

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : Hamoudi Heythem et Salah Salah Haithem

Thème

Application de la méthode EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) pour la détection des défauts de roulements

Soutenu publiquement le 04/10/2020 devant le jury composé de :

M. Cherif OULD LAHOUCINE	Professeur	Université de Guelma	Président
M. DJEBALA Abderrazek	Professeur	Université de Guelma	Encadreur
M. FRIHI Djamel	MCA	Université de Guelma	Examineur
Mme. FRIOUI Nadia	MCB	Université de Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous tenons à remercier avant tout ALLAH qui nous a donné de la patience, du courage et de la force pour réaliser ce modeste travail.

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance et notre parfaite gratitude à notre encadreur MR
PR, Djebala abderrazek*

Qui nous a témoigné de sa confiance et son aide scientifique grâce à son expérience et sa compétence.

*Nous tenons à remercier particulièrement tous les membres du Département d'électrotechnique et automatique et du département de Génie mécanique
Pour leur soutien et leur aide.*

Nos plus vifs remerciements sont adressés également aux membres du jury pour la lecture et l'examen de ce travail.

Nous adressons de chaleureux remerciements à tous les enseignants et les travailleurs de l'université du 8 mai 1945 'Guelma'

Merci à vous tous

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont le soleil de ma vie et
la lune de mes nuits mes plus chers parents*

A mes frères

A ma sœur

A mes grands parents

A toute la famille

*Et à tous ce qui m'ont encouragé
Pour l'accomplissement de ce travail.*

Hamoudi Heythem

*Avant tout, je remercie mon dieu qui m'a donné la force et la
patience pour que je puisse accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mon profond amour et mon immense
gratitude aux êtres les plus chères : Mes chers parents et mes
frères que ce travail puisse être un témoignage de respect et
attachement aux valeurs que vous nous avez inculqués.*

Salah Salah Haithem

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la maintenance conditionnelle des machines tournantes par analyse vibratoire. Il porte sur l'application de deux méthodes avancées de traitement de signal ; l'Empirical Mode Decomposition (EMD) et l'Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), pour la détection des défauts de roulements.

Les deux méthodes sont alors appliquées sur plusieurs signaux réels obtenus à partir de la base de données Américaine « *Bearing data center* ». L'objectif étant, d'une part, de vérifier l'aptitude des deux méthodes à détecter différents types de défauts, et d'autre part comparer les deux méthodes dans le domaine temporel et fréquentiel. Plusieurs paramètres ont été considérés offrant plusieurs configurations pour l'étude menée. Trois types de défaut (sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille), quatre charges du roulement, quatre gravités du défaut, deux fréquences d'échantillonnage et trois positions différentes pour le défaut sur la bague extérieure sont les principaux paramètres variés.

Mots-clés : Décomposition en Mode Empirique (EMD), Ensemble de Décomposition en Mode Empirique, Intrinsic Mode Function (IMF), Kurtosis, Analyse vibratoire, Domaine temporel, Domaine fréquentiel.

Abstract

The work presented in this thesis is part of the conditional maintenance of rotating machines by vibration analysis. It deals with the application of two advanced signal processing methods; the Empirical Mode Decomposition (EMD) and the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), for the detection of rolling bearing defects.

Both methods are applied on several real vibratory signals obtained from the American data base "*Bearing data center*". The objective is, on one hand, to verify the ability of the two methods to detect different types of defects, and on the other hand to compare them in time and frequency domain. Several parameters were considered offering several configurations for the conducted study. Three types of defects (outer race, inner race, and ball), four bearing loads, four defect gravities, two sampling frequencies, and three different positions for the defect on the outer race, are the main parameters.

Keywords: Empirical mode decomposition (EMD), Ensemble empirical mode decomposition (EEMD), Intrinsic mode function (IMF), kurtosis, vibration analysis, time domain, frequency domain.

ملخص

العمل المقدم في هذه الأطروحة هو جزء من الصيانة الشرطية للآلات الدوارة عن طريق تحليل الاهتزازات. ويرتكز على تطبيق طريقتين متقدمتين لمعالجة الإشارات للكشف عن عيوب المدحرجات وهما EMD و EEMD.

تم تطبيق الطريقتين على عدة إشارات حقيقية تم الحصول عليها من قاعدة البيانات الأمريكية Bearing Data Center. الهدف من هذا العمل من ناحية، التحقق من قدرة الطريقتين على اكتشاف أنواع مختلفة من العيوب ، ومن ناحية أخرى مقارنة الطريقتين في مجال الوقت والتردد. تم النظر في العديد من الإعدادات لتقديم العديد من التكوينات للدراسة المنفذة. ثلاثة أنواع من العيوب (على الحلقة الخارجية ، الحلقة الداخلية وعلى الكرة) ، أربعة أحمال مختلفة ، أربعة شدات من العيوب ، ترددان لأخذ العينات وثلاثة أوضاع مختلفة لمكان العيوب على الحلقة الخارجية هي الإعدادات الرئيسية المتغيرة.

الكلمات المفتاحية : EMD, EEMD, IMF, تحليل الاهتزازات, مجال الوقت والتردد

Liste des figures et tableaux

Figure 1.1. Objectifs de maintenance.....	15
Figure 1.2. Les différents types de maintenance.....	16
Figure 1.3. Différentes composantes d'un roulement.....	18
Figure 1.4. Principaux aspects de la détérioration des roulements. Photos NSK.....	24
Figure 1.5. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure.....	24
Figure 1.6. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	25
Figure 1.7. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	25
Figure 1.8. Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague.....	26
Figure 1.9. Image thermique de roulement.....	28
Figure 1.10. Schéma de la chaîne d'émission acoustique, de la création de l'onde mécanique à la visualisation du signal EA.....	29
Figure 2.1. Principe de L'EMD : Oscillation rapide (a) oscillation lente (tendance) (b).....	43
Figure 2.2. L'organigramme de la méthode EMD.....	45
Figure 2.3. Décomposition du signal somme par EMD.....	46
Figure 2.4. Signal original à décomposer.....	47
Figure 2.5. Résultats obtenus par application de l'EMD.....	47
Figure 2.6. L'organigramme de la méthode EEMD.....	49
Figure 2.7. Résultats obtenus par application de l'EEMD.....	50
Figure 2.8. Le temps de calcul en fonction de Ne pour la décomposition EEMD.....	52
Figure 3.1. Banc d'essais de roulements Bearing Data Center.....	55
Figure 3.2. Coupe d'un moteur.....	56
Figure 3.3. Signaux mesurés dans le cas sans défaut pour trois charges différentes (0 Hp, 1 Hp et 2 Hp de haut en bas).....	58
Figure 3.4. Signaux d'un défaut sur la bague intérieure pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) de haut en bas.....	58
Figure 3.5. Signaux d'un défaut sur la bague extérieure pour deux gravités différentes (0.007 inch, 0.021 inch) de haut en bas.....	59
Figure 3.6. Signaux d'un défaut sur la bille pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) de haut en bas.....	60
Figure 3.7. Organigramme de l'approche utilisée.....	61
Figure 3.8. Signal mesuré dans le cas d'un petit défaut sur la bague extérieure (0.007 inch, 0 Hp).....	62

Figure 3.9. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD	62
Figure 3.10. Kurtosis des quatre IMFs	62
Figure 3.11. IMF optimale (IMF2, kurtosis=6.94)	63
Figure 3.12. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD	63
Figure 3.13. Kurtosis des quatre IMFs	64
Figure 3.14. IMF optimale (IMF2, kurtosis=8.7)	64
Figure 3.15. Signal mesuré dans le cas d'un petit défaut sur la bague intérieure (0.007 inch, 0 Hp)	65
Figure 3.16. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD	65
Figure 3.17. Kurtosis des quatre IMFs	65
Figure 3.18. IMF optimale (IMF2, kurtosis=21.01)	66
Figure 3.19. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD	66
Figure 3.20. Kurtosis des quatre IMFs	66
Figure 3.21. IMF optimale (IMF1, kurtosis=20.97)	67
Figure 3.22. Signal mesuré dans le cas d'un défaut moyen sur la bille (0.014 inch, 3 Hp)	67
Figure 3.23. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD	68
Figure 3.24. Kurtosis des quatre IMFs	68
Figure 3.25. IMF optimale (IMF1, kurtosis=12.17)	68
Figure 3.26. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD	69
Figure 3.27. Kurtosis des quatre IMFs	69
Figure 3.28. IMF optimale (IMF1, kurtosis=13.05)	69
Figure 3.29. Influence de la charge pour un défaut sur la bague intérieure	70
Figure 3.30. Influence de la charge pour un défaut sur la bague extérieure	70
Figure 3.31. Influence de la charge pour un défaut sur la bille	71
Figure 3.32. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure	71
Figure 3.33. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bague extérieure	72
Figure 3.34. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bille	72
Figure 4.1. (a) : Signal mesuré, (b) : Son spectre	75
Figure 4.2. (a) : IMF 1 obtenue par l'EMD (K=4.88), (b) : Son spectre d'enveloppe	76
Figure 4.3. (a) : IMF 1 obtenue par l'EEMD (K=5.05), (b) : Son spectre d'enveloppe	77
Figure 4.4. (a) : Signal mesuré, (b) : Son spectre	78
Figure 4.5. (a) : IMF 1 obtenue par l'EMD (K=4.66), (b) : Son spectre d'enveloppe	79
Figure 4.6. (a) : IMF 1 obtenue par l'EEMD (K=5.03), (b) : Son spectre d'enveloppe	79
Tableau 3.1. Fréquences caractéristiques des défauts de roulements pour différents couples résistants	57

Table des matières

Résumé	3
Liste des figures et tableaux.....	6
Introduction générale	11
CHAPITRE I : CONCEPTS FONDAMENTAUX ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	13
1. Introduction	14
2. Concepts fondamentaux de la maintenance.....	14
2.1. Définition.....	14
2.2. Les objectifs de la maintenance.....	14
2.3. Types de maintenance	16
3. Analyse vibratoire	16
3.1. Définition.....	16
3.2. Objectifs de l'analyse vibratoire	17
3.3. Technologies de l'analyse vibratoire.....	17
3.3.1. Par mesure directe du déplacement des parties tournantes	17
3.3.2. Par mesure de l'accélération subie par les parties fixes de la machine	17
4. Les roulements et leurs défauts	18
4.1. Géométrie et constitution d'un roulement	18
4.2. Défauts des roulements	18
4.3. Signatures vibratoires des principaux défauts.....	24
4.3.1. Défaut de type écaillage affectant la bague externe.....	24
4.3.2. Défaut de type écaillage affectant la bague interne	24
4.3.3. Défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	25
4.3.4. Défauts de type déversement de bague.....	25
4.4. Fréquences caractéristiques des roulements à billes	26
4.5. Modes de surveillance des roulements.....	27
4.5.1. Bruit.....	27
4.5.2. Contrôle du jeu à l'arrêt	27
4.5.3. Echauffement	27
4.5.4. Absence de fuite	28
5. Techniques utilisées dans la détection des défauts de roulements	28
5.1. L'analyse par thermographie infrarouge.....	28

