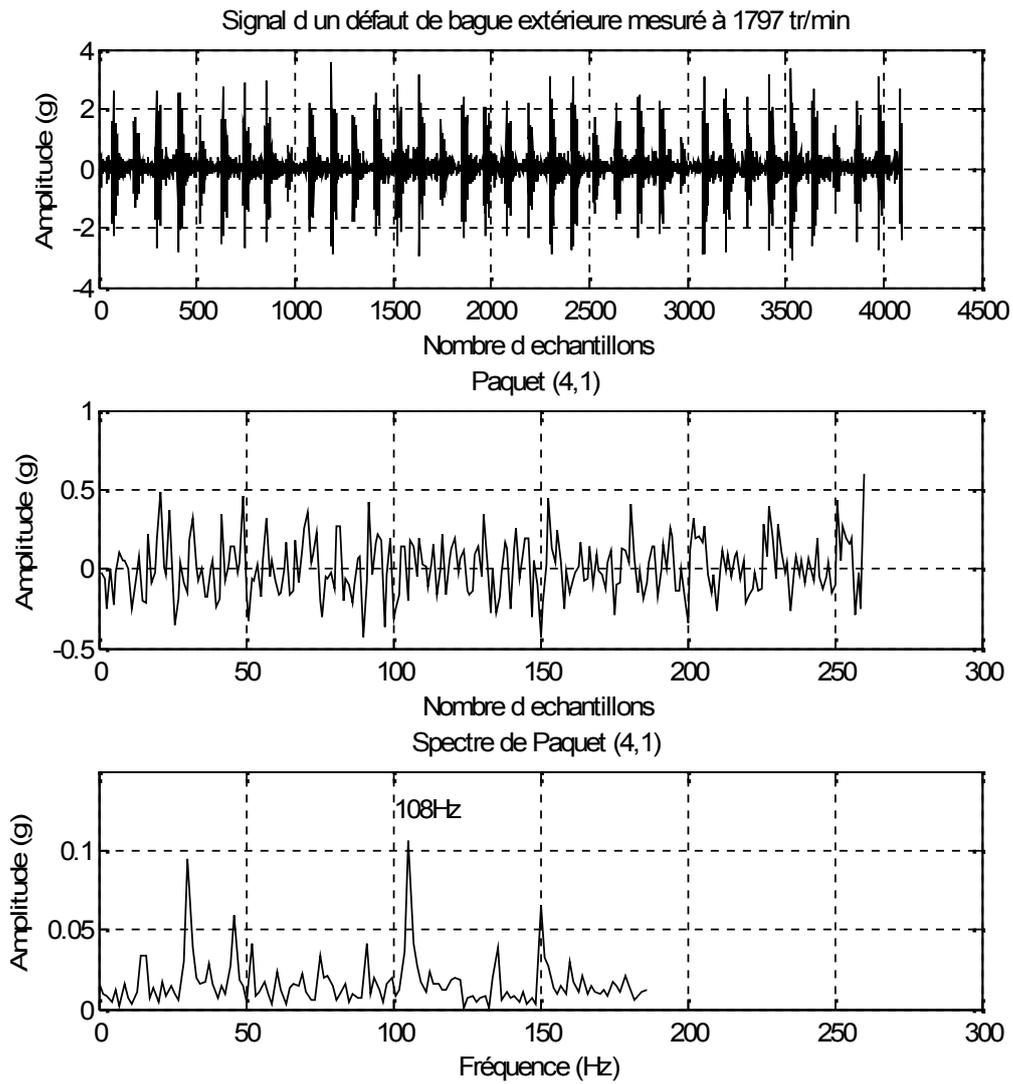


Figure III-15 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

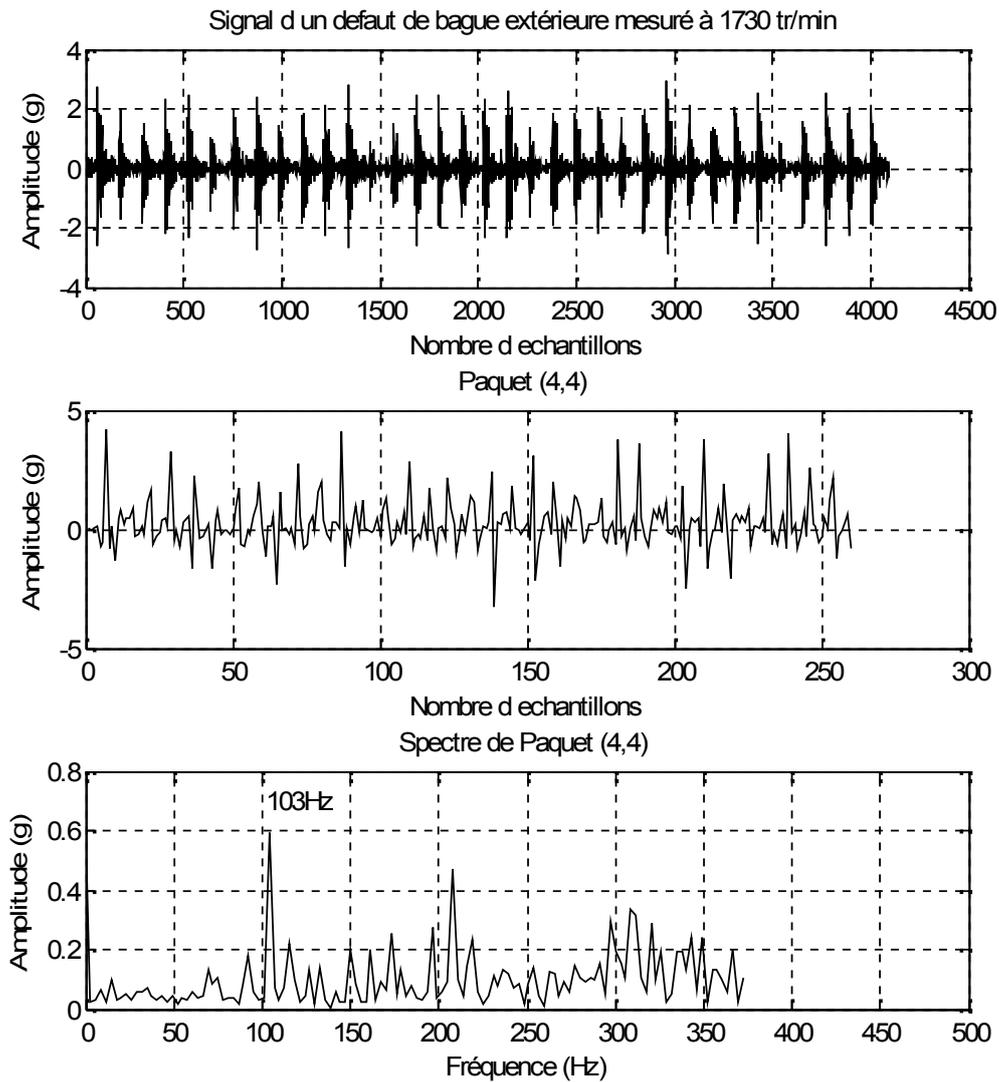


Figure III-16 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

L'identification des défauts de roulement est également possible en utilisant l'analyse par paquets d'ondelettes. Malheureusement, avec cette méthode, on se trouve confronté à trois problèmes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts.

III-8. Contribution à l'amélioration de l'analyse multi résolution en ondelettes

Afin de remédier aux limitations de la technique d'analyse multi résolution en ondelettes, nous proposons dans cette partie une nouvelle technique de diagnostic des défauts de roulements. Elle se base sur la combinaison de la transformée de Hilbert (TH) et le théorème de Parseval.

La méthodologie appliquée comprend les étapes suivantes:

Étape 1 : Chargez le signal original de défaut $x(t)$

Étape 2 : Calculer le nombre optimal de niveau de décomposition

Djebala Abedrezzak et al [17] ont proposé une méthode pour calculer le niveau optimal de la décomposition. Le nombre optimal de niveaux est donné par l'équation (III.9) [18] :

$$n = 1.44 \log \frac{F_{max}}{3F_c} \quad (III.9)$$

Avec n un nombre entier arrondi à la valeur supérieure, F_c est la fréquence de chocs, F_{max} est la fréquence maximale du signal mesuré.

Étape 3 : Décomposer le signal original $x(t)$ en utilisant l'analyse multirésolution en ondelettes jusqu'à n niveaux en utilisant ondelettes DB4.

$$S = D1 + D2 + D3 + \dots Dn + An$$

Étape 4 : Calculez la distribution d'énergie pour chaque détail coefficients et pour l'approximation finale

➤ *Théorème de Parseval*

Bendjama et al [19] ont appliqué le théorème de Parseval pour calculer le vecteur optimal de la décomposition. En mathématiques ce théorème se réfère au résultat que la somme des carrés d'une fonction est égale à la somme des carrés de sa transformée (Transformée de Fourier, Transformée de Hilbert (TH), Transformée en ondelette).

En utilisant la TO, le théorème de Parseval peut être défini comme suit: L'énergie d'une fonction dans le domaine temporel est égal à la somme de toute les énergies des différents niveaux de décomposition du signal [20]. L'énergie des signaux entrant dans la décomposition d'ondelette peut être décrite par :

$$\sum_{k=1}^N |x(k)|^2 = \sum_{k=1}^N |a_j(k)|^2 + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^N |d_j(k)|^2 \quad (\text{III.10})$$

Où $x(k)$ est le signal temporel, N le nombre d'échantillons et m le niveau maximum de décomposition. Le terme à gauche représente l'énergie totale. Le premier et le second terme à droite désignent respectivement, l'énergie de l'approximation au niveau j et l'énergie du détail aux niveaux comprises entre 1 et m . Pour extraire le maximum d'informations contenues dans les niveaux de décompositions, la distribution d'énergie de l'approximation et les détails est calculée par :

$$P_a = \frac{\|a\|^2}{N_j} \quad (\text{III.11})$$

$$P_d = \frac{\|d_j\|^2}{N_j} \quad (\text{III.12})$$

Où $\| \cdot \|$ est la norme.

Etape 5 : Sélectionnez l'approximation ou le détail qui a la plus grande valeur de l'énergie.

Etape 6 : Effectuer la transformée de Hilbert pour obtenir le signal analytique de l'approximation ou le détail qui a sélectionné à l'étape 4, et extraire son enveloppe.

- **Transformée de Hilbert (TH)**

Les techniques de traitement des signaux sur la base de transformée de Hilbert ont été utilisés pour extraire les composantes de modulation qui sont capables de caractériser les modes de défaillance du roulement [16].

La transformée de Hilbert est donné par l'équation [16] (III.13):

$$\tilde{f}(t) = \frac{1}{f} \int \frac{f(\dagger)}{t - \dagger} d\dagger \quad (\text{III.13})$$

Où $\tilde{f}(t)$ est la transformée de Hilbert de $f(t)$ et \dagger une variable temporelle.