5.2. L'analyse par l'Emission Acoustique	29
5.3. L'analyse de lubrifiant	29
5.4. L'analyse vibratoire	30
5.4.1. Méthodes temporelles (Les indicateurs scalaires)	30
5.4.2. Méthodes fréquentielles	32
5.4.3. Méthodes temps-fréquences	33
6. Synthèse bibliographique sur l'utilisation de l'EMD et de l'EEMD pour la détection des défauts de machines tournantes	35
7. Conclusion du chapitre	39
CHAPITRE II : FONDEMENTS MATHÉMATIQUES DE L'EMD ET DE L'EEMD	40
1. Introduction	41
2. Décomposition en Mode Empirique EMD	41
3. Quelques définitions	41
3.1. L'enveloppe moyenne.....	41
3.2. IMF (pour Intrinsic Mode Function).....	41
3.3. Sifting Process (SP).....	42
3.4. Une intermittence	42
3.5. Mode mixing	42
4. Principe de l'EMD.....	42
5. La procédure de tamisage (Sifting process)	43
5.1. Algorithme de L'EMD	43
6. Exemple d'application de l'EMD.....	46
7. Le Mode « Mixing ».....	46
7.1. Exemple :	47
8. Ensemble Décomposition en Mode Empirique (EEMD)	48
9. Principe	48
10. L'algorithme de L'EEMD	49
11. Exemple d'application de l'EEMD	50
12. Comparaison entre L'EMD et L'EEMD.....	50
12.1. Les inconvénients de L'EMD	50
12.2 Inconvénients de la méthode EEMD.....	51
13. Conclusion du chapitre	53

CHAPITRE III : APPLICATION DE L'EMD ET L'EEMD POUR LA DETECTION DES DEFAUTS DE ROULEMENTS : ETUDE COMPARATIVE DANS LE DOMAINE TEMPOREL.54

1. Introduction	55
2. Présentation de la base des données Américaine (Bearing Data Center)	55
2.1. Présentation du banc d'essais	55
3. Etude des signaux de la base des données	58
3.1. Cas sans défaut	58
3.2. Cas d'un défaut sur bague intérieure	58
3.3. Cas d'un défaut sur la bague extérieure.....	59
3.4. Cas d'un défaut sur la bille.....	60
4. Approche proposée.....	60
4.1. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure ...	61
4.2. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure....	64
4.3. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bille	67
5. Comparaison entre l'EMD et l'EEMD	70
5.1. Comparaison en fonction de la charge du roulement	70
5.2. Comparaison en fonction la taille de défaut.....	71
6. Conclusion du chapitre	73

CHAPITRE IV :APPLICATION DE L'EMD ET L'EEMD POUR LA DETECTION DES DEFAUTS DE ROULEMENTS : ETUDE COMPARATIVE DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL74

1. Introduction	75
2. Application de l'EMD et de l'EEMD dans le domaine fréquentiel.....	75
2.1. Cas d'un défaut sur la bague extérieure.....	75
2.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieure.....	77
3. Conclusion du chapitre	80

Conclusion générale.....82

Annexes83

Introduction générale

Introduction générale

Les moyens de production sont en développement permanent et de nouvelles méthodes et techniques s'y sont introduites. La nécessité de maintenir une cadence de production constante tout en assurant la qualité du produit a fait en sorte que les outils de production doivent être maintenus efficacement. Une défaillance catastrophique inattendue peut provoquer des pertes de production et des coûts de maintenance élevés. Les machines tournantes occupent actuellement une place majeure dans les applications impliquant un système de transmission de puissance. La mesure des vibrations sur ces machines est particulièrement importante car elle joue un rôle capital dans les programmes de maintenance. Les roulements sont des éléments primordiaux sur la majorité des machines tournantes, les plus sollicités et les plus sensibles. Suite à des sollicitations répétées, les roulements sont toujours l'un des points faibles de la machine. Le diagnostic des défaillances des roulements a fait l'objet de plusieurs études de recherche. La plupart des études concernant le diagnostic de défauts de roulements utilisaient l'analyse des signaux vibratoires car ils contiennent des informations précieuses sur l'état du roulement. L'analyse vibratoire est donc la technique la plus couramment utilisée pour collecter les données nécessaires à la détection des défauts de roulement pour faire une estimation sur la durée de vie restante des machines tournantes.

Ce mémoire vise à appliquer des méthodes avancées de traitement de signal pour effectuer un diagnostic, détecter et caractériser les défauts susceptibles d'affecter les différents éléments de roulements. Deux méthodes seront utilisées, l'Empirical Mode Decomposition (EMD) et l'Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). L'objectif du mémoire porte sur deux volets : le premier est de vérifier l'aptitude de ces deux méthodes pour la détection de différents types de défauts de roulements dans différentes configurations. Le deuxième est d'entreprendre une comparaison entre ces deux méthodes dans les deux domaines temporel et fréquentiel.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres ; le premier étant essentiellement consacré à un rappel sur la maintenance, l'analyse vibratoire et les différents outils de détection des défauts de roulements. Le deuxième chapitre portera sur la présentation des fondements mathématiques sur les méthodes utilisées, la décomposition en mode empirique (EMD), ainsi que l'Ensemble EMD. Quant au troisième chapitre, il comprend l'application des méthodes EMD et EEMD sur des signaux réels de roulements défectueux, ainsi qu'une étude comparative

Introduction générale

entre elles dans le domaine temporel. Enfin, le quatrième et dernier chapitre sera consacré à l'application et la comparaison entre les deux méthodes dans le domaine fréquentiel.

CHAPITRE I :
CONCEPTS FONDAMENTAUX ET
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des concepts fondamentaux sur la maintenance industrielle, notamment la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire. A ce propos, des notions fondamentales sur les techniques les plus utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires sont présentées. Une attention particulière est bien évidemment réservée aux roulements, objet de notre travail.

2. Concepts fondamentaux de la maintenance

2.1. Définition

Selon la norme NF EN 13306 : « *Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ».

Cette définition appelle les remarques suivantes : La maintenance est l'ensemble des actions techniques (réparations, échange standard, serrage, nettoyage, etc.) mais aussi administratives et de management. La maintenance, ce n'est pas uniquement réparer ou faire de la maintenance technique, c'est aussi de la gestion et de l'organisation. Sans ces deux dernières, les résultats pourraient être très mauvais. En effet, si l'on dispose d'une équipe de maintenance composée d'orfèvres en matière d'intervention mais, malheureusement, pour une négligence administrative ou de gestion, les pièces de rechange requises ne sont pas disponibles, la durée d'arrêt pourrait être alors allongée outre mesure ce qui générerait des pertes financières pouvant être très importantes. Le résultat de la maintenance est alors mauvais bien que, sur le plan technique, l'équipe de maintenance soit excellente. Le management et l'administration sont deux nécessités impérieuses pour la maintenance comme pour toute autre activité d'ailleurs. [1]

2.2. Les objectifs de la maintenance

Selon la norme NF EN 13306, les objectifs sont les buts fixés et acceptés pour les activités de maintenance. Cela suppose leur négociation afin de recueillir l'aval de toutes les parties intéressées. Ces objectifs doivent être Smart :

- Spécifiques (liés intimement à l'activité) ;
- Mesurables (ayant un ou plusieurs indicateurs pour les mesurer) ;
- Accessibles (négociés, faisables et acceptés par les concernés) ;

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

→ Réalistes (ambitieux mais réalistes et non utopiques) ;

→ Temporels (dont l'atteinte est limitée dans le temps).

Des objectifs non acceptés connaîtront de grandes difficultés pour leur réalisation. On a souvent utilisé la relation :

$$\text{Résultat} = \text{objectif} \times \text{adhésions} \text{ ou encore } \text{Résultat} = \text{action} \times$$

Si l'objectif est excellent ou que l'action préconisée pour l'atteindre est à 100 % et si l'adhésion est à 50 % seulement, le résultat sera lui aussi à 100 %. Il y a nécessité de négociation et d'acceptation des objectifs. [1]

Partant de la définition de la maintenance, il apparaît que les objectifs de la maintenance sont nombreux. Néanmoins, ils peuvent être groupés en huit (figure 1.1) :

→ La disponibilité ;

→ L'économie ;

→ La qualité ;

→ La capacité ;

→ La durabilité ;

→ La sécurité ;

→ La productivité ;

→ La protection de l'environnement.

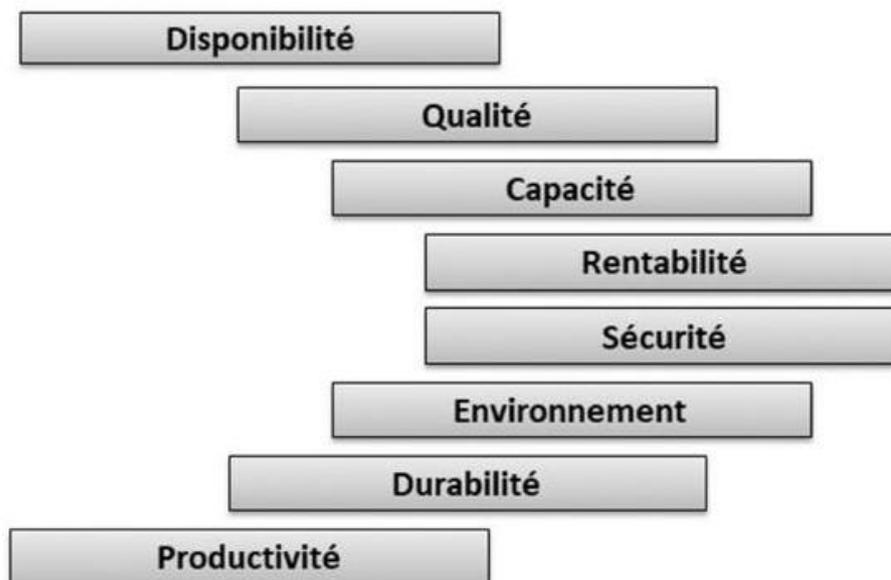


Figure 1.1. Objectifs de maintenance

2.3. Types de maintenance

Les actions de maintenance s'exercent lors de la phase d'utilisation du bien et ont pour but de garder un niveau de fonctionnement acceptable du point de vue de la sécurité, de la fiabilité, de la qualité du service rendu et des coûts de fonctionnement. On peut classer les différentes techniques selon la politique de maintenance appliquée :

- ▶ Maintenance corrective ou fonctionnement jusqu'à rupture, nécessitant parfois une méthode de dépannage rapide (maintenance différée ou maintenance d'urgence) ;
- ▶ Maintenance préventive systématique, consistant à effectuer des inspections, démontages et changements de pièces périodiques ;
- ▶ Maintenance conditionnelle ou prédictive, permettant de déterminer l'état d'une machine selon un paramètre de surveillance. Les techniques de maintenance conditionnelle prédictive consistent à choisir un paramètre qui varie avec l'état de la machine (par exemple : la température ou la vibration des machines) et à en étudier l'évolution. Les descripteurs de l'évolution du défaut sont des outils très importants pour aider le responsable de l'entretien à découvrir les problèmes. Ces descripteurs aident à diagnostiquer la source du problème afin de prescrire des méthodes de préventions adéquates. [2]

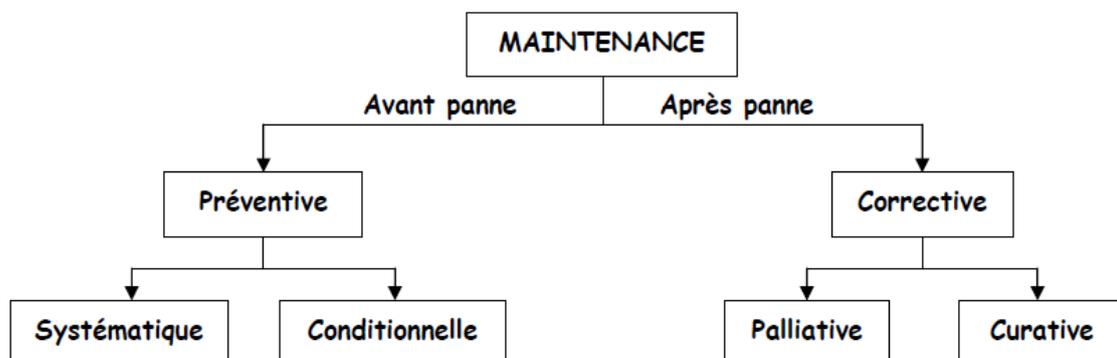


Figure 1.2. Les différents types de maintenance

3. Analyse vibratoire

3.1. Définition

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle. [3]

3.2. Objectifs de l'analyse vibratoire

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- ▶ Réduire le nombre d'arrêts sur casse ;
- ▶ Fiabiliser l'outil de production ;
- ▶ Augmenter son taux de disponibilité ;
- ▶ Mieux gérer le stock de pièces détachées, etc.

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique. [3]

3.3. Technologies de l'analyse vibratoire

Il existe deux technologies permettant de réaliser une surveillance vibratoire :

3.3.1. Par mesure directe du déplacement des parties tournantes

Réalisées à l'aide de capteurs à courants de Foucault, ces mesures, leur interprétation et leurs applications ne sont pas traitées ici. La technologie mise en œuvre est lourde. Une application courante est la surveillance des machines à paliers hydrauliques (à coin d'huile). Cette surveillance est presque toujours réalisée on line c'est-à-dire en temps réel. Les capteurs mesurent en permanence les déplacements des arbres et autorisent ainsi le déclenchement immédiat d'alarmes en cas de dysfonctionnement. [3]

3.3.2. Par mesure de l'accélération subie par les parties fixes de la machine

Les moyens mis en œuvre sont, dans ce cas, beaucoup plus accessibles aux petites structures. À l'aide d'un accéléromètre relié à un collecteur de données, le technicien recueille les vibrations subies par les carters des machines. Cette technique se prête aussi bien à la surveillance on line qu'à la surveillance périodique effectuée lors de rondes selon un calendrier préétabli. L'industrie lourde, généralement utilisatrice de turbomachines, a souvent recours à l'ensemble des deux technologies afin de réaliser une surveillance vibratoire performante de son outil de production. [3]

4. Les roulements et leurs défauts

4.1. Géométrie et constitution d'un roulement

La performance des roulements est directement liée à la qualité du matériau utilisé en particulier sa propreté. En effet les concentrations de contraintes liées à la géométrie du contact sont considérablement amplifiées par la présence de défauts de type inclusions non métalliques dans la zone mécaniquement sollicitée (zone de charge). Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les chemins (pistes) assure la transmission de la charge (l'énergie) d'une bague à une autre. Afin d'assurer un roulement parfait [4], il faut que les éléments roulants soient complètement séparés par une cage.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels (figure 1.3) [5]:

- ▶ La bague extérieure ;
- ▶ La bague intérieure ;
- ▶ La cage ;
- ▶ Les éléments roulants.

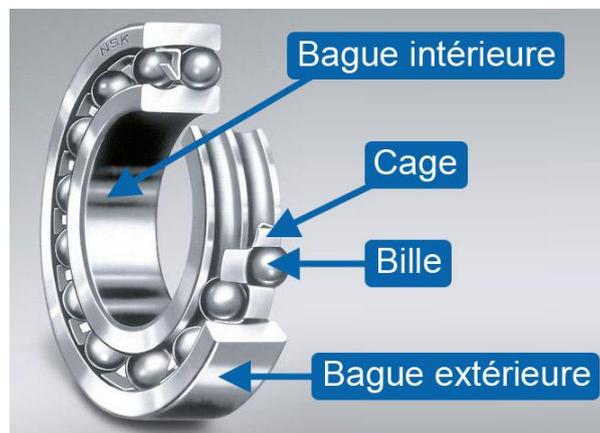


Figure 1.3. Différentes composantes d'un roulement [6]

4.2. Défauts des roulements

En général, lorsque les roulements sont utilisés correctement, ils durent nettement plus longtemps que leur durée de vie estimée. Toutefois, les roulements tombent souvent en panne prématurément en raison d'erreurs qui pourraient être évitées. Les causes d'une telle défaillance prématurée sont le montage incorrect, les erreurs de manipulation, la lubrification insuffisante,

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

l'entrée de particules étrangères ou encore la production anormale de chaleur. Lorsque toutes les conditions sont connues, à la fois avant et après la panne, y compris l'utilisation, les conditions de fonctionnement et l'environnement, une contre-mesure peut alors être déterminée en étudiant la nature de la panne et ses causes probables. [NSK]. [7]

Selon NSK (Nippon Seikō Kabushiki-gaisha, Japanese Precision Company), il existe 18 aspects de détérioration majeure des roulements :

1. Écaillage

L'écaillage se produit lorsque de petites particules de matériau du roulement se détachent de la surface du chemin de roulement ou des éléments du roulement en raison de la fatigue par laminage, créant alors des zones à la texture grossière et rugueuse.

2. Lamellage

Des taches dépolies ou ternes accompagnées d'une usure légère apparaissent à la surface. À partir de ces taches dépolies, de minuscules fissures se forment vers l'intérieur jusqu'à une profondeur de 5 à 10 μm . Des petites particules se détachent et un phénomène secondaire d'écaillage se développe largement.

3. Éraflures

Les éraflures consistent en un endommagement de la surface dû à l'accumulation de petits grippages causés par le glissement dans des conditions de lubrification insuffisante ou d'utilisation intense. Un endommagement linéaire apparaît sur toute la circonférence du chemin de roulement et sur les surfaces de roulement. Un endommagement de forme cycloïdale au niveau des extrémités du roulement ainsi que des éraflures au niveau de la surface de contact de l'épaulement peuvent aussi se produire.

4. Tache

Le phénomène de tâche consiste en un endommagement de la surface qui se produit à partir d'une accumulation de petits grippages entre les composants du roulement, causée par la rupture du film d'huile et/ou le glissement. Une rugosification de la surface se produit en même temps qu'un phénomène de fusion.

5. Fracture

Le phénomène de fracture concerne des petites pièces qui ont été cassées en raison d'une charge excessive ou de chocs agissant localement sur une arrête de roulement ou sur l'épaulement d'un chemin de roulement.

6. Fissures

Fissures sur la piste de roulement et des éléments roulants. Le fait de poursuivre l'utilisation dans ces conditions provoque des fissures plus importantes ou des fractures.

7. Endommagement de la cage

L'endommagement de la cage comprend : Déformation de la cage, fracture et usure, fracture des montants de la cage, déformation de la surface latérale, usure de la surface de la poche et usure de la surface de guidage.

8. Indentation

Lorsque des débris tels que des petites particules métalliques sont incrustées dans la zone de contact du roulement, des indentations apparaissent à la surface du chemin de roulement ou des billes. Les indentations peuvent apparaître à des intervalles correspondant à l'écartement entre les éléments roulants en cas de chocs lors du montage (marques « Brinell »).

9. Piqûration

La zone piquée a une apparence terne au niveau de la surface de la bille ou de la piste.

10. Usure

L'usure est une détérioration de surface causée par un frottement par glissement à la surface du chemin de roulement, des éléments roulants, des faces des rouleaux, de la face de l'épaulement, des poches de cage, etc.

11. Usure de contact

L'usure est due au glissement répété de deux surfaces l'une sur l'autre. L'usure de contact se produit sur la surface de montage ainsi que sur la zone de contact entre la piste et les éléments roulants. La corrosion de contact est un autre terme utilisé pour désigner les particules rouges-brunes ou noires résultant de l'usure.

12. Faux « Brinelling »

Parmi les différents types d'usure de contact, le faux Brinelling désigne l'apparition de taches creuses qui ressemblent à des marques « Brinell » et qui sont dues à l'usure causée par les vibrations et les oscillations au niveau des points de contact entre les billes et la piste.

13. Fluage

Pour ce qui concerne les roulements, le fluage est un phénomène de glissement relatif entre les surfaces de montage, qui crée un jeu entre ces surfaces. Le fluage se manifeste par un aspect brillant, parfois par des éraflures ou des marques d'usure.

14. Grippage

En cas de surchauffe subite en cours de rotation le roulement ternit ou change de couleur. Puis les bagues de chemin de roulement, les éléments roulants et la cage se ramollissent, fondent et se déforment en fonction de l'évolution des dommages.

15. Corrosion électrique

Lorsqu'un courant électrique traverse un roulement, un phénomène d'arc électrique et de brûlure se produit à travers le mince film d'huile au niveau des points de contact entre le chemin de roulement et les éléments roulants. Les points de contact sont fondus localement et produisent des stries en forme de « cannelures » ou de rainures qui sont visibles à l'œil nu. L'observation par agrandissement de ces stries révèle des creux en forme de cratère qui caractérisent le phénomène de fusion par arc électrique.

16. Rouille et corrosion

La rouille et la corrosion d'un roulement se manifestent par des piqûres à la surface des bagues et des billes et peuvent se produire au niveau des éléments roulants sur les bagues ou sur l'ensemble des surfaces du roulement.

17. Rayures de montage

Rayures en ligne droite à la surface des chemins de roulement ou des éléments roulants causées lors du montage ou du démontage du roulement.

18. Changement de couleur

Le changement de couleur des cages, des éléments de roulement et des bagues de chemin de roulement se produit en raison de leur réaction avec le lubrifiant à température élevée.

La figure (1.4) montre de photos réelles des 18 aspects de détérioration des roulements selon NSK.



1- Écaillage



2- Lamellage



3- Éraflures



4- Tache



5- Fracture



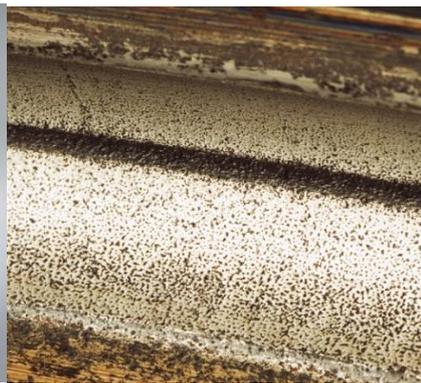
6- Fissure



Endommagement de la cage

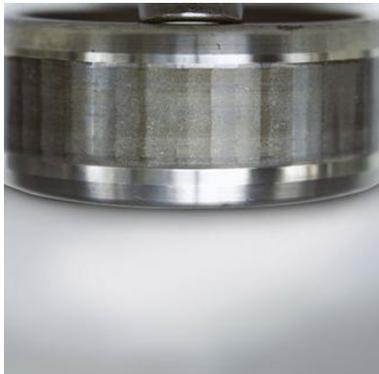


8- Indentation



9- Piqûration

7-



10- Usure



11- Usure de contact



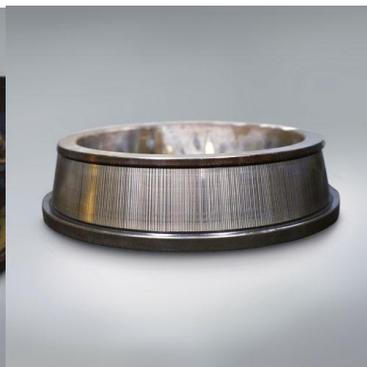
12-Faux « Brinelling »