$\tilde{f}(t)$ est la convolution de $f(t)$ avec la fonction: $1/f.t$, soit:

$$\tilde{f}(t) = f(t) \times \frac{1}{f.t} \quad (\text{III.14})$$

Cette fonction dans le domaine complexe, n'est autre que le signal:

$$\hat{f}(t) = f(t) + j\tilde{f}(t) \quad (\text{III.15})$$

Le module de $\hat{f}(t)$ définit l'enveloppe de $f(t)$, soit sa démodulation:

$$|\hat{f}(t)| = \sqrt{f(t)^2 + \tilde{f}(t)^2} \quad (\text{III.16})$$

Etape 7. Effectuer l'analyse du spectre d'enveloppe sélectionné à l'étape 5 pour extraire les caractéristiques de défaut.

Dans l'application proposée :

➤ **Choix du nombre optimal de niveaux de décomposition**

Le niveau de décomposition est calculé à partir la formule (III.9)

- Le niveau optimal de la décomposition du défaut de défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min ,1797 tr/min est :

$$n_{\text{ext}} = 1.44 * (\log((4.6877e+003/(3*100)))) = 4 \text{ niveaux.}$$

- Le niveau optimal de la décomposition du défaut de défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min ,1797 tr/min est :

$$N_{\text{int}} = 1.44 * (\log((4.6877e+003/(3*158.3)))) = 4 \text{ niveaux.}$$

➤ **Choix du vecteur optimal de la décomposition en ondelettes**

On va calculer l'énergie de l'approximation et les détails pour Sélectionner l'approximation ou le détail qui a la plus grande valeur de l'énergie.

La distribution d'énergie de l'approximation est calculé à partir la formule (III.11).

La distribution d'énergie des détails est calculé à partir la formule (III.12).

La distribution d'énergie de l'approximation et les détails de défaut des bagues intérieure et extérieure sont représentés dans Figure III-17.

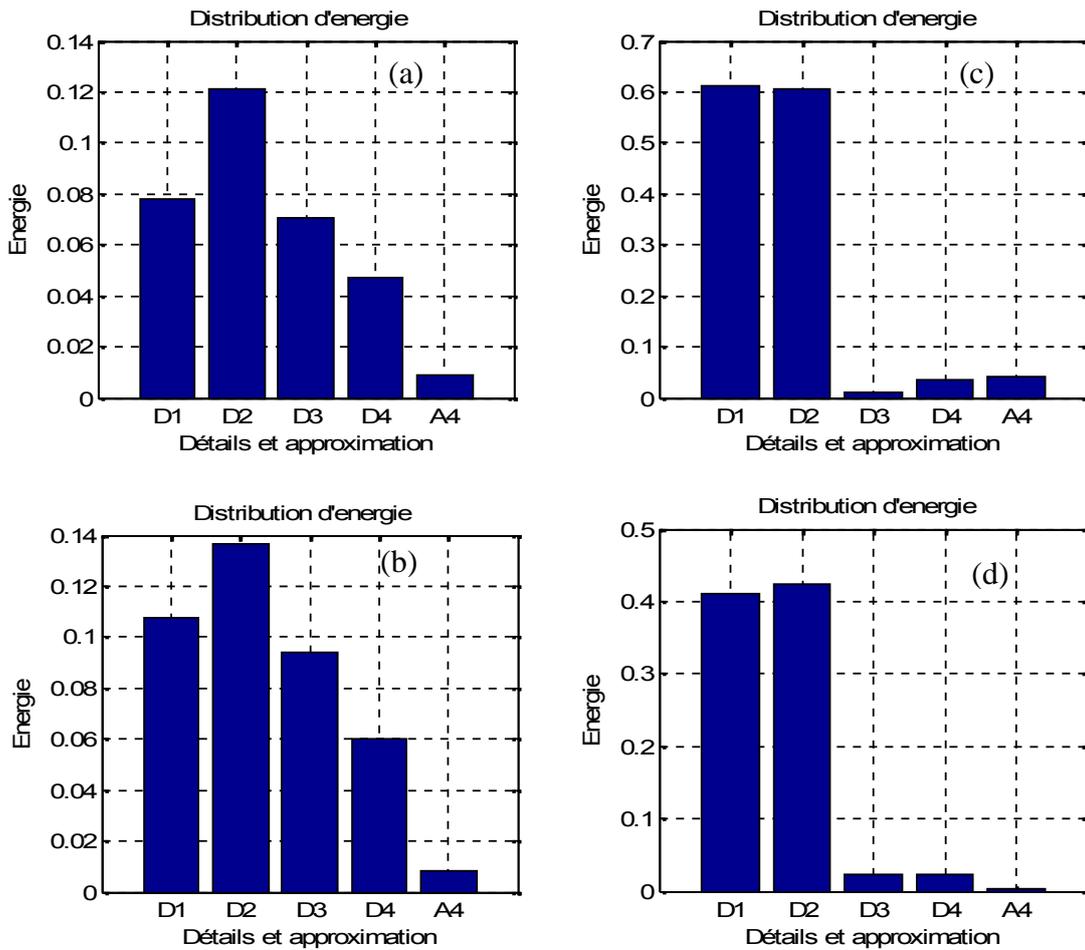


Figure III-17 : Distribution d'énergie (a) Défaut de bague intérieure mesuré 1797 tr/min (b) Défaut de bague intérieure mesuré 1730 tr/min, (c) Défaut de bague extérieure mesuré 1797 tr/min, (d) Défaut de bague extérieure mesuré 1730 tr/min

A partir de la Figure III-18, on peut sélectionner l'approximation ou le détail qui a la plus grande valeur de l'énergie.

Pour le défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min on a le détail 2 (D2)

Pour le défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min on a le détail 2(D2)

Pour le défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min on a le détail 1(D1)

Pour le défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min on a le détail 2(D2)

Le Spectre d'enveloppe de défaut de la bague intérieure déterminé par la nouvelle méthode est représenté dans Figure III-18.

Le Spectre d'enveloppe de défaut de la bague extérieure déterminé par la nouvelle méthode est représenté dans Figure III-19.

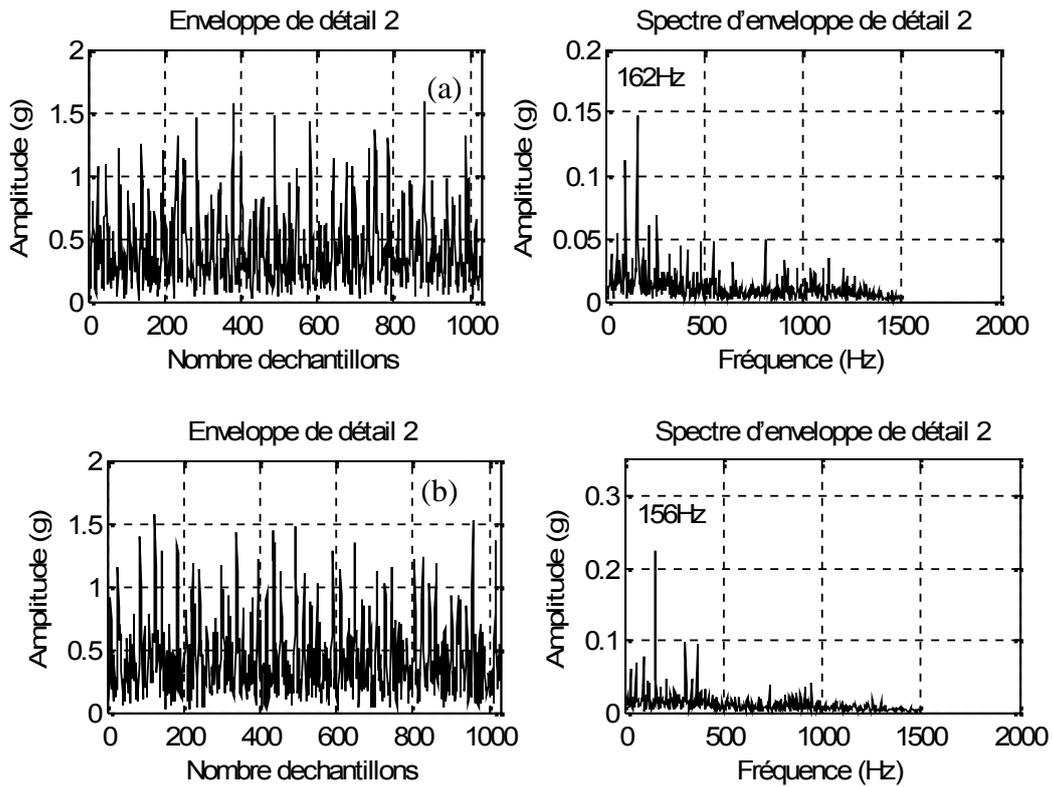


Figure III-18 : Spectre d'enveloppe de défaut de bague intérieure par la nouvelle méthode

(a) Mesuré à 1797 tr/min, (b) Mesuré à 1730 tr/min

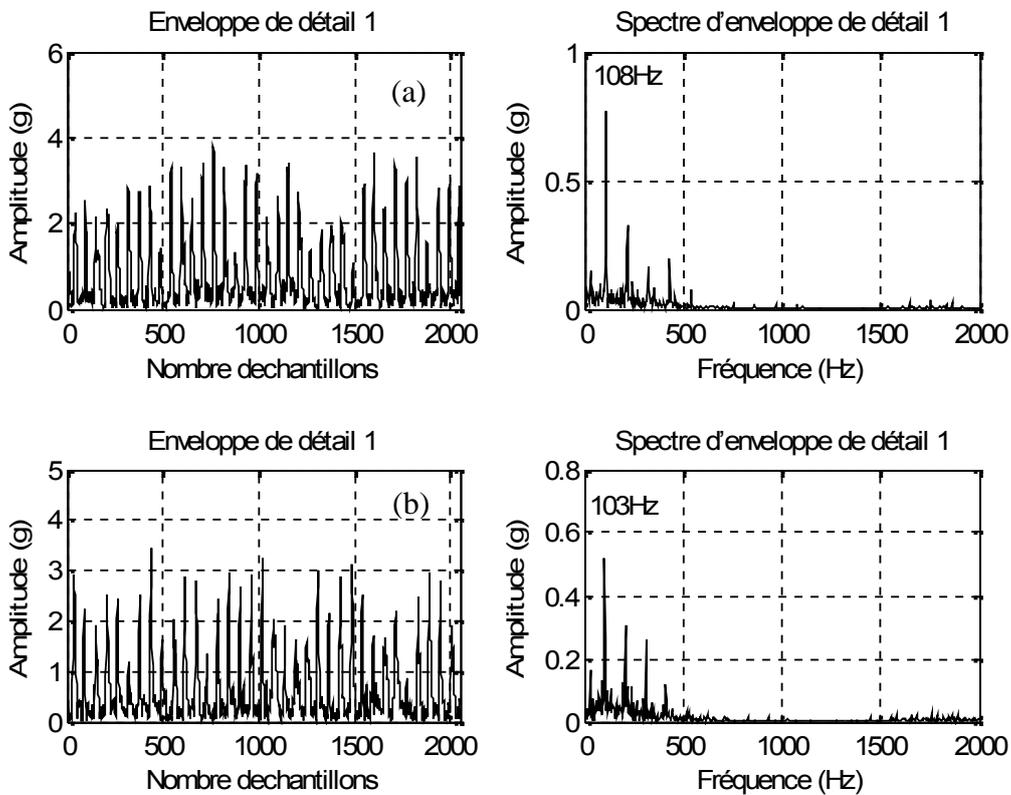


Figure III-19 : Spectre d'enveloppe de défaut de bague extérieure par la nouvelle méthode

(a) Mesuré 1797 tr/min, (b) Mesuré 1730 tr/min.