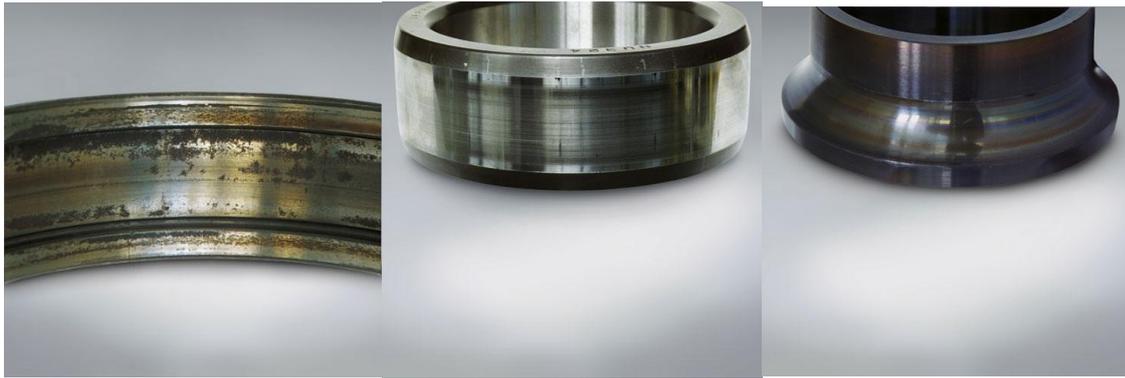
13- Fluage



14- Grippage



15- Corrosion électrique



16- Rouille et corrosion

17- Rayures de montage

18- Changement de couleur

Figure 1.4. Principaux aspects de la détérioration des roulements. Photos NSK

4.3. Signatures vibratoires des principaux défauts

4.3.1. Défaut de type écaillage affectant la bague externe

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. A 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 1.5). [8]

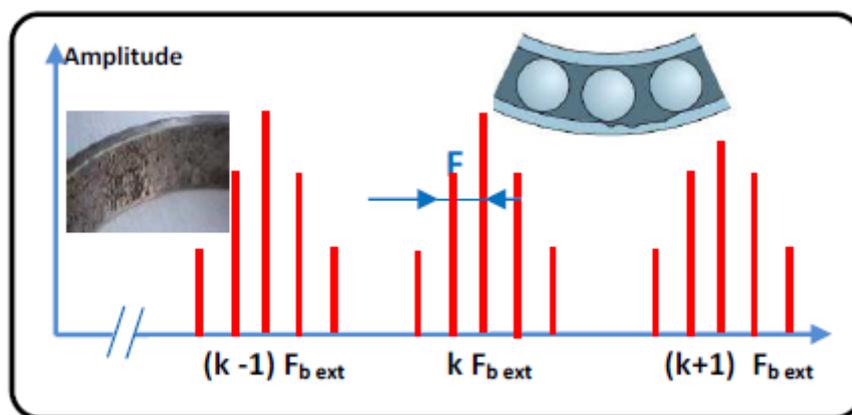


Figure 1.5. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure

4.3.2. Défaut de type écaillage affectant la bague interne

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (figure 1.6). [8]

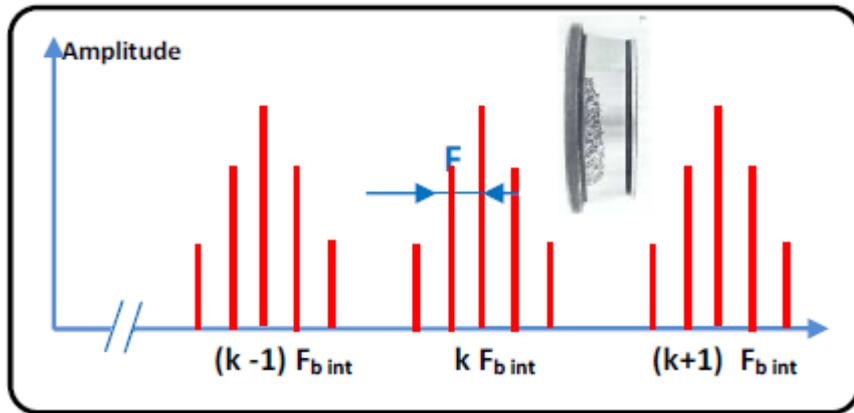


Figure 1.6. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure

4.3.3. Défaut de type écaillage sur un élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (figure 1.7). [8]

4.3.4. Défauts de type déversement de bague

Le défaut de type déversement de bague extérieure s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible (figure 1.8). [8]

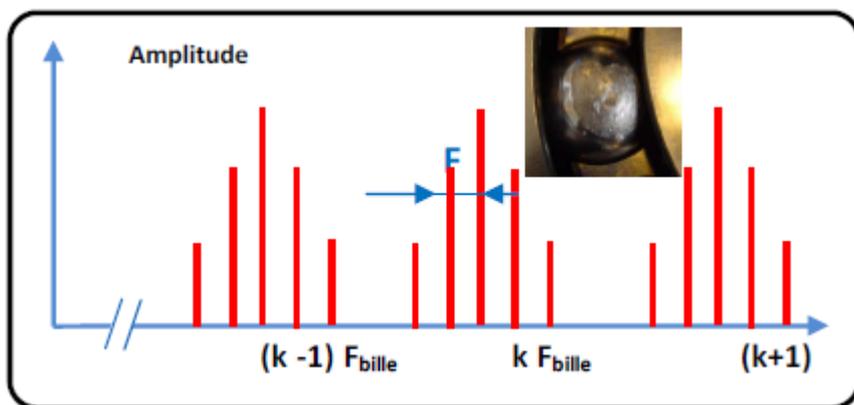


Figure 1.7. Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant

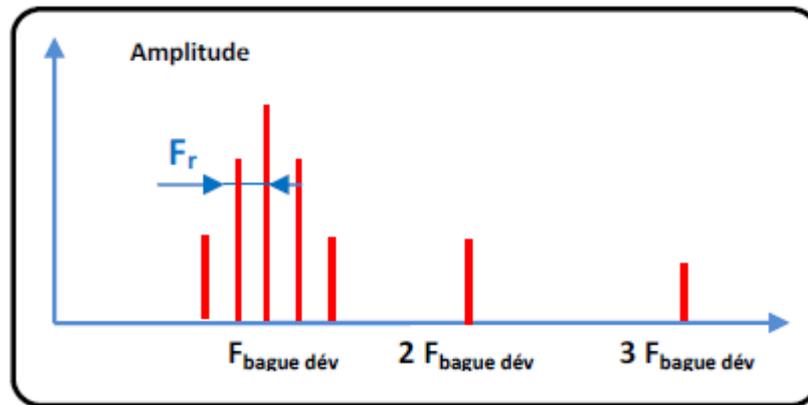


Figure 1.8. Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague

4.4. Fréquences caractéristiques des roulements à billes

Des fréquences caractéristiques, provenant de calculs cinématiques, sont associées avec les différents organes constitutifs d'un roulement à billes, la bague externe, la bague interne, la cage et les billes. [9]

La fréquence d'un défaut de roulement localisé sur :

- **La bague externe :**

$$f_{be} = \frac{f_r}{2} N_B \left[1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right] \quad (1.1)$$

- **La bague interne :**

$$f_{bi} = \frac{f_r}{2} N_B \left[1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right] \quad (1.2)$$

- **La cage :**

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right] \quad (1.3)$$

- **Les billes :**

$$f_{bille} = f_r \frac{D_P}{D_B} \left[1 - \left(\frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

Avec :

- f_{be} : Fréquence de bague externe

- f_{bi} : Fréquence de bague interne

- f_c : Fréquence de cage

- f_{bille} : Fréquence de bille

- f_r : Fréquence de rotation mécanique

- N_B : Nombre de billes du roulement
- D_B : Diamètre des billes
- D_p : Diamètre moyen du roulement
- θ : Angle de contact.

4.5. Modes de surveillance des roulements

La tenue d'un roulement est essentiellement liée à son environnement de service. Il peut tenir très longtemps, tant qu'il n'est pas exposé à la poussière, l'humidité et ou la condensation. Les contrôles spéciaux concernent donc l'étanchéité du roulement, ou de son carter. [10]

4.5.1. Bruit

Certains roulements sont trop petits pour justifier une surveillance vibratoire approfondie, mais il peut être intéressant de les « écouter », soit « au tournevis », soit avec un des dispositifs simples de contrôle vibratoire existants. Dès qu'un bruit de roulement n'est plus un léger ronronnement régulier, il faut envisager son remplacement.

4.5.2. Contrôle du jeu à l'arrêt

Cette technologie de CND (contrôle non destructif) est nécessaire et utile pour les gros roulements, où les enjeux sont importants en cas de défaillance (papeteries, sidérurgie, etc.).

4.5.3. Echauffement

Un roulement ne doit pas fonctionner à une température supérieure à 125°C (sauf ceux conçus pour). Il est préférable que les roulements montés à des emplacements critiques ou peu accessibles soient équipés de sondes de température. Les causes d'une élévation anormale de température peuvent être une lubrification insuffisante ou excessive, une surcharge, une détérioration du roulement, etc. Si la température du roulement est de 10° à 30°C supérieure à que celle de la température ambiante, on vérifie que la quantité de graisse est convenable.

4.5.4. Absence de fuite

Toute fuite de lubrifiant est le symptôme d'un dysfonctionnement du roulement ou des dispositifs qui l'entourent. Il est très important que la bonne quantité de lubrifiant soit maintenue dans le roulement.

5. Techniques utilisées dans la détection des défauts de roulements

5.1. L'analyse par thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge (TIR) est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique. La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien [8]. Elle consiste à recueillir, via une caméra thermique, le flux de chaleur émis naturellement par le corps étudié [11]. En effet, la configuration de la thermographie passive permet d'effectuer des inspections non destructives et non invasives à une distance sûre des structures à contrôler. Les éléments qui surchauffent sont aisément détectés et localisés à l'aide des images thermiques. Des profils anormaux thermiques sont significatifs de composants défectueux ou en voie de le devenir [12]. La figure (1.9) montre l'image thermique d'un roulement monté sur une machine, on distingue les zones dont la couleur est jaune/rouge correspondant à des températures élevées.

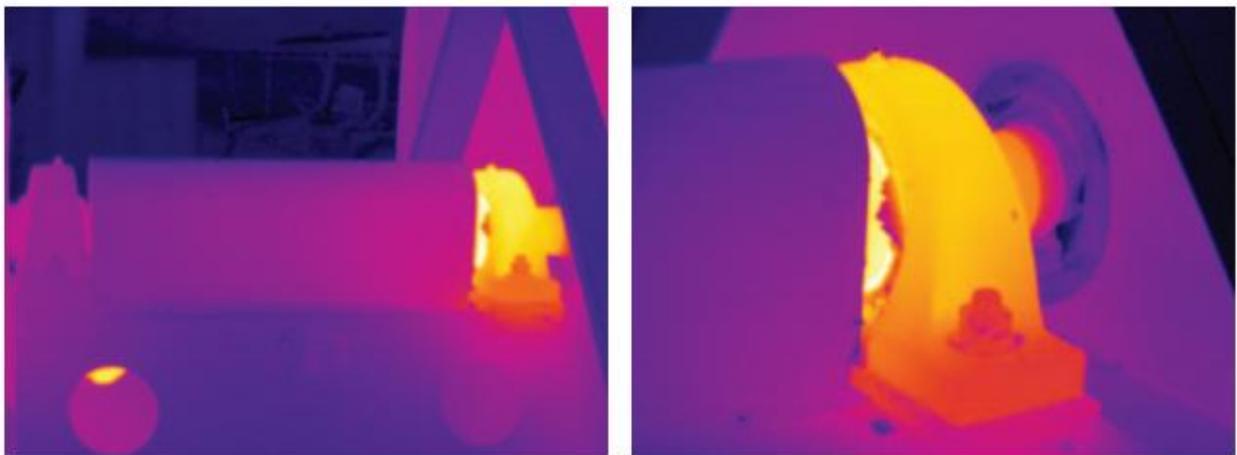


Figure 1.9. Image thermique de roulement [13]

5.2. L'analyse par l'Emission Acoustique

Selon la norme NF A 09-350 de 1984, l'émission acoustique résulte d'un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à sollicitation [14]. Cette norme a été remplacée par la norme NF EN 1330-9 d'Avril 2000 [15] qui correspond aux essais non destructifs en émission acoustique. L'émission acoustique consiste à détecter des signaux à hautes fréquences (ultrasons) sur une gamme de 20 kHz à 10 MHz. L'émission acoustique fait partie des méthodes de contrôle non destructif. Elle a un grand intérêt pour la maintenance conditionnelle car elle permet de planifier des phases de contrôle et de définir les interventions à l'aide de seuils, d'alarmes.

Cette technique s'améliore grâce à l'évolution de l'informatique et aux moyens de traitements de signaux et commence à se développer dans le contrôle de machines tournantes. L'Emission Acoustique (EA) découle d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ou d'un élément mécanique sous contrainte de tensions (figure 1.7). L'EA permet de relever plusieurs phénomènes : la relaxation de contraintes dans les soudures, la propagation de fissures, la corrosion, les frottements (éléments tournants, les roulements), les fuites (de liquide ou de gaz). [16]

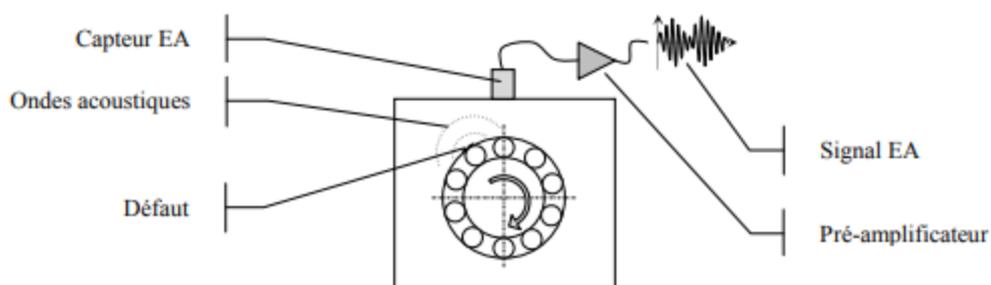


Figure 1.10. Schéma de la chaîne d'émission acoustique, de la création de l'onde mécanique à la visualisation du signal EA [16]

5.3. L'analyse de lubrifiant

La lubrification est un élément essentiel pour le bon fonctionnement du roulement. 70% des avaries des roulements sont dues à des problèmes de lubrification. La lubrification a pour objectif d'interposer un film de lubrifiant (dit film d'huile) entre les corps roulants et le chemin de roulement, afin d'éviter l'usure et le grippage des éléments en contact. De plus, le lubrifiant

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

assure une protection contre l'oxydation et la pollution extérieure et, dans le cas de l'huile, un refroidissement. La durée de vie du roulement est directement liée à l'efficacité du film d'huile qui dépend [17] :

- De la nature du lubrifiant et donc de ses capacités à tenir en température, vitesse...
- De la charge et de la vitesse du roulement.

Cette technique consiste à analyser l'huile présente dans un roulement. Cette analyse peut se faire selon deux méthodes [18] :

- La première utilise un simple examen visuel du lubrifiant. Avec cet examen à partir de la couleur du lubrifiant, on peut détecter les signes d'une usure anormale, de la présence d'une corrosion ou bien un écaillage des surfaces.
- La deuxième méthode consiste à procéder à une analyse chimique du lubrifiant afin de déterminer les concentrations et la présence de certaines particules.

5.4. L'analyse vibratoire

L'expérience a montré que, parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, on a la vibration. Les vibrations fournissent des paramètres fondamentaux permettant la détection précoce des causes de défaillance et donc la définition de l'organe défectueux, sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants. Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, usure de roulements, usure d'engrenages, défaut d'alignement, défaut de graissage, desserrage, jeu, fissures, etc.), la signature vibratoire change. C'est la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne [19], il existe plusieurs techniques pour analyser les vibrations générées par les machines tournantes :

5.4.1. Méthodes temporelles (Les indicateurs scalaires)

Basée sur les signaux temporels extraits des capteurs de vibration et filtrés sur certaines plages fréquentielles, cette technique rapide, extrait des indicateurs, pour la plupart statistiques,

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

résumant l'information contenue dans le signal et permettant de générer un repère. Le suivi d'évolution du repère donne une information plus ou moins précise et complète, sur son état de fonctionnement. L'utilisation de ces techniques donne une première information à partir des signaux, mais nécessite d'être accompagnée par des investigations plus poussées dans le cadre du diagnostic. Par rapport à d'autres défaillances, il existe un grand nombre d'indicateurs plus ou moins efficaces et suffisants pour dépister certaines défaillances. Les indicateurs les plus couramment utilisés sont décrits ci-dessous :

a) RMS :(Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire (large bande) très utilisé bien qu'il soit peu significatif [20], et s'écrit :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2} \quad (1.5)$$

Où $s(t)$ est le signal temporel mesuré, N_e représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Dans l'ensemble, la valeur RMS ne peut pas détecter toutes les pannes et émettra une alarme, et c'est le principal inconvénient de la maintenance prédictive.

b) Indicateur de crête

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête ou le kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles tels que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré [21]. Le facteur de crête est défini comme le rapport entre la valeur de crête et la valeur quadratique moyenne :

$$FC = \frac{V_{crete}}{RMS} \quad (1.6)$$

Le facteur crête a l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace. Ceci provient du fait que pour un roulement sans défaut, le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante [21].

c) Kurtosis

C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de kurtosis proche de 3. Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3 [22].

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t) - \bar{s}]^4}{\left[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t) - \bar{s}]^2 \right]^2} \quad (1.7)$$

$s(t)$: est le signal temporel,

\bar{s} : est la valeur moyenne des amplitudes,

N_e : Est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

5.4.2. Méthodes fréquentielles

a) Analyse spectrale

L'analyse spectrale ou fréquentielle est la technique la plus ancienne. Ce sont les bases les mathématiques remontant au 17^e siècle après les premiers travaux de Sir Isaac Newton qui a introduit le mot spectre comme terme scientifique. Ce n'est qu'en 1822 qu'un physicien, le Français Jean Baptiste Joseph Fourier, qui a présenté sa célèbre transformation appliquée aux signaux apériodiques. Cette transformation est une généralisation de la série de Fourier utilisée pour les signaux périodiques discrets permettant la transition du domaine temporel au domaine fréquence [23]. La transformée de Fourier d'un signal $s(t)$ est donnée par :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2j\pi ft} dt \quad (1.8)$$

Où

$S(f)$ est la transformée de Fourier, t est la variable temps, f est la variable fréquence.

L'utilisation directe des composantes de la transformée de Fourier comme indicateurs, d'une manière quantitative, n'est pas pratique en diagnostic des défauts due à la quantité massive de l'information contenue dans cette représentation et à la résolution fréquentielle adoptée. Pour cette raison, plusieurs indicateurs ont été proposés dans la littérature. [24]

b) L'analyse cepstrale

L'analyse cepstrale introduite, par Bogert en 1963, est utilisée la première fois pour la détection et la suppression des échos. Elle a été utilisée aussi pour le diagnostic des machines tournantes à cause de la présence des indices (quelques récurrents battements ou échos) des défauts dans le signal. Le cepstre permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts. Il est caractérisé par les amplitudes des composantes dont les indicateurs correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. L'analyse cepstrale est un opérateur non linéaire ; elle consiste à partir du domaine temporel, à passer dans le domaine des fréquences, et à revenir dans le domaine temporel.

Par définition, le cepstre est la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance. Il est donné par l'équation suivante [25] :

$$C = TF^{-1}[Ln|X(f)|] \quad (1.9)$$

Alors que le spectre permet de visualiser les différentes périodicités contenues dans un signal, le cepstre permet lui de retrouver d'éventuelles périodicités dans un spectre. [26]

c) Analyse d'enveloppe

La méthode de démodulation ou de l'analyse d'enveloppe permet un diagnostic fiable. Cette technique est très utilisée pour la détection des défauts de roulement qui se manifestent dans les hautes fréquences. Ces défauts, de faible énergie, peuvent s'apparenter à de petits chocs qui excitent la structure de la machine. L'analyse par la détection d'enveloppe d'un signal est considérée comme un outil efficace pour la recherche des informations fréquentielles contenues dans un signal périodique complexe issu de la surveillance des machines tournantes. Ainsi, un défaut localisé dans un roulement se traduit par la présence d'une impulsion périodique dans le signal temporel pouvant servir pour le diagnostic

5.4.3. Méthodes temps-fréquences

a) La transformée en ondelettes

L'expression du mot ondelette signifie une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme, utilisée dans le traitement du signal. Les ondelettes des fonctions oscillantes au sens large, sont rapidement amorties et satisfont la nécessité de localisation temporelle et fréquentielle en même temps.

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

Elles sont localisées en temps (par translation) et en fréquence (par dilatation). Le signal peut être donc reproduit avec précision en utilisant l'analyse par ondelettes. [27]

La transformée en ondelettes remplace les sinusoides de la transformée de Fourier par une famille de translations et de dilatations d'une même fonction appelée ondelette. Mathématiquement la famille d'ondelettes se met sous la forme :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.10)$$

Avec a paramètre d'échelle ou de dilatation et b paramètre de translation.

En notant ψ^* la conjuguée de ψ La transformée continue en ondelettes (CWT) d'un signal $s(t)$ est donnée par :

$$CWT = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1.11)$$

b) Décomposition en mode empirique (EMD)

La méthode EMD est définie par un processus appelé tamisage (sifting) permettant de décomposer un signal en contributions de bases appelées modes empiriques ou IMF (Intrinsic mode functions) qui sont des signaux de type AM-FM mono-composante (au sens large), chacune de moyenne nulle. L'extraction des IMFs est non-linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. En se basant essentiellement sur les variations ou oscillations naturelles du signal, l'EMD permet une interprétation des phénomènes physiques présents. [28]

Ayant constaté un inconvénient majeur de l'EMD, qui est le mode mixing, plusieurs améliorations de cette méthode ont été proposées, telles que l'ensemble EMD (EEMD) qui est le but de notre travail. L'approche mathématique détaillée des deux méthodes sera présentée au chapitre 2.

6. Synthèse bibliographique sur l'utilisation de l'EMD et de l'EEMD pour la détection des défauts de machines tournantes

L'utilisation de l'EMD et de l'EEMD pour la détection des défauts de machines tournantes (roulements, engrenages, etc.) a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques durant ces dernières années. Pour une synthèse plus complète, l'article de Lei et al. [29] est recommandé. En effet cet article regroupe les travaux scientifiques marquants utilisant l'EMD pour la détection des défauts spécifiques des machines tournantes.