On peut voir clairement à partir de la figure III-18 les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz et leurs multiples. Les pics de fréquences à 162 Hz et 156 Hz sont très proches des fréquences calculées du défaut de bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Cela indique clairement la présence du défaut.

Quant à la figure III-19, elle présente clairement les pics de fréquence à 108 Hz et 103 Hz et leurs multiples. Les pics de fréquences à 108 Hz et 103Hz sont très proches des fréquences calculées et qui correspondent au défaut de la bague extérieure à 107.37 Hz et 103,37 Hz telles que mentionnées dans le tableau III-2. Cela indique clairement la présence du défaut.

L'identification et la surveillance des défauts de roulement en utilisant la méthode proposée sont très faciles. En outre, le résultat expérimental montre qu'avec la méthode proposée on peut, efficacement, choisir le niveau de décomposition approprié et sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts ce qui n'est pas possible avec méthode traditionnelle d'ondelettes. Néanmoins ce procédé nécessite beaucoup de temps de calcul pour sa mise en œuvre.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur l'application de la transformée en ondelettes (TO) pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements dans les machines tournantes. Malheureusement, il y a trois problèmes dans l'analyse d'ondelettes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts.

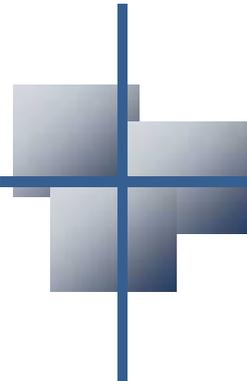
Afin de remédier aux limitations de la technique d'analyse Multi-résolution en ondelettes, nous avons proposé dans ce chapitre une nouvelle technique de diagnostic des défauts de roulements. Elle se base sur la combinaison de la transformée de Hilbert (TH) et le Théorème de Parseval. Le résultat expérimental a montré que la méthode proposée peut efficacement choisir le niveau de décomposition approprié et sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts ce qui n'est pas possible avec méthode traditionnelle d'ondelettes. Néanmoins ce procédé nécessite beaucoup de temps de calcul pour sa mise en œuvre.

Dans le chapitre suivant on va présenter une étude comparative de différentes méthodes de détection de défauts de roulements, ainsi qu'on va développer une nouvelle méthode pour surmonter les limites de ces méthodes.

III.10 Références bibliographiques

- [1] K.A. Loparo, “Bearings vibration data set”, Case Western Reserve University, (<http://www.eecs.cwru.edu>),2003.
- [2] R. B. Randall, “Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes”. *Engineering Failure Analysis*,Vol.2 ,pp.177-190,2004.
- [3] A. Boudiaf, S. Bouhouche, A.K. Moussaoui, S. Taleb, “An effective method for bearing faults diagnosis”, In: *IEEE Proceeding of 3rd International Conference on Control Engineering & Information Technology*, pp. 1–6, 2015.
- [4] M. Natu, “Bearing Fault Analysis Using Frequency Analysis and Wavelet Analysis”. *International Journal of Innovation, Management and Technology* ,Vol.4 ,pp.90-92,2004.
- [5] Q .Sun, Y .Tang , “Singularity analysis using continuous wavelet transform for bearing fault diagnosis”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16,pp.1025–1041,2002.
- [6] P .Konar , P .Chattopadhyay ,“Multi-class fault diagnosis of induction motor using Hilbert and Wavelet Transform”. *Applied Soft Computing* , Vol.30,pp. 341–345,2015.
- [7] M.Barghi Latran, A.Teke, “A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm”. *Electrical Power and Energy Systems* , Vol.71,pp. 131–135, 2015.
- [8] R.Yan, R.X. Gao, X. Chen. ,“Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications” *journal of Signal processing* , Vol.96,pp. 1–15, 2014.
- [9] S. Khanam , N. Tandon ,J.K. Dutt ,“Fault size estimation in the outer race of ball bearing using discrete wavelet transform of the vibration signal” . *Procedia Technology* , Vol.14,pp. 12–19, 2014.
- [10] X. Wang , C. Liu , F. Bi , X. Bi , K. Shao “ Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension” *Mechanical Systems and Signal Processing* , Vol.41,pp. 581–597 , 2013.
- [11] B. Liu, “Selection of wavelet packet basis for rotating machinery fault diagnosis,”*Journal of Sound and Vibration*,vol.284, pp. 567-582, 2005.
- [12] C. Castejon, M. J. Gomez, J. C. Garcia-Prada, A. J.Ordonez, H. Rubio “ Automatic Selection of the WPT Decomposition Level for Condition Monitoring of Rotor Elements Based on the Sensitivity Analysis of the Wavelet Energy” *Mechanical International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 20, pp. 95-100, 2015.

- [13] A. Boudiaf, A.k. Moussaoui, A. Dahane, I. Atoui, “A Comparative Study of Various Methods of Bearing Faults Diagnosis Using the Case Western Reserve University Data”. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol.16 ,pp.271-284,2016.
- [14] X. Wang , C. Liu , F. Bi, X. Bi, K. Shao “ Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension” *Mechanical Systems and Signal Processing* , Vol.41,pp. 581–597, 2013.
- [15] B. Liu, “Selection of wavelet packet basis for rotating machinery fault diagnosis,”*Journal of Sound and Vibration*,vol.284, pp. 567-582, 2005.
- [16] C. Castejon, M. J. Gomez, J. C. Garcia-Prada, A. J.Ordonez, H. Rubio, “ Automatic Selection of the WPT Decomposition Level for Condition Monitoring of Rotor Elements Based on the Sensitivity Analysis of the Wavelet Energy” *Mechanical International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 20, pp. 95-100, 2015.
- [17] A. Djebala, “ Application de la transformee par ondelettes a L’etude et l’analyse vibratoire des systemesMecaniques”, Thèse de Doctorat, Université de guelma, Algérie, 2008.
- [18] A. Djebala , N. Ouelaa , N. Hamzaoui , “Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis”. *Meccanica* , Vol.43,pp. 339–348, 2008.
- [19] H. Bendjama, D. Idiou, K. Gherfi, Y.Laib, “Selection of Wavelet Decomposition Levels for Vibration Monitoring of Rotating Machinery”. *Proceeding of the Ninth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences*, 2015.
- [20] H .Bendjama, “ Contribution a la détection et au diagnostic des défauts .Application aux systèmes dynamiques et aux matériaux ”, Thèse de Doctorat, École national polytechnique, Algérie, 2012.



Chapitre IV :

Nouvelle approche dans la
détection des défauts de
roulements et étude comparative

Chapitre IV :

Nouvelle approche dans la détection des défauts de roulements et Étude comparative

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente la nouvelle technique développée pour la détection des défauts de roulements, avec une étude comparative de différentes méthodes utilisées, telles que : l'analyse temporelle, l'analyse spectrale, l'analyse d'Enveloppe (AE), l'analyse cepstrale (AC), l'analyse en ondelettes. Le but de l'étude est d'examiner ces techniques d'analyse de vibrations et en explorer les capacités, avantages et inconvénients. La nouvelle technique développée quant à elle, viendra surmonter les limites de ces méthodes.

IV.2 Description du dispositif expérimental

L'étude se base sur des mesures vibratoires réalisées sur le même banc d'essai décrit précédemment (Figure III-1). Cet outil permet d'introduire les principaux défauts existants dans les roulements et d'acquérir les mesures et données les concernant. Les fréquences théoriques des défauts de roulement sont regroupées le tableau IV-1.

Tableau IV-1: Les fréquences théoriques des défauts de roulement théorique

Type de défaut	défaut de bague intérieure		défaut de bague extérieure	
Charge du moteur (cheval-vapeur)	0	3	0	3
Vitesse du moteur (tr/min)	1797	1730	1797	1730
Fréquence de Vitesse de moteur f_r (Hz)	29,94	28,83	29,94	28,83
Les fréquences des défauts de roulement théorique en Hz calculées par les équations (III-1) et (III-2)	162,2	156,13	107,37	103,37

IV.3 Les méthodes de diagnostic des signaux vibratoires

Les signaux de vibration acquis à partir des machines tournantes à des fins de diagnostic sont de nature non stationnaire. Et afin d'obtenir des informations utiles à partir de données de vibration pour fournir une aide à la détection précoce, le diagnostic et la correction des défauts, une méthode appropriée de traitement de signal doit être choisie. Nous présentons dans cette section quelques méthodes de traitement du signal qui peuvent être utilisés pour la détection et de diagnostic des machines tournantes.

IV.3.1 L'analyse temporelle

Dans cette méthode l'analyse ou l'interprétation d'un signal de vibration se fait à travers plusieurs paramètres ou des indicateurs tels que la valeur de crête, la valeur crête à crête, le kurtosis, le facteur de crête, le facteur d'impulsion [1-3].

Nous avons choisi d'utiliser le kurtosis comme indicateur scalaire pour la détection de défaut de roulements.

Le kurtosis est actuellement l'indicateur scalaire le plus fiable. Utilisé pour détecter les défauts induisant des forces impulsives périodiques telles que celles des roulements et des engrenages, et pour lesquels il en donne les meilleurs résultats.

Il est donné par la relation suivante:

$$kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(V_{eff})^4} \quad (IV-1)$$

N le nombre d'échantillons du signal, \bar{x} la valeur moyenne du signal, V_{eff} la valeur efficace du signal

- si $K = 3$, le roulement est en bon état.
- si $3 < K < 6$, le roulement est faiblement dégradé.
- si $K > 6$ avec retour à 3, le roulement est dégradé.

La figure IV-1 représente les valeurs des kurtosis d'un roulement sain et défectueux sur la bague intérieure et extérieure.

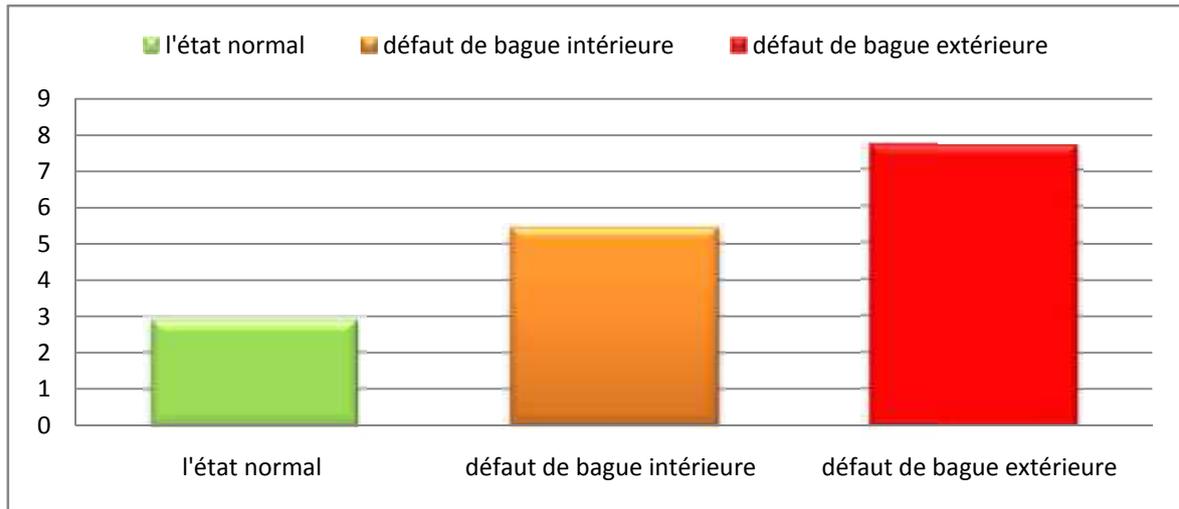


Figure IV-1 : Kurtosis d'un roulement à l'état sain et à l'état défectueux

À partir de cette figure, nous concluons que l'augmentation de ces indicateurs aide à la détection de développement de défauts, mais son inconvénient est l'impossibilité de déterminer le composant défectueux de la machine tournante.