L'article de Dybala et al. [30] propose l'utilisation de l'EMD pour la détection des défauts de roulements avec une application réelle sur un tapis roulant. L'approche proposée dans cet article consiste à décomposer le signal mesuré en plusieurs IMFs selon la procédure de tamassage de l'EMD. La méthode d'assemblage des IMFs proposée dans cet article est basée sur l'hypothèse que les IMFs trouvées seront divisées en trois classes : IMFs de bruit, IMFs de signal, IMFs de tendance. Pour identifier chaque IMF et la classe à laquelle elle appartient, les auteurs ont utilisé le coefficient de corrélation de Pearson (PCC). Ils ont pu déterminer les trois classes comme suit :

- * Les IMF à faible CCP appartiennent à la classe de bruit ;
- * Les IMF avec un CCP élevé appartiennent à la classe de tendance ;
- * Les autres IMF appartiennent à la classe du signal.

Dans l'article de Gao [31], la méthode EMD est utilisée pour détecter les défauts dans les générateurs des centrales thermiques. L'approche présentée dans cet article montre qu'en raison de l'influence du bruit, l'IMF ne peut pas toujours révéler les caractéristiques du signal. Par conséquent, une fonction de mode combiné (CMF) est proposée. En utilisant la CMF, les IMFs adjacentes peuvent être combinées ensemble pour obtenir un mode d'oscillation caractéristique plus précis du signal. Enfin, l'EMD et la CMF sont utilisées pour analyser le signal réel mesuré sur le générateur d'une centrale thermique pour diagnostiquer les défauts. Les résultats montrent que cette méthode permet d'extraire efficacement les signatures des défauts.

Au cours des dernières années, de nombreux chercheurs ont appliqué l'EMD combiné à d'autres techniques pour détecter les défauts de roulement, et les résultats trouvés sont

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

meilleurs que les résultats lorsque nous utilisons l'EMD seule. Kedadouche et al. [32], ont utilisé l'EMD pour traiter un signal d'émission acoustique mesuré sur un roulement présentant un petit défaut. Les indicateurs scalaires comme : RMS, facteur de crête, kurtosis, skewness, Thikat, Talaf... etc, sont calculés pour chaque IMF et les résultats obtenus sont comparés avec les mêmes indicateurs extraits du signal d'origine. Le résultat final montre l'efficacité de la méthode de détection précoce des défauts, l'étude montre également que les indicateurs Thikat et kurtosis obtenus auprès des IMF étaient plus sensibles que ceux du signal d'origine.

Dans une autre application réalisée par Djebala et al. [33] l'EMD a été combinée à l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) pour constituer une méthode hybride très efficace pour la détection des défauts de roulements. L'EMD est tout d'abord utilisée pour décomposer le signal original en plusieurs IMF. Le kurtosis est ensuite utilisé pour sélectionner l'IMF optimale sur laquelle est appliquée l'AMRO. Les résultats montrent que le kurtosis obtenu après l'application de l'approche hybride est largement supérieur à celui obtenu par l'une ou l'autre des deux méthodes seules.

Dans l'article de Juncheng et al. [34] l'EMD a été combinée au modèle AR (modèle autorégressif). Après avoir décomposé le signal d'origine en n-IFM en utilisant la méthode EMD, et comme les IFM peuvent représenter complètement les caractéristiques du signal d'origine, les caractéristiques de celui-ci peuvent être obtenues en extrayant les caractéristiques de chaque IFM. Pour en faire, un modèle AR est établi pour chaque IMF. Les résultats expérimentaux montrent que les caractéristiques du défaut de roulement peuvent être extraites par l'approche proposée d'une manière efficace.

Dans l'article de Qihua et al. [35] une nouvelle méthode de détection des défauts de roulements à billes basée sur une méthode EMD améliorée est proposée. En fait, l'amélioration se résume à une nouvelle méthode de calcul de l'enveloppe moyenne, qui est l'une des étapes les plus importantes de l'algorithme EMD. Tout d'abord, le signal de vibration est décomposé en différentes bandes de fréquences. Ensuite, l'application de la transformée de Hilbert d'un des composants permet d'obtenir un spectre d'enveloppe à partir duquel des défauts peuvent être diagnostiqués. Les résultats ont prouvé que cette méthode est supérieure à la décomposition en ondelettes discrètes.

Pan et al. [36] ont présenté une méthode basée sur l'analyse d'enveloppe ainsi que l'EMD pour la détection des défauts de roulements. La méthode consiste à décomposer un

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

signal mesuré en utilisant l'EMD puis à calculer le spectre d'enveloppe de l'IMF appropriée. Pour choisir l'IMF appropriée, une excitation sinusoïdale sur le même roulement défectueux est effectuée pour caractériser les bandes de fréquences de résonance. L'IMF (ou plus) avec des bandes de fréquences coïncidant avec celles obtenues par l'excitation sinusoïdale est considérée comme l'IMF appropriée. Les auteurs ont utilisé le spectre d'enveloppe pour avoir de meilleurs résultats après avoir appliqué un filtre passe-bande. Un roulement à deux défauts et un autre à trois défauts sont utilisés pour justifier la méthode proposée et la comparer à l'analyse d'enveloppe sans EMD.

Ayant constaté un problème majeur dans l'EMD qui est le mode de mixage, une nouvelle méthode d'analyse a été présentée par Wu et Huang dans [37]. Cette méthode est l'ensemble de décomposition en mode empirique ou Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) en Anglais. La méthode EEMD représente une amélioration majeure de la méthode EMD, elle consiste à passer aux fonctions de mode intrinsèque IMFs un signal final $x_i(t)$ formé à partir d'un ensemble de bruit blanc $n_i(t)$ ajouté au signal d'origine $s(t)$:

$$x_i(t) = s(t) + n_i(t)$$

L'ajout de bruit blanc d'amplitude finie et non infinitésimale vise à s'affranchir du mode de mixage qui est l'un des principaux inconvénients de la méthode EMD et qui se définit comme un signal d'une échelle similaire résidant dans différentes fonctions de mode intrinsèque (IMF). Le mode de mixage est souvent une conséquence de l'intermittence du signal, cette intermittence pourrait non seulement provoquer un sérieux repliement dans la distribution temps-fréquence mais aussi rendre la signification physique de l'IMF peu claire, donc l'effet du bruit blanc ajouté est de fournir un cadre de référence uniforme en espace-temps-fréquence.

Cette nouvelle version de l'EMD, qui est l'EEMD, a été appliquée dans plusieurs articles pour la détection des défauts de roulement. Dans l'article de Guo et al. [38] une méthode hybride composée de la méthode EEMD et du Kurtosis spectral (Sk) a été proposée. L'idée est de calculer le Sk et de vérifier pour chaque bande de fréquence les valeurs anormalement élevées qui peuvent indiquer la présence d'un défaut. Le maximum Sk fournit les références sur la fréquence centrale optimale et la bande passante d'un filtre passe-bande qui peut extraire des informations masquées par le bruit de fond. Le signal filtré contient toujours du bruit, c'est pourquoi les auteurs ont utilisé la méthode EEMD. Le résultat final

Chapitre I : Concepts fondamentaux et synthèse bibliographique

prouve que la méthode hybride proposée est capable de récupérer le signal caractéristique lié aux défauts de roulement masqués par un bruit important, et fournit un signal beaucoup plus clair pour une analyse plus approfondie et un diagnostic plus précis.

Cette approche a également été utilisée pour la détection des défauts de roulements en régime variable comme dans l'article de Zhao et al. [39]. La méthode consiste à déterminer les IMF d'un signal par la méthode EEMD et à calculer les enveloppes d'ordre de chaque IMF. L'analyse de l'ordre des enveloppes est effectuée pour éliminer l'influence de la variation de la vitesse de rotation qui rend les fréquences caractéristiques du roulement plus claires et plus détectables.

Enfin, notons qu'une amélioration notable de l'EEMD a été proposée par Torres et al. [40] sous le nom de CEEMDAN (Complete EEMD with Adaptive Noise). Celle-ci a été reprise par plusieurs auteurs pour la détection des défauts de roulements, comme dans l'article de Bouhalais et al. [41] où les auteurs l'ont appliqué en régime variable conjointement avec une AMRO améliorée ainsi que l'analyse d'ordre.

7. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux concepts de la maintenance ainsi que les différentes techniques de surveillance, notamment l'analyse vibratoire. Plusieurs techniques utilisées pour le diagnostic des défauts de roulements ont été présentées dans ce chapitre, en commençant par les indicateurs temporels (RMS, Root Mean Square, Kurtosis...) et ceux fréquentiels (Analyse spectrale, analyse cepstrale ...), et enfin les méthodes temps-fréquence à l'image de l'EMD et l'EEMD. La synthèse bibliographique résume l'application de ces deux méthodes (EMD et EEMD) dans le domaine du diagnostic des défauts des machines tournantes, en particulier les défauts de roulements.

CHAPITRE II :
FONDEMENTS MATHÉMATIQUES DE
L'EMD ET DE L'EEMD

1. Introduction

Ce chapitre présente les fondements mathématiques des méthodes d'analyse utilisées dans ce mémoire ; l'EMD et l'EEMD. Dans la première partie l'EMD est expliquée d'une façon détaillée en donnant une vue globale sur son algorithme, le principe de calcul et un exemple d'application sur un signal simulé. Un exemple détaillé montrant son principal point faible, le mode mixing, est également donné. Dans la deuxième partie l'EEMD est proposée comme solution au problème du mode mixing. Son algorithme, le principe de calcul ainsi qu'un exemple d'application sont donnés.

2. Décomposition en Mode Empirique EMD

L'EMD décompose d'une façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes par l'utilisation d'un processus de tamisage. Chaque composante est une forme d'onde de moyenne nulle, modulée en amplitude et en fréquence nommée IMFs (Intrinsic Mode Function) traduite par la fonction modale intrinsèque (Sifting Process). Contrairement aux représentations temps-fréquence précédentes, la décomposition EMD est locale, itérative et entièrement pilotée par les données (Data driven approach) intrinsèque au signal. L'extraction des IMFs est non linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. L'EMD a montré ses capacités comme outil d'analyse adaptative multi-échelles des signaux non-stationnaires. [28]

3. Quelques définitions

3.1. L'enveloppe moyenne

L'enveloppe moyenne d'un signal s est une extension de la notion de moyenne locale. En pratique, elle est définie par la demi-somme de ses enveloppes supérieure et inférieure, qui sont obtenues par interpolation des maximas et des minimas respectivement. Il existe différentes méthodes d'interpolation pour les enveloppes. La plus utilisée est l'interpolation par spline cubique.

3.2. IMF (pour Intrinsic Mode Function)

C'est une fonction oscillante de moyenne nulle, c'est-à-dire une fonction :

→ Dont le nombre d'extrema et le nombre de passages par zéro diffèrent d'au plus de un

→ Dont la moyenne locale, au sens de la définition précédente, est nulle en tout point

3.3. Sifting Process (SP)

C'est la procédure qui consiste à soustraire à un signal sa moyenne locale, plusieurs fois de suite, jusqu'à obtenir une moyenne (quasi) nulle.

3.4. Une intermittence

C'est une perturbation additionnelle localisée sur un signal. Le fait d'avoir des propriétés d'une IMF le rend difficile à extraire sans une opération supplémentaire après sifting.

3.5. Mode mixing

C'est le problème majeur de l'analyse EMD. Il s'agit d'une superposition, dans des proportions déterminées, de deux ou de plusieurs modes. Ce mélange garde toutefois les propriétés d'une IMF, ce qui rend difficile la séparation avec les méthodes classiques.