IV.3.2 L'analyse spectrale

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un outil traditionnel de traitement du signal. Elle repose sur le fait que tout signal peut être décomposé en une suite de sinusoides de différentes fréquences [4-6]. Elle est définie par l'équation suivante :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (IV-2)$$

Où $x(t)$, $X(f)$, et f sont respectivement le signal temporel, le signal fréquentiel et la fréquence.

Les figures IV-2, IV-3 et IV-4 représentent les spectres de l'état normal, du défaut de bagues intérieures et du défaut de bagues extérieures respectivement.

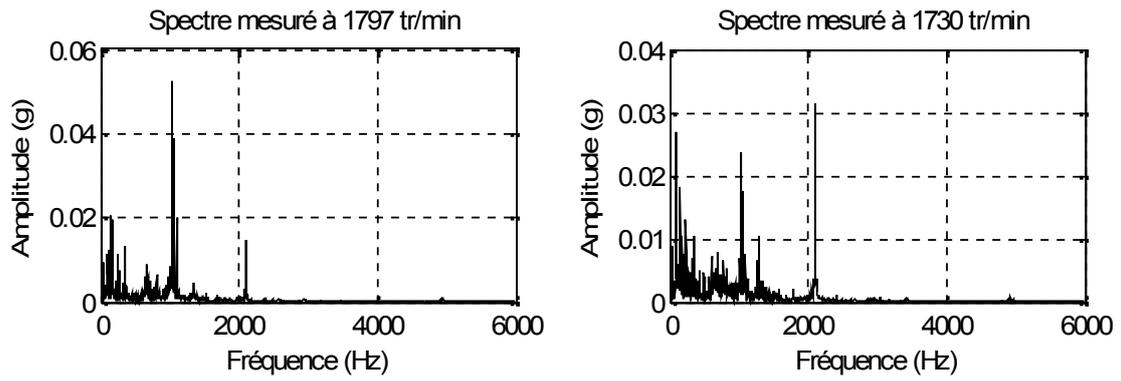


Figure IV-2 : Spectre de l'état sain de roulement

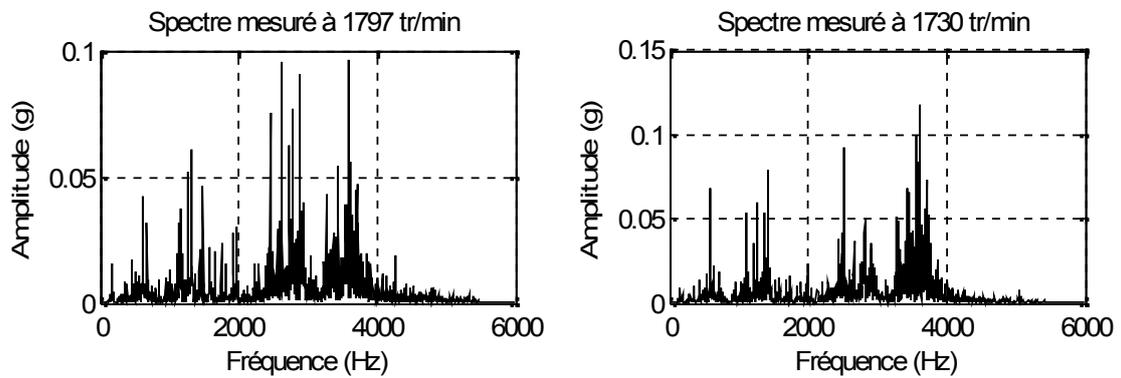


Figure IV-3 : Spectre d'un défaut sur la bague intérieure obtenue par la transformée de fourrier rapide

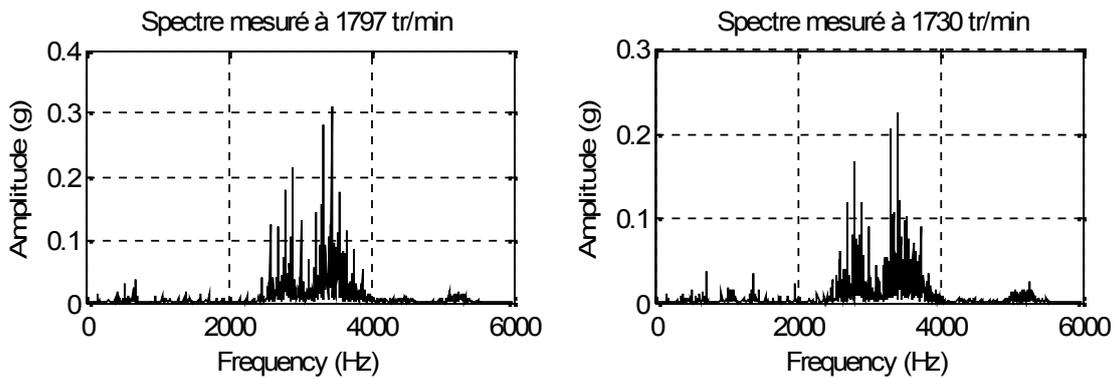


Figure IV-4 : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure obtenue par la transformée de fourrier rapide

On peut voir d'après les Figures IV-3 et IV-4, que les amplitudes des raies ont augmenté par rapport à ceux de la Figure IV-2, ce qui confirme le changement de l'énergie du signal (indiquant l'existence d'un défaut). Néanmoins, le pic de fréquence du défaut de roulement n'est pas assez fort à distinguer. Par conséquent, la FFT n'est pas une méthode appropriée pour découvrir quel composant du roulement est défectueux.

IV.3.3 L'analyse de l'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques (défaut de roulements, d'engrenages) à partir des résonances de structure. La méthodologie de travail de l'analyse de l'enveloppe est constituée de trois opérations: filtrage de signaux, extraction d'enveloppe du signal filtré par l'application de la transformée de Hilbert (HT), et la détermination du spectre de l'enveloppe par l'application de la transformée de Fourier rapide [7-11].

Transformée de Hilbert du signal $x(t)$ est donnée par :

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{f} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{IV-3})$$

Le signal analytique $x_+(t)$ du signal $x(t)$ est défini comme :

$$x_+(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (\text{IV-4})$$

L'enveloppe $v(t)$ du signal est définie comme étant l'amplitude du signal analytique :

$$v(t) = \sqrt{\hat{x}(t)^2 + x(t)^2} \quad (\text{IV-5})$$

Organigramme de la méthode de l'enveloppe est représenté dans la figure IV-5.

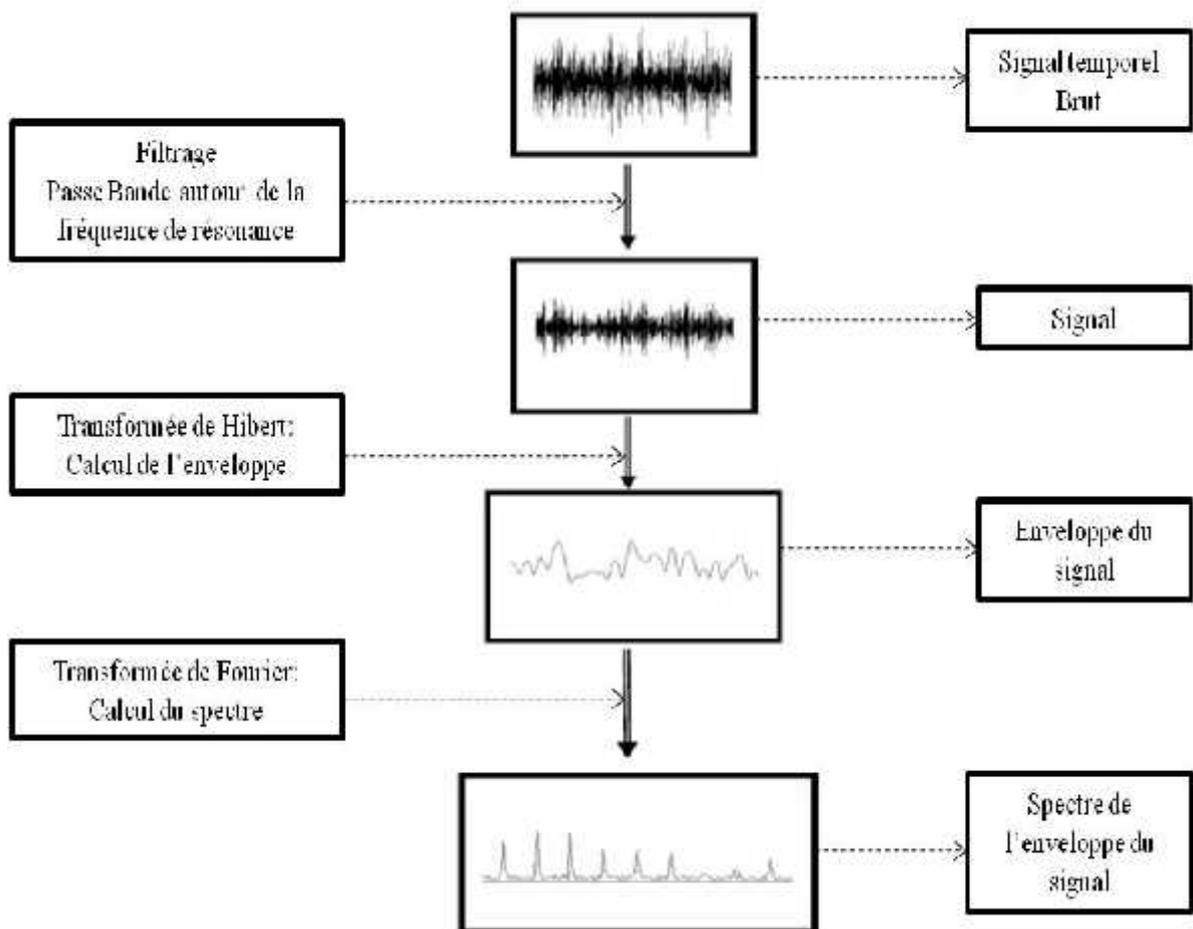


Figure IV-5 : Schéma de fonctionnement de la méthode de l'enveloppe

Les enveloppes de signaux présentant des défauts de roulement, recueillies à 1797 tr/min et 1730 tr/min pour le défaut de bague intérieure et extérieure, sont respectivement présentées sur les Figures IV-6 et IV-7.

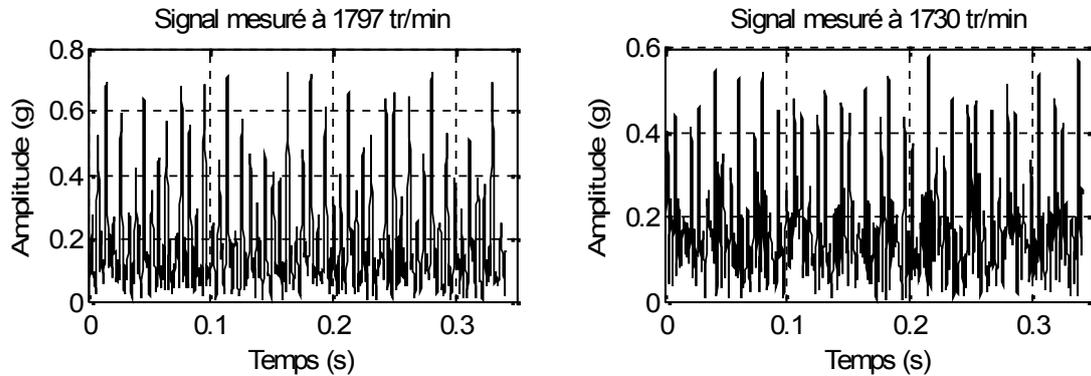


Figure IV-6 : Enveloppes de signaux avec défaut de bagues intérieures

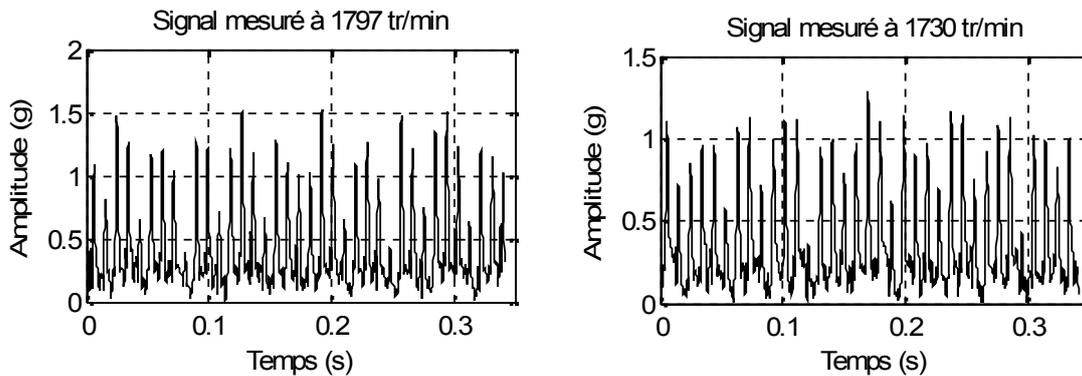


Figure IV-7 : Enveloppes de signaux avec défaut de bagues extérieures

Les figures IV-8 et 9 présentent respectivement des pics aux fréquences à 162 Hz, 156 Hz et 108 Hz et 103 Hz et de leurs multiples en plus des pics dont les fréquences correspondent à celles de la rotation du moteur (29 et 30Hz).

Les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz sont très proches de fréquences calculées de défaut de bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz telles que mentionnées dans le tableau IV-1. Cela indique clairement un défaut de bague intérieure.

Les pics de fréquence à 108 Hz et 103Hz sont très proches de fréquences calculées de défaut de bague extérieure à 107.37 Hz et 103,37 Hz telles que mentionnées dans le tableau IV.1. Cela indique clairement un défaut de bague extérieure.

Ainsi, il est démontré que l'on peut parfaitement procéder à l'identification et la surveillance des défauts de roulements à par l'analyse de l'enveloppe. Néanmoins, les limites de cette

technique résident dans la nécessité de connaître la fréquence de résonance et la bande de filtrage

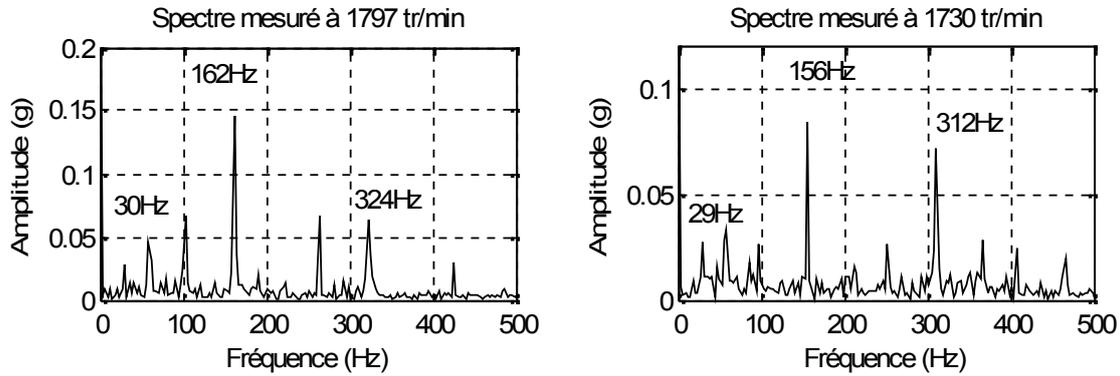


Figure IV-8 : Spectre d'un défaut sur la bague intérieure obtenue par analyse d'enveloppe

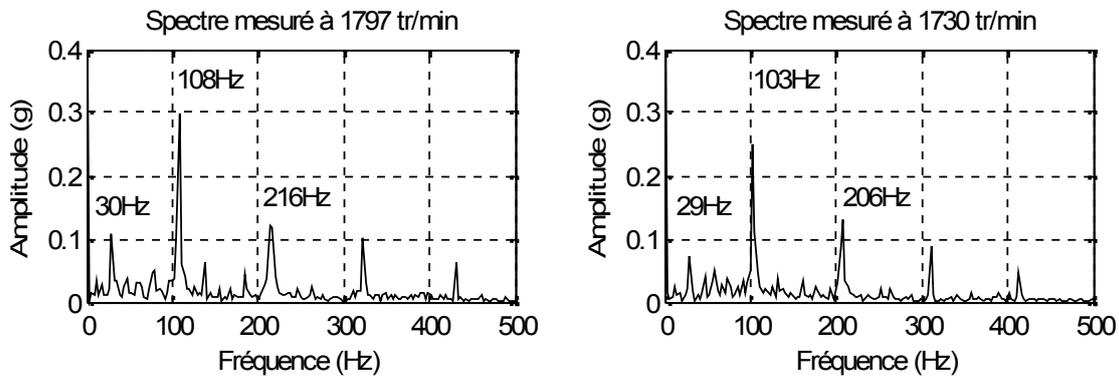


Figure IV-9 : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure obtenue par analyse d'enveloppe

IV.3.4 Analyse cepstrale

L'analyse cepstrale ou l'analyse de quéfrence est un outil très utile pour le diagnostic de défaut induisant des chocs périodiques tels que dans le cas des trains d'engrenages et de roulements. Il existe trois types de cepstres :le cepstre réel , Complexe et de Puissance [12,15].

IV.3.4.1 Cepstre réel

Le cepstre réel est défini comme étant la transformée de Fourier inverse du logarithme de l'amplitude de la transformée de Fourier d'un signal [12,15].

$$R(f) = TF^{-1}[\log(\text{abs}(F(w)))] \quad (\text{IV-5})$$

IV.3.4.2 Cepstre complexe

Le cepstre complexe est défini comme étant la transformée de Fourier inverse du logarithme de la transformée de Fourier d'un signal [12-15].

$$C(\tau) = TF^{-1}[\log(F(w))] \quad (IV-6)$$

IV.3.4.3 Cepstre de puissance

Le cepstre de puissance d'un signal donné, $x(t)$ est définie par :

$$\rho(\tau) = \text{abs}(FFT(\log(\text{abs}(FFT(x))^2)))^2 \quad (IV-7)$$

Le cepstre de Puissance d'un signal donné $x(t)$ peut être tel que présenté sur la figure IV-10.



Figure IV-10 : Cepstre de Puissance

Comme cela est représenté sur les Figures IV-11, IV-13, IV-15, les plus hauts sommets sont localisés à $t = 6.2$ ms et $t = 6,4$ ms. Ils correspondent à des valeurs de fréquences: $f = 161,29$ Hz ($= 1 / 0,0062$) et $f = 156,25$ Hz ($= 1 / 0,0064$). Ces valeurs sont très proches de la fréquence calculée du défaut de la bague intérieure: 162.2 et 156.13 Hz comme indiqué dans le tableau IV-1. Par conséquent, le défaut de bague intérieure est détecté avec succès par cette méthode.

Comme on le voit sur les Figures IV-12, IV-14, IV-16, les plus hauts sommets sont localisés à $t = 9.3$ ms et $t = 9.7$ ms. Les fréquences correspondantes à ces pics sont $f = 107,52$ Hz ($= 1 / 0,0093$) et $f = 103,09$ Hz ($= 1 / 0,0097$). Ces valeurs sont à peu près égales à la fréquence calculée de défaut de bague extérieure au 107.37 et 103.37 Hz comme indiqué dans le tableau IV-1. Par conséquent, le défaut de la bague extérieure est détecté avec succès par cette méthode.