4. Principe de l'EMD

L'EMD n'a pas de base théorique et est uniquement basée sur un processus de tamisage appelé (Sifting Process) en anglais (SP). Le tamisage est réalisé en deux étapes :

1. La détection des extrema du signal ;
2. L'interpolation à l'aide de ces extrema.

L'intérêt du SP est qu'il permet de faire en sorte que les composantes obtenues puissent être considérées comme des IMFs. L'arrêt du SP est lié à un critère défini dans le paragraphe suivant. Le résidu de la composante est calculé une fois le critère d'arrêt satisfait. La décomposition EMD s'achève quand le résidu est une fonction monotone, sinon on continue le processus de tamisage. [42]

On peut écrire :

$$SB(t) = \sum_{k=1}^k d_k(t) + r(t) \quad (2.1)$$

Les modes oscillants d_k appelés IMFs (Intrinsic Mode Function), sont des fonctions oscillantes autour de 0, et de moyenne locale nulle. Le résidu $r(t)$ est plutôt moins oscillant donc plus basse fréquence que d_k , c'est-à-dire qu'il contient au plus 3 extrema. Pour illustrer la décomposition,

nous considérons l'exemple simple d'un signal $x(t)$ formé de deux contributions (figure 2.1) : une oscillation rapide et une autre lente selon le modèle : $x(t) = d(t) + m(t)$, tels que :

$x(t)$: Signal

$d(t)$: Oscillation rapide (a)

$m(t)$: Tendence (b)

5. La procédure de tamisage (Sifting process)

Que l'on pourrait traduire par processus de tamisage, correspond à l'extraction d'une IMF, à partir d'un signal donné. La fonction de mode intrinsèque, ou IMF, ainsi obtenue peut-être vue comme les détails du signal, de variation rapide. Pour cela, on extrait de façon itérative ces détails, jusqu'à conserver une IMF. Lorsqu'une IMF est extraite du signal, le signal résiduel est privé des variations les plus rapides, qui ont été capturées par la fonction mode intrinsèque. On constate ainsi expérimentalement une diminution du nombre d'extrema et donc l'arrêt de l'algorithme. En particulier, le dernier résidu est une fonction monotone, qui traduit la tendance générale du signal. [43]

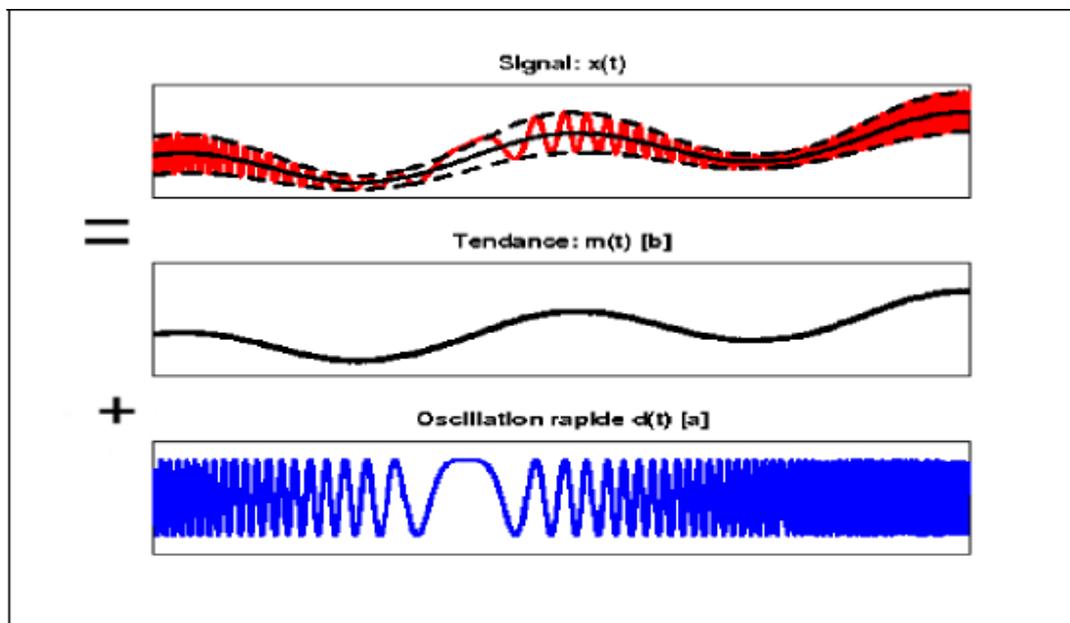


Figure 2.1. Principe de L'EMD : Oscillation rapide (a) oscillation lente (tendance) (b)

5.1. Algorithme de L'EMD

L'algorithme de L'EMD comprend les étapes suivantes :

1. Identifier tous les extrema (maxima et minima) du signal $x(t)$;

Chapitre II : Fondements Mathématiques de l'EMD et l'EEMD

2. Calculer l'enveloppe supérieure et inférieure par interpolation par spline cubique des extremas identifiés à l'étape (1) ;

3. Calculer la fonction moyenne de l'enveloppe supérieure et inférieure $m(t)$;

4. Calculer le signal de différence $d(t) = x(t) - m(t)$;

5. Si $d(t)$ possède une moyenne nulle, alors l'itération s'arrête et $d(t)$ est l' IMF_1 , nommé $C_1(t)$, sinon, passez à l'étape (1) et remplacez $x(t)$ par $d(t)$;

6. Calculer le signal du résidu $r(t) = x(t) - C_1(t)$;

7. Répétez les étapes (1) à (6) pour obtenir l' IMF_2 , appelée $C_2(t)$. Pour obtenir $C_n(t)$, continuez les étapes (1) à (6) après n itérations. Le processus est arrêté lorsque le signal résiduel final $r(t)$ est obtenu sous la forme d'une fonction monotone.

A la fin de la procédure, nous aurons un résidu $r(t)$ et une collection de n IMF , nommées de $C_1(t)$ à $C_n(t)$. [28]

La figure (2.2) montre l'organigramme détaillé de l'algorithme de l'EMD.

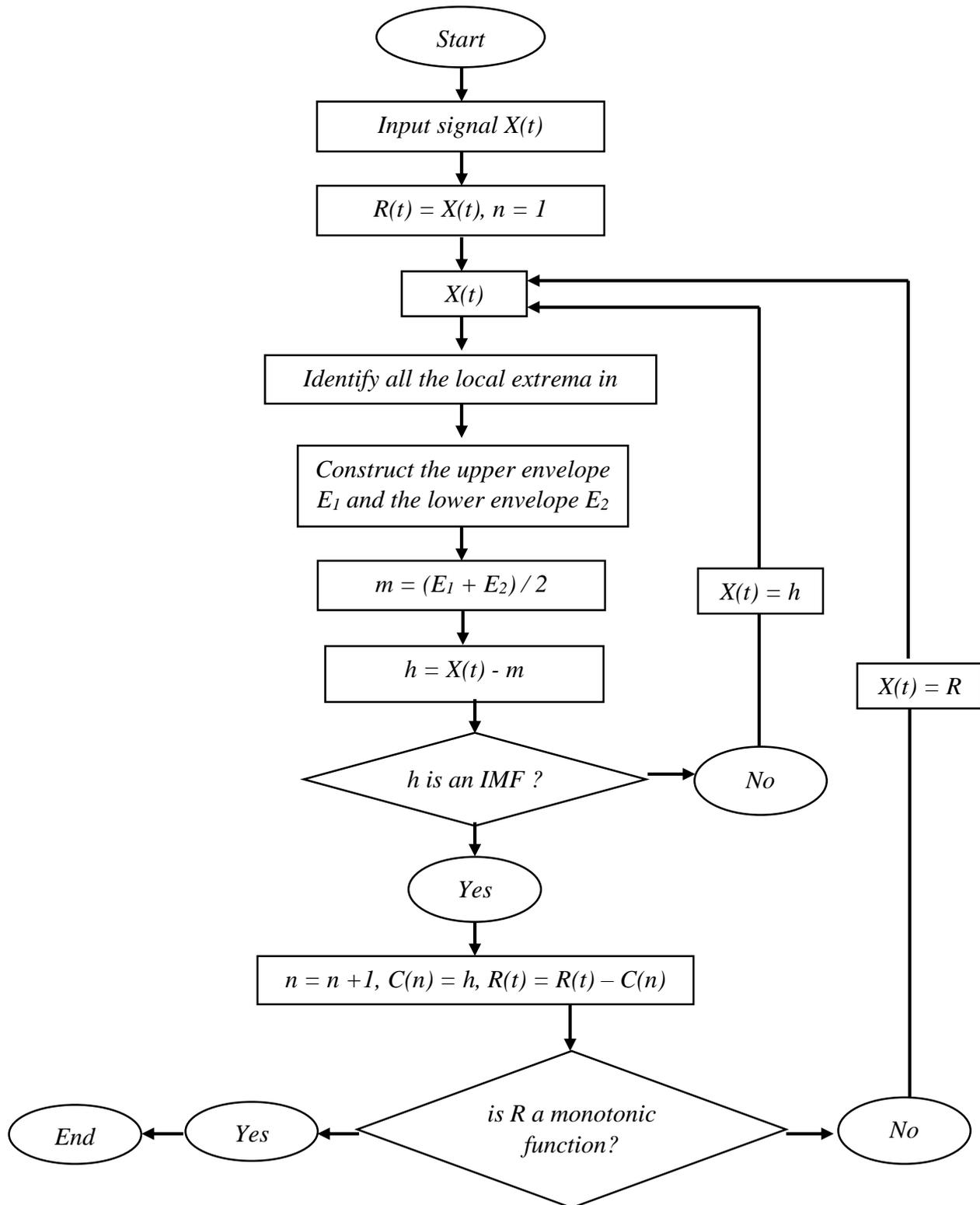


Figure 2.2. L'organigramme de la méthode EMD [28]

6. Exemple d'application de l'EMD

Soit un signal $S_I(t)$ somme de trois sinusoïdes : $S_I(t) = \sum_{i=1}^3 \sin(2\vartheta_i * \pi * t)$

Avec : $\vartheta_1 = 28\text{Hz}$, $\vartheta_2 = 13\text{Hz}$, $\vartheta_3 = 4\text{Hz}$.

On applique la méthode EMD sur le signal $S_I(t)$, les résultats sont présentés dans la figure (2.3).