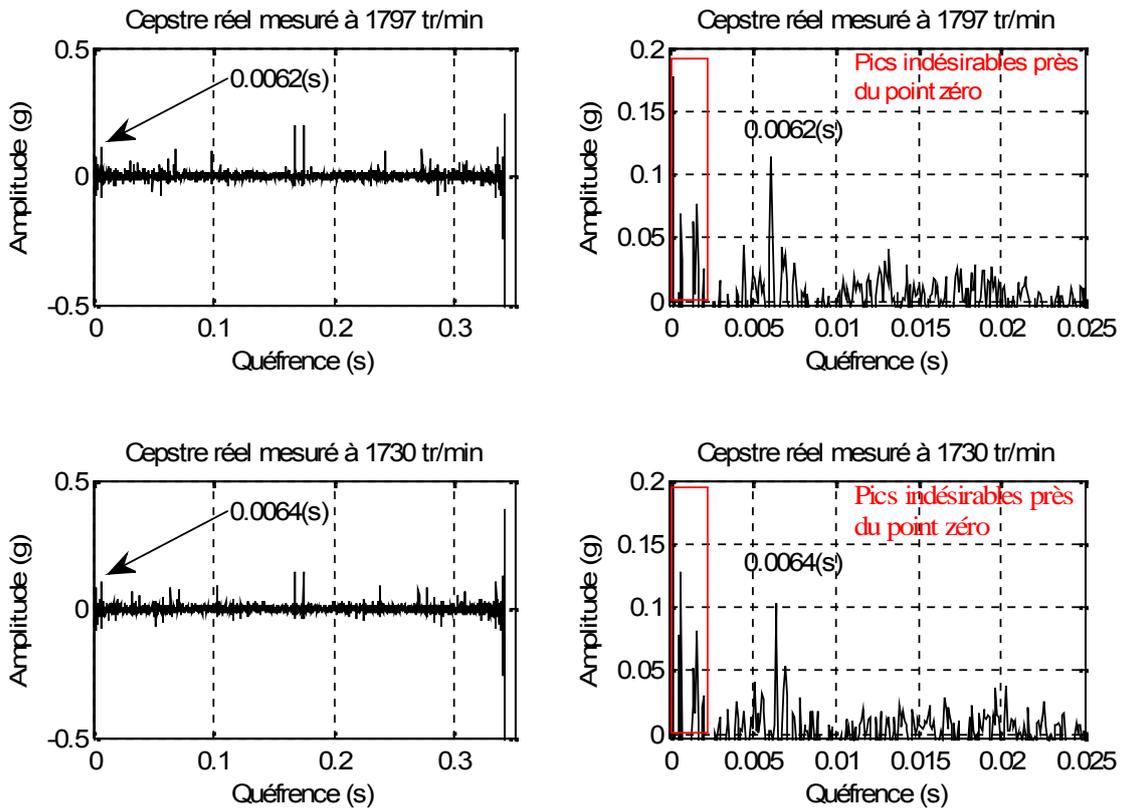


Figure IV-11 : Cepstre réel d'un défaut de bague intérieure et (b) son zoom [0 – 0.025] s

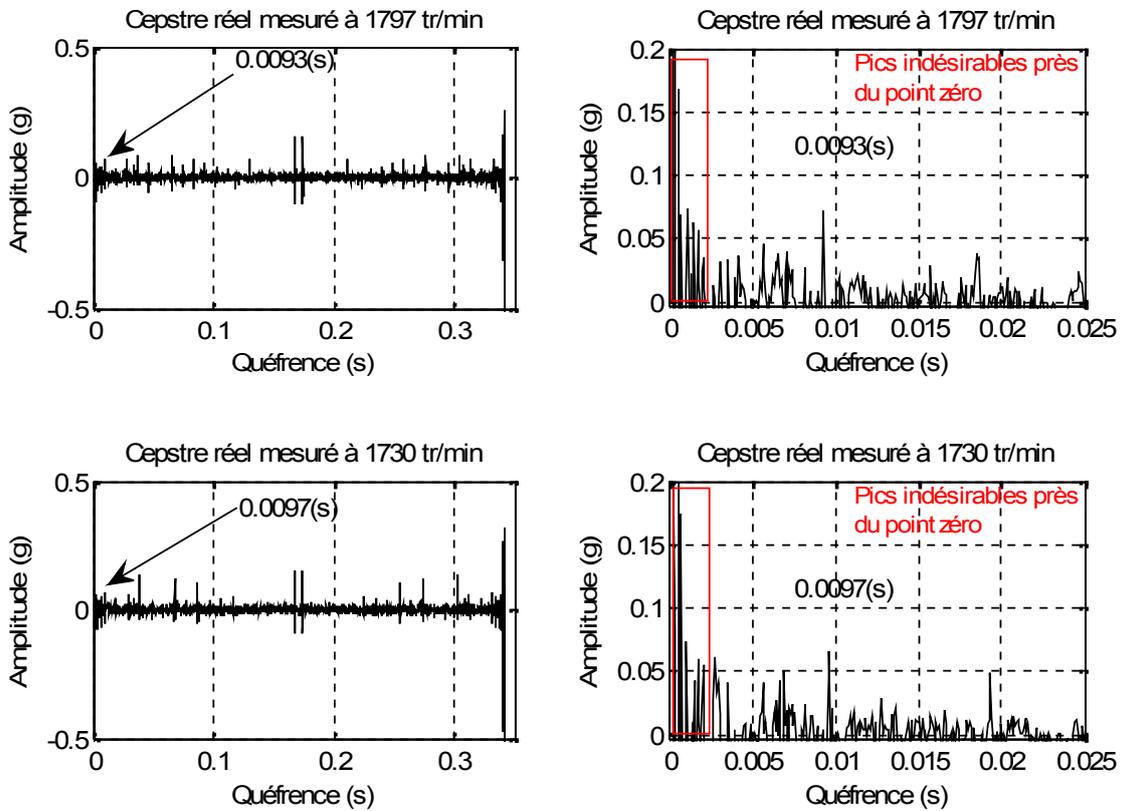


Figure IV-12: Cepstre réel d'un défaut de bague extérieure et (b) son zoom [0 – 0.025] s

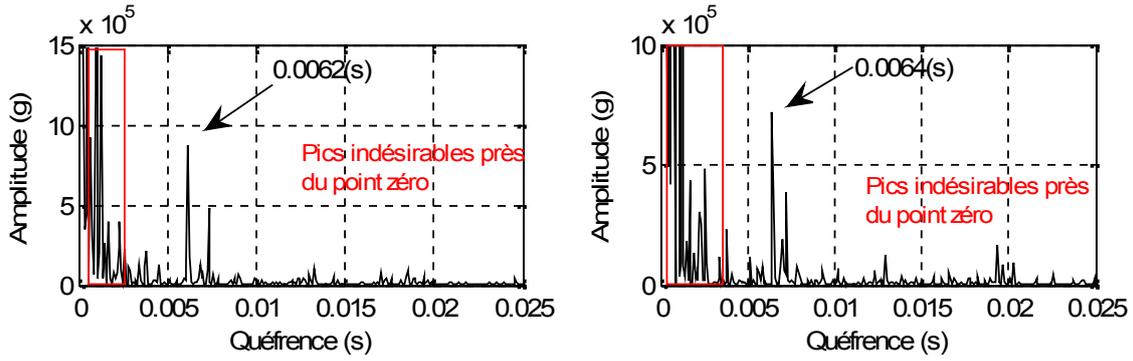


Figure IV-13 : Cepstre de puissance d'un défaut de bague intérieure

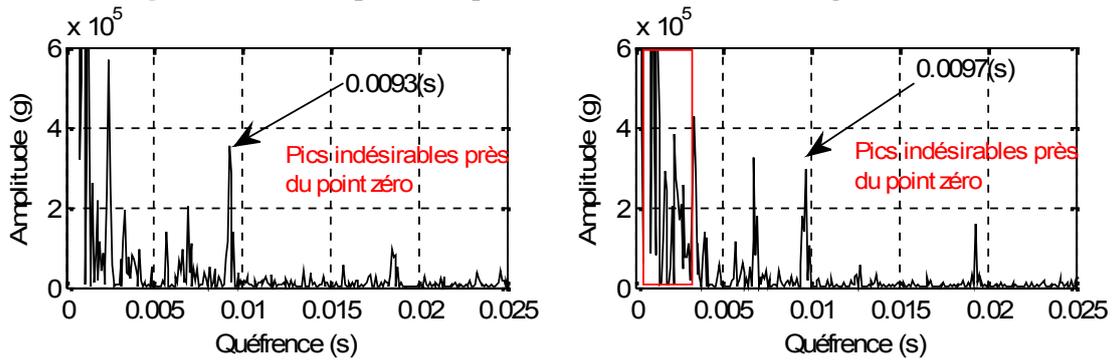


Figure IV-14 : Cepstre de puissance d'un défaut de bague extérieure

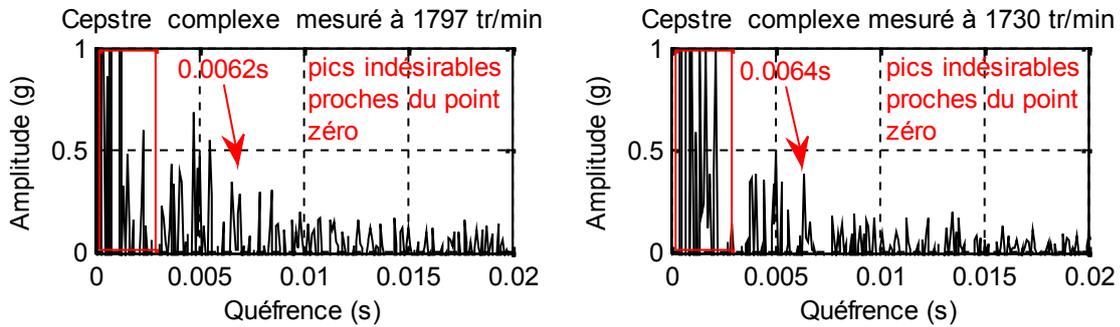


Figure IV-15 : Cepstre complexe d'un défaut de bague intérieure

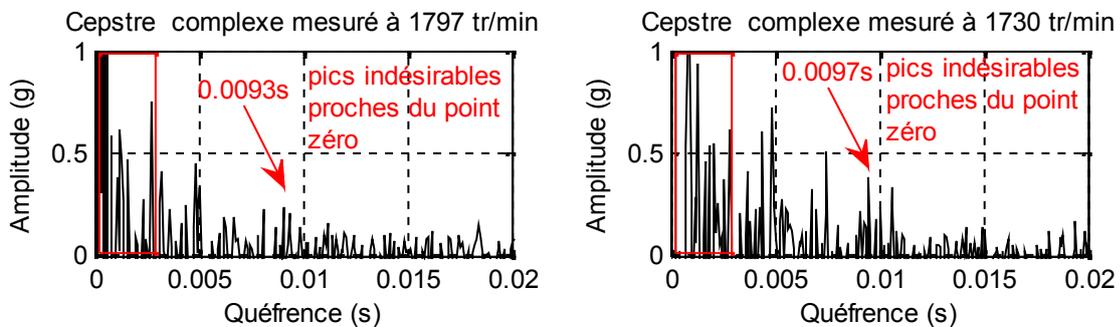


Figure IV-16 : Cepstre complexe de défaut d'un bague extérieure

Le cepstre peut être utilisé pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulement. Cependant, elle présente certains inconvénients le cepstre génère de nombreux grands pics indésirables proches du point zéro, ce qui rend la sortie difficile à interpréter. Aussi, la fréquence fondamentale de cette technique se trouve à droite de la courbe, qui est opposée à la méthode standard de trouver la fréquence fondamentale.

IV.3.5 Transformée en ondelettes

La Transformée en ondelettes est une excellente méthode pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements. Malheureusement, il y a trois problèmes de l'analyse d'ondelettes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts. Pour plus de détails, voir chapitre III.

IV.3.6 Nouvelle technique

Afin de remédier à la limitation de la transformée en ondelettes, nous avons proposé dans notre travail une nouvelle technique de diagnostic des défauts des machines tournantes combinant la Transformée de Hilbert (TH) et la Transformée de Fourier rapide (FFT).

La première étape est l'extraction de l'enveloppe du signal de vibration $x(t)$ à l'aide de la Transformée de Hilbert (TH). L'étape suivante consiste à calculer la grandeur $C1 = FFT(T)$. Par la suite nous calculons la grandeur $A = \log(\text{abs}(FFT(C1)))$, et la dernière étape est concerne l'extraction du spectre de fréquence du signal (A) en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT).

Organigramme de la méthode proposée est représenté dans la figure IV-17.

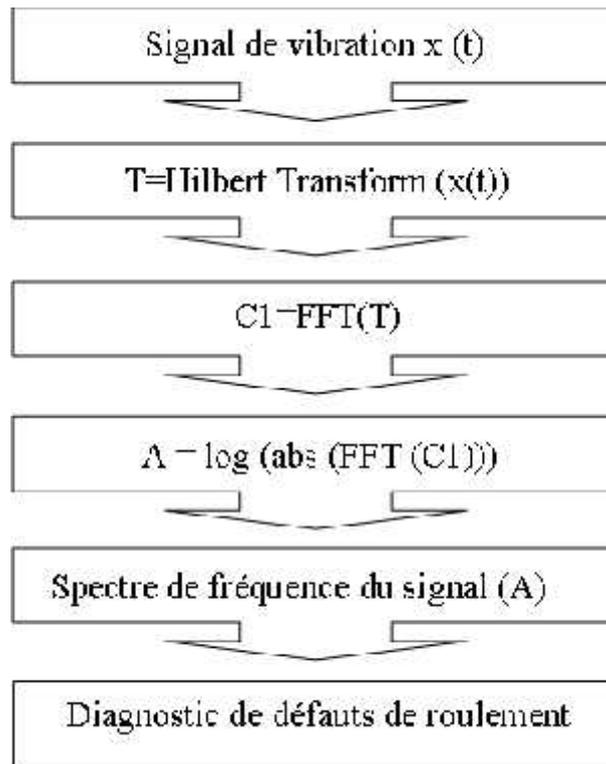


Figure IV-17 : Organigramme de la nouvelle technique

Les spectres de défauts de roulement obtenus par la nouvelle technique sont présentés dans les figures IV-18 et IV-19.

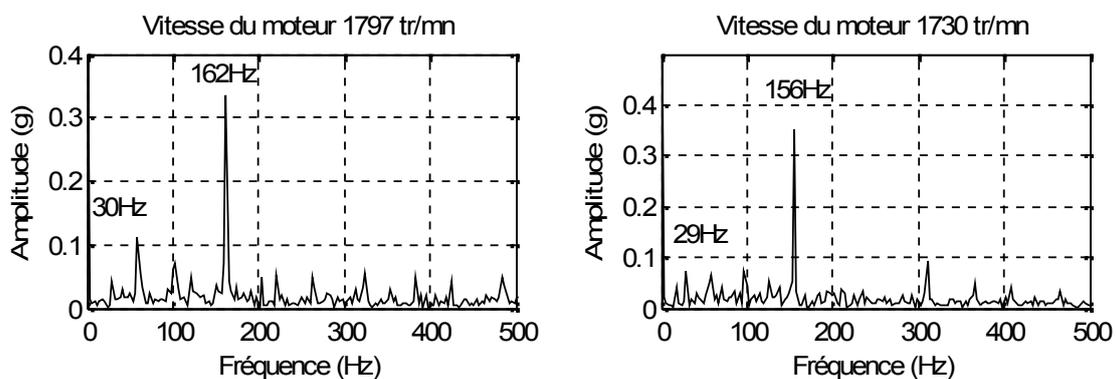


Figure IV-18 : Spectres de défaut de bague intérieure obtenus par la nouvelle méthode

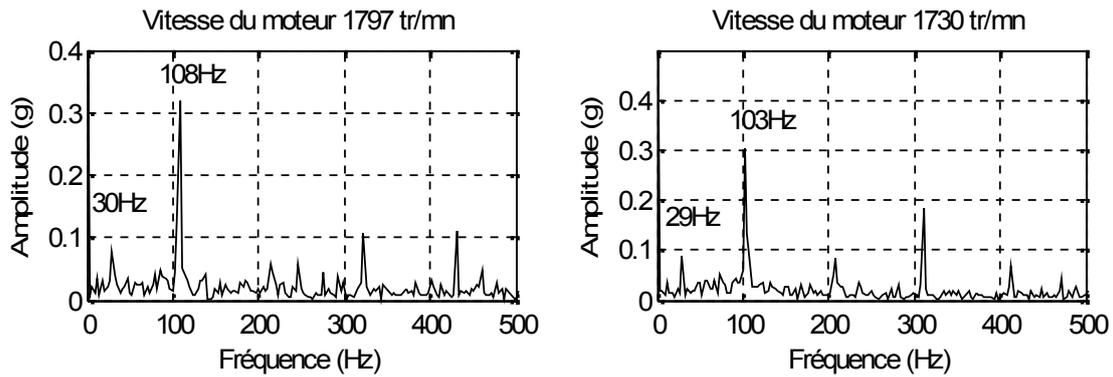


Figure IV-19 : Spectres de défaut de bague extérieure obtenus par la nouvelle méthode

On peut voir clairement à partir de la figure IV-18 les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz et de ses multiples. En plus, des pics à la fréquence de rotation du moteur (29 et 30Hz).

On peut voir clairement à partir de la figure IV-19 les pics de fréquence à 108 Hz et 103 Hz et de ses multiples. En plus, des pics à la fréquence de rotation du moteur (29 et 30Hz).

Il est clairement montré que les pics de fréquence à 162 Hz et 156 Hz sont très proches des fréquences calculées de défaut de la bague intérieure à 162,2 Hz et 156.13Hz énumérées dans le tableau IV-1. Cela indique clairement un défaut de bague intérieure.

De même, il est montré que les pics de fréquence à 108 Hz et 103Hz sont très proches de fréquences calculées de défaut de la bague extérieure à 107.37 Hz et 103,37 Hz énumérées dans le tableau IV-1. Cela indique clairement un défaut de la bague extérieure.

L'identification et la surveillance des défauts de roulements à l'aide de la nouvelle technique sont très faciles. En outre, la nouvelle technique ne nécessite pas le choix de l'ondelette mère approprié ni le choix du niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires à un diagnostic des défauts, et cela comparativement à la Transformée en ondelettes

IV.4 Comparaison entre les différentes méthodes exposées

Les résultats de l'étude comparative des différentes méthodes d'analyse des vibrations pouvant être utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts de roulement est présentée dans le tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Résultats de l'Etude comparative des différentes méthodes de détection des défauts de roulements

Les techniques	Avantages	Inconvénients
L'analyse temporelle	Peut détecter le défaut	Son incapacité à déterminer la composante de roulements qui est défectueux
L'analyse spectrale	Peut détecter le défaut	Son incapacité à déterminer la composante de roulements qui est défectueux
L'analyse cepstrale	Peut détecter le défaut et sa nature	Elle génère beaucoup de grands pics indésirables près du point zéro, ce qui rend la sortie difficile à interpréter
L'Analyse d'Enveloppe	Peut détecter le défaut et sa nature	Elle nécessite la connaissance de la fréquence de résonance et la bande de filtrage à l'avance, ce qui nécessite une certaine expérience.
Transformée en ondelettes	Peut détecter le défaut et sa nature	Il y a trois problèmes de l'analyse d'ondelettes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts.
Nouvelle technique	-Peut détecter le défaut et sa nature. -Ne nécessite pas: 1-Le choix de l'ondelette mère, le choix du niveau de décomposition et de sa bande de fréquence ; 2-La connaissance de la fréquence de résonance et la bande de filtrage.	

IV.5 Conclusion

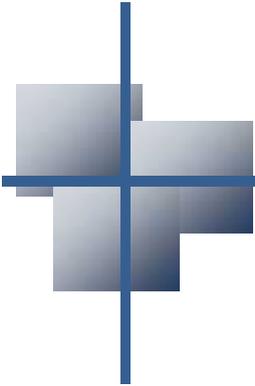
Dans ce chapitre, nous avons établi une étude comparative de différentes méthodes de détection des défauts de roulements. Ainsi que, nous avons exposé la nouvelle technique développée pour surmonter leurs limitations et autres insuffisances. La nouvelle technique ne nécessite pas les présélections de l'ondelette mère convenable et le niveau approprié de décomposition qui contient les informations nécessaires pour les défauts diagnostic par rapport à la transformée en ondelettes. De plus, la nouvelle technique ne génère pas beaucoup de grands pics indésirables près du point zéro, ce aurait compliqué l'interprétation de la sortie comme c'est le cas à l'analyse cepstrale. D'autre part, la nouvelle technique ne nécessite pas la connaissance de la fréquence de résonance et la bande de filtrage à l'avance tel que c'est le cas dans l'analyse d'enveloppe.

Comme autres avantage, la nouvelle technique, nous retenons sa rapidité, sa précision, sa robustesse et sa facilité à être mise en œuvre.

IV.6 Bibliographie

- [1] C. Xavier, “ Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes” Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne, 2007.
- [2] J. Chebil, M. Hrairi, N. Abushikhah, “Signal Analysis of Vibration Measurements for Condition Monitoring of Bearings”, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5(1), pp. 70-78, 2011.
- [3] N. Tandon and A. Choudhury, “A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings”, Tribology International, vol. 23, pp. 469-480, 1999.
- [4] V. Saxena, N. Chowdhury, S. Devendiran, “Assessment of Gearbox Fault Detection Using Vibration Signal Analysis and Acoustic Emission Technique”. Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 7, pp.52 – 60, 2013.
- [5] A. Aherwar, M. Saifullah Khalid, “Vibration analysis techniques for gearbox Diagnostic: a review”. International Journal of Advanced Engineering Technology, Vol. 13, pp.04–12, 2012.

- [6] T. Karacay, N Akturk, “Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods”.Tribology International, Vol.42,pp.836–843,2009.
- [7] A. Djebala, N. Ouelaa, C. Benchaabane, D.F. Laefer, “Application of the Wavelet Multi-resolution Analysis and Hilbert transform for the prediction of gear tooth defects,” Journal of Meccanica, Vol.47, pp. 1601–1612, 2012.
- [8] M. Feldman, “Hilbert transform in vibration analysis,” Mechanical Systems and Signal Processing , Vol.25, pp. 735–802, 2011.
- [9] R.B. Randall and J. Antoni, “Rolling element bearing diagnostics,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.25, pp. 485–520, 2011.
- [10] J. Slavic, A. Brkovic, and M.R. Bolteza, “Typical Bearing-Fault Rating Using Force Measurements-Application to Real Data,” Journal of Vibration and Control, Vol.17, pp. 2164-2174, 2012.
- [11] M. Pan, W. Tsao, “Using appropriate IMFs for envelope analysis in multiple fault diagnosis of ball bearings,” International Journal of Mechanical Sciences, Vol.69, pp. 114–124, 2013.
- [12] B. Liang , S.D. Iwnicki, Y. Zhao, “Application of power spectrum, cepstrum, higher order spectrum and neural network analyses for induction motor fault diagnosis,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 39, pp. 342–360, 2013.
- [13] M. El Morsy, G. Achtenová, “ Vehicle Gearbox Fault Diagnosis Based On Cepstrum Analysis,” International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol. 6, pp. 1568-1574, 2014.
- [14] J. Ma, J. Wu, X. Wang, Y. Fan, T. Leng, “ A Fault Detection Method of Rolling Bearing Based on Wavelet Packet-cepstrum,” Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 5, pp. 3402-3406, 2013.
- [15] A. Boudiaf, A.k. Moussaoui, A. Dahane, I. Atoui, “A Comparative Study of Various Methods of Bearing Faults Diagnosis Using the Case Western Reserve University Data”. Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol.16, pp. 271-284, 2016.



Conclusion générale

Conclusion générale

En importants éléments mécaniques et au cœur même des machines tournantes, les roulements, sont employés pour guider et soutenir les arbres présents dans ces machines. Par conséquent, tout défaut dans ces éléments peut occasionner des pertes au niveau de la production et des équipements.

Ainsi, pour surveiller et diagnostiquer les éventuels défauts des roulements dans les machines tournantes, plusieurs techniques avec des différents niveaux d'efficacité sont utilisées, à l'image de La transformée en ondelettes TO qui est l'une des techniques les plus importante en traitement du signal, et qui s'est avérée un outil puissant pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements. Néanmoins, elle nécessite la présélection de l'ondelette mère convenable et le niveau approprié de décomposition qui contient les informations nécessaires pour la détection et le diagnostic.

Afin de s'affranchir de ce type de contrainte, un objectif global était visé. Celui de développer une nouvelle approche de diagnostic de défauts des machines tournantes, qui soit la plus appropriée et qui présenterait les meilleurs avantages.

Pour atteindre cet objectif, notre démarche était basée sur des études théoriques, sur l'expérimentation et sur l'évaluation de l'adaptabilité et l'efficacité des méthodes de surveillance et de diagnostic des défauts de roulements.

Ainsi, nous avons donné au premier chapitre, un bref aperçu sur la maintenance industrielle et sur les techniques les plus utilisées dans la surveillance industrielle et de ses applications dans le domaine ciblé.

Le deuxième chapitre, a été consacré à l'étude théorique sur la surveillance vibratoire des machines tournantes et à l'analyse des différents défauts. On retient, deux grandes catégories d'outils de surveillance vibratoire :

- Des outils propres à la surveillance (valeur efficace de l'accélération ou RMS, facteur de crête, Kurtosis) qui permettent, lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alerte, de détecter la présence d'une anomalie.
- D'autres outils propres au diagnostic (l'analyse fréquentielle, l'analyse de l'enveloppe, L'analyse cepstrale, la transformée en ondelettes (TO)) permettant d'identifier la signature vibratoire de chaque défaut.

Présenté au troisième chapitre, le travail expérimental mené a porté sur l'application des trois techniques de la transformée en ondelettes (la Transformée en Ondelettes Continue (TOC), l'Analyse Multi-résolution en ondelettes (AMRA), l'Analyse Par Paquets d'Ondelettes (APO)) : qui ont montré certaines insuffisances ou contraintes. Et pour surmonter les limitations de ces méthodes une contribution y a été apportée, combinant -la transformée de Hilbert (TH) et le Théorème de Parseval. Le résultat expérimental a montré que la méthode proposée, malgré pénalisante en terme de temps, peut efficacement choisir le niveau de décomposition approprié et sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts ce qui n'est pas possible avec la méthode traditionnelle d'ondelettes.

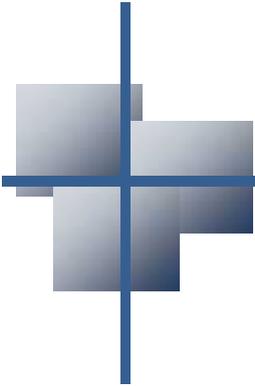
L'étude comparative des différentes méthodes de détection de défauts de roulements, présentée au quatrième chapitre dont le but était d'examiner les différentes techniques d'analyse de vibrations et d'évaluer leurs capacités a permis de mettre en évidence leurs avantages et inconvénients. Et pour surmonter ces limitations et autres insuffisances, une nouvelle approche a été introduite et a donné des résultats plus probants.

L'étude a révélé que :

- L'analyse temporelle permet le suivi de tout changement anormal dans les conditions de travail de la machine tournante, sans pour autant pouvoir identifier le composant défectueux. Cette méthode ne représenterait qu'une stratégie de sécurité.
- FFT permet la détection de tout changement anormal dans les conditions de travail de la machine, mais son inconvénient est habituellement, dans des cas industriels complexes, son incapacité à identifier l'emplacement des dommages. Ensuite, la FFT ne convient pas pour l'analyse de signaux non-stationnaires.
- L'analyse cepstrale peut être utilisée pour identifier et diagnostiquer les défauts de roulement. Cependant, les limites de cette technique concernent le nombre important de grands pics indésirables près du point zéro, d'où la difficulté à en tirer l'information pertinente. En outre, la fréquence fondamentale dans cette technique est située à la droite de la courbe, à l'opposé de l'analyse classique.
- L'Analyse d' Enveloppe peut être utilisée pour identifier et diagnostiquer les défauts de roulement. Néanmoins, cette technique nécessite la connaissance de la fréquence de résonance et la bande de filtrage à l'avance, ce qui nécessite une certaine expérience.

- La Transformée en ondelettes qui peut être utilisée pour identifier et diagnostiquer les défauts de roulements présente malheureusement trois problèmes qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts. Afin de remédier aux limitations de la technique d'analyse Multi-résolution en ondelettes, nous avons tenté une amélioration en proposant la combinaison de la transformée de Hilbert (TH) et Théorème de Parseval. Le résultat expérimental a montré que la méthode proposée peut efficacement choisir le niveau de décomposition approprié et sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts ce qui n'est pas possible avec la méthode traditionnelle d'ondelettes. Néanmoins ce procédé nécessite beaucoup de temps de calcul pour sa mise en œuvre.
- Pour résoudre ces problèmes, nous avons développé une nouvelle méthode qui ne nécessite pas les présélections devant être convenables de l'ondelette mère ni du niveau approprié de décomposition qui contient les informations nécessaires. De plus, et contrairement à l'analyse cepstrale, la méthode proposée ne génère pas beaucoup de grands pics indésirables près du point zéro, ce qui aurait rendu la sortie difficile à interpréter. D'autre part, la méthode proposée n'exige pas de connaissance de la fréquence de résonance et de la bande de filtrage à l'avance tel que c'est le cas dans l'analyse d'enveloppe. Finalement, la méthode proposée présente l'avantage d'être rapide, précise, robuste et d'implémentation facile.

Pour conclure, la nouvelle approche développée a donné des résultats intéressants au vu de l'objectif initial. Traitant des défauts des roulements dans les machines tournantes, cette approche présente également une opportunité de développements futurs. Elle mérite d'être testée sur d'autres types de défauts voire leur combinaison. Comme autres perspectives, les adaptations nécessaires ainsi que son optimisation permettraient d'envisager une implémentation de la méthode qui tiendrait compte des aspects temps réel



Annexe

Les caractéristiques des roulements DATA BEARING CENTER

Le tableau 1 représente les diamètres des défauts, leurs profondeurs.

*Les données non disponibles

Diamètre du défaut	La charge du moteur	Vitesse de rotation	Bague intérieur	Elément roulant	Bague extérieur		
					Position relative de la zone de charge (la zone de charge est centrée à		
					Centrée 6:00	Orthogonal 3:00	Opposé 12:00
0.007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0.014"	0	1797	IR014_0	B014_0	OR014@6_0	*	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	OR014@6_1	*	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	OR014@6_2	*	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	OR014@6_3	*	*
0.021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	OR021@3_0	OR021@12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021@6_1	OR021@3_1	OR021@12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021@6_2	OR021@3_2	OR021@12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021@6_3	OR021@3_3	OR021@12_3
0.028"	0	1797	IR028_0	B028_0	OR028@6_0	*	*
	1	1772	IR028_1	B028_1	OR028@6_1	*	*
	2	1750	IR028_2	B028_2	OR028@6_2	*	*
	3	1730	IR028_3	B028_3	OR028@6_3	*	*

Tableau 1. Les défauts unique du coté accouplement (12kHz).

Diamètre du défaut	La charge du moteur	Vitesse de rotation	Bague intérieur	Elément roulant	Bague extérieur		
					Position relative de la zone de charge (la zone de charge est centrée à		
					Centrée 6:00	Orthogonal 3:00	Opposé 12:00
0.007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0.014"	0	1797	IR014_0	B014_0	OR014@6_0	*	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	OR014@6_1	*	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	OR014@6_2	*	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	OR014@6_3	*	*
0.021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	OR021@3_0	OR021@12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021@6_1	OR021@3_1	OR021@12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021@6_2	OR021@3_2	OR021@12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021@6_3	OR021@3_3	OR021@12_3

Tableau 2. Les défauts unique de coté accouplement (48kHz)

Le tableau 3 représente les diamètres des défauts, leurs profondeurs et les marques de roulement utilisés.

Annexe

Position du roulement	Emplacement du défaut	Diamètre [inches]	Profondeur [inches]	Marque du roulement
Coté entraînement	Bague Intérieur	0.007"	0.011	SKF
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		
	Bague extérieur	0.007"	0.011	SKF
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		
	Bille	0.007"	0.011	SKF
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		
Coté ventilateur	Bague Intérieur	0.007"	0.011	SKF
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		
	Bague extérieur	0.007"		
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		
	Bille	0.007"		
		0.014"		
		0.021"		
		0.028"		

Tableau 3. Caractéristiques des défauts des roulements.

Des roulements SKF ont été utilisés pour les défauts de diamètres 0.007", 0.014" et 0.021", et des roulements équivalents NTN ont été utilisés pour les défauts de diamètre 0.028" et 0.040". Sachant que 1"=25.4mm.

Caractéristique du roulement coté entraînement:6205-2RS JEM SKF, roulement à Billes de cannelure profonde.
Taille: (inches)

Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de Bille	Diamètre primitif
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

Tableau 4. Caractéristique du roulement coté entraînement

Caractéristique du roulement coté ventilateur:6205-2RS JEM SKF, roulement à Billes de cannelure profonde.

Taille: (inches)

Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de Bille	Diamètre primitif
0.6693	1.5748	0.4724	0.2656	1.122

Tableau 5. Caractéristique du roulement coté ventilateur

Les fréquences caractéristiques des défauts du roulement coté entraînement

La bague intérieure

Le couple (HP)	Vitesse de rotation (tr /min)	Fréquence caractéristique (Hz)
0	1797	161.69
1	1772	159.90
2	1750	157.90
3	1730	156.11

Tableau 6. Fréquences caractéristiques d'un défaut de bague intérieure

La bague extérieure

Le couple (HP)	Vitesse de rotation (tr /min)	Fréquence caractéristique (Hz)
0	1797	107.01
1	1772	105.83
2	1750	104.51
3	1730	103.33

Tableau 7. Fréquences caractéristiques d'un défaut de bague extérieure

Les billes

Le couple (HP)	Vitesse de rotation (tr /min)	Fréquence caractéristique (Hz)
0	1797	140.74
1	1772	139.189
2	1750	137.44
3	1730	135.89

Tableau 8. Fréquences caractéristiques d'un défaut de bille

La cage

Le couple (HP)	Vitesse de rotation (tr /min)	Fréquence caractéristique (Hz)
0	1797	11.89
1	1772	11.75
2	1750	11.61
3	1730	11.48

Tableau 9. Fréquences caractéristiques d'un défaut de cage