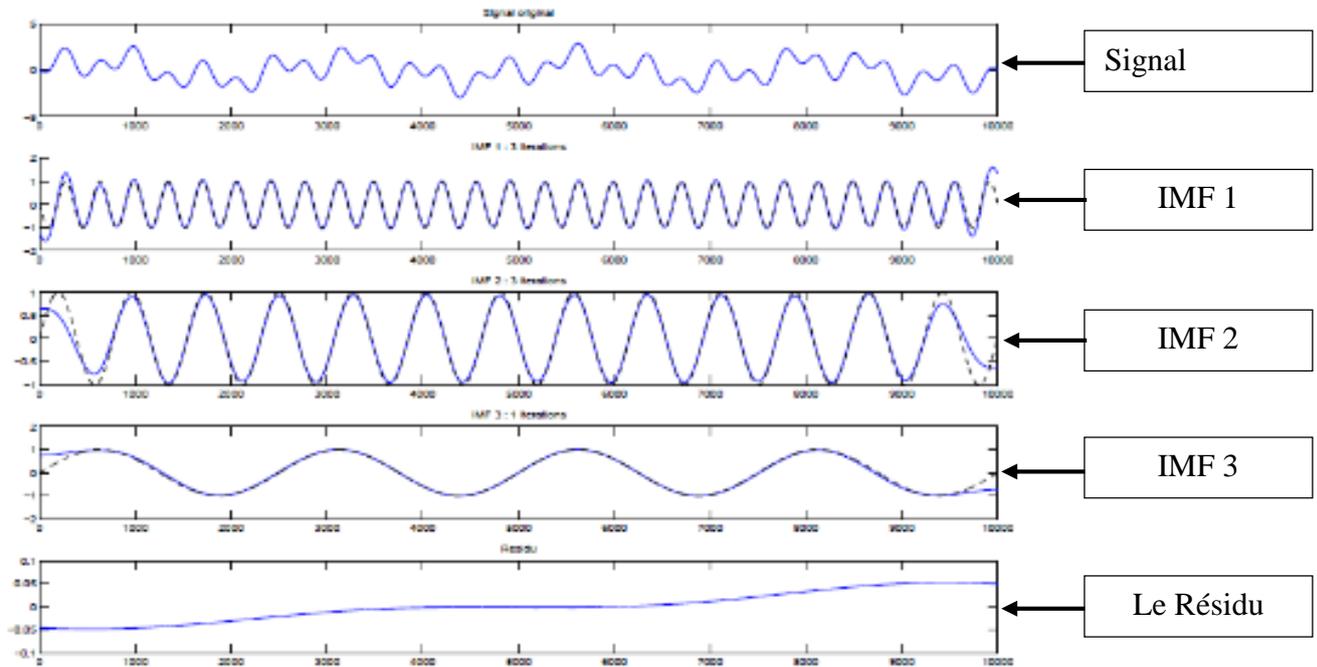


Figure 2.3. Décomposition du signal somme par EMD [43]

On constate que la méthode EMD permet de décomposer parfaitement le signal $S_I(t)$ à des IMFs contenant une seule fréquence chacune et un signal résidu. L'IMF1 représente le signal haute fréquence (28 Hz), l'IMF2 le signal de fréquence moyenne (13 Hz), et enfin l'IMF3 celui de basse fréquence (4 Hz).

7. Le Mode « Mixing »

L'un des inconvénients majeurs de l'EMD est l'apparition fréquente de mode mixing, qui est défini comme un signal d'une échelle similaire résidant dans des différentes composantes d'IMF. Le mode mixing est souvent une conséquence de l'intermittence du signal. L'intermittence pourrait non seulement provoquer un aliasing sérieux dans la distribution temps-fréquence, mais aussi rendre la signification physique de l'IMF non claire.

7.1. Exemple :

Pour montrer l'effet de mode mixing, un signal $S(t)$ est construit à partir de deux signaux $S_1(t)$ et $S_2(t)$. La figure (2.4) montre le signal et ses constituants, la figure (2.5) montre le résultat de la décomposition de ce signal par l'EMD.

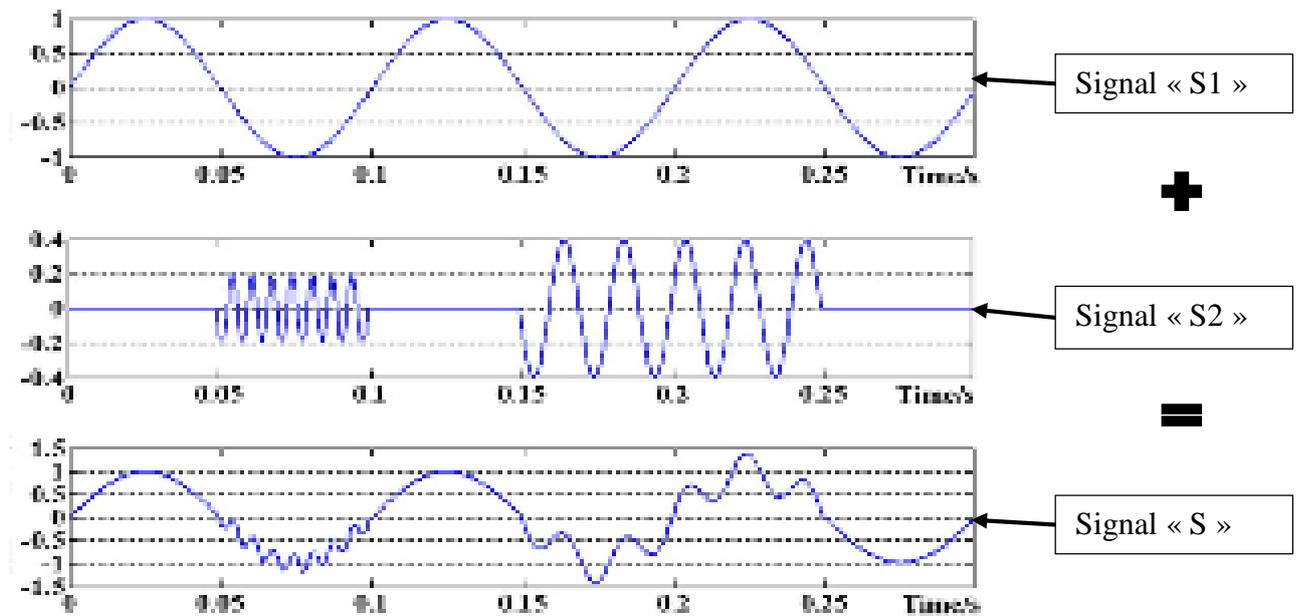


Figure 2.4. Signal original à décomposer [43]

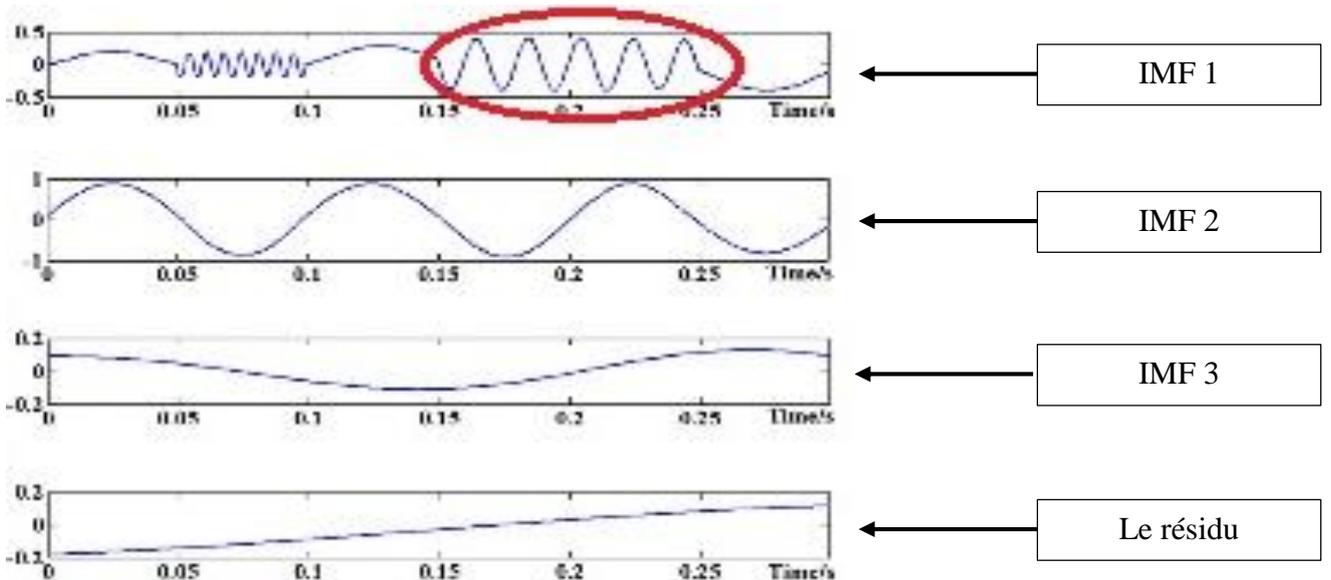


Figure 2.5. Résultats obtenus par application de l'EMD [43]

A partir de la figure (2.5) on constate qu'il existe un problème de mode « mixing » distinct dans le premier IMF (contourné en rouge). Des signaux avec des fréquences différentes (une fréquence élevée, une fréquence moyenne et une basse fréquence) apparaissent dans cette seule IMF. Ce problème peut sérieusement fausser l'interprétation des résultats obtenus notamment dans le domaine de la détection des défauts des machines tournantes.

8. Ensemble Décomposition en Mode Empirique (EEMD)

L'EEMD d'ensemble consiste à effectuer un certain nombre de fois l'EMD sur des réalisations bruitées d'un signal, puis à faire la moyenne IMF par IMF. On obtient ainsi une décomposition semblable à l'EMD, mais où l'on a amélioré la séparation fréquentielle et réduit le mélange de modes. En effet, le bruit introduit artificiellement crée de nombreux extrema, ce qui force la séparation ; par ailleurs en prenant un grand nombre de réalisations, on espère que le mélange de mode s'annulera, la décomposition sans mélange étant, on l'espère, la plus probable. Notons que l'EEMD, à cause de la moyennisation, n'est pas une décomposition complète : le signal n'est plus la somme de ses IMFs. Lorsque cet aspect est nécessaire, il vaudra mieux utiliser l'approche alternative qui est complète. [40]

9. Principe

La méthode EEMD a été introduite initialement pour résoudre le problème de mélange de modes. Etant donné un signal $x(t)$, son principe est le suivant [37]:

1. On génère N_e réalisations $b_i(t)$, $1 \leq i \leq N_e$, de bruit blanc gaussien de même variance σ_i^2 ;
2. On calcule le signal bruité pour chaque réalisation : $S_i(t) = x(t) + b_i(t)$, $1 \leq i \leq N_e$. Ensuite on extrait les N IMFs de ce signal bruité en utilisant la méthode EMD originale ;
3. Les N_e réalisations donnent accès à N_e signaux bruités qui permettent l'extraction de N_e jeux de IMFs : $IMF_{ki}(t)$, $1 \leq k \leq N$ et $1 \leq i \leq N_e$, Les IMFs de la méthode EEMD sont alors les moyennes d'ensemble de ces N_e jeux de N IMFs :

$$IMF_{EEMD_k} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} IMF_{ki}(t) \quad 1 \leq k \leq N \quad (2.2)$$

L'amplitude du bruit blanc Gaussien ε est pilotée par le taux d'erreur ε_n au final sur la reconstruction du signal $x(t)$ par sommation des IMFs et par le nombre N_e de moyennes effectuées par la relation. [28]

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{N_e}} \quad (2.3)$$

10. L'algorithme de L'EEMD

1. Ajoutez une série de bruit blanc $\mathbf{n}(t)$ au signal ciblé, nommée $\mathbf{x}_1(t)$ dans la description suivante, et $\mathbf{x}_2(t) = \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{n}(t)$;

2. Décomposer les données $\mathbf{x}_2(t)$ par l'algorithme **EMD**, comme décrit dans la partie (4.1) ;

3. Répétez les étapes (1) et (2) jusqu'aux numéros d'essai, en ajoutant à chaque fois différentes séries de bruit blanc de même puissance. On obtient la nouvelle combinaison $\mathbf{C}_{ij}(t)$ du **IMF**, où i est le nombre d'itérations et j l'échelle du **IMF** ;

4. Estimer la moyenne (ensemble) du **IMF** final des décompositions comme étant le résultat souhaité. [46]

$$EEMD_C_j(t) = \sum_{i=1}^{n_i} C_{ij}(t)$$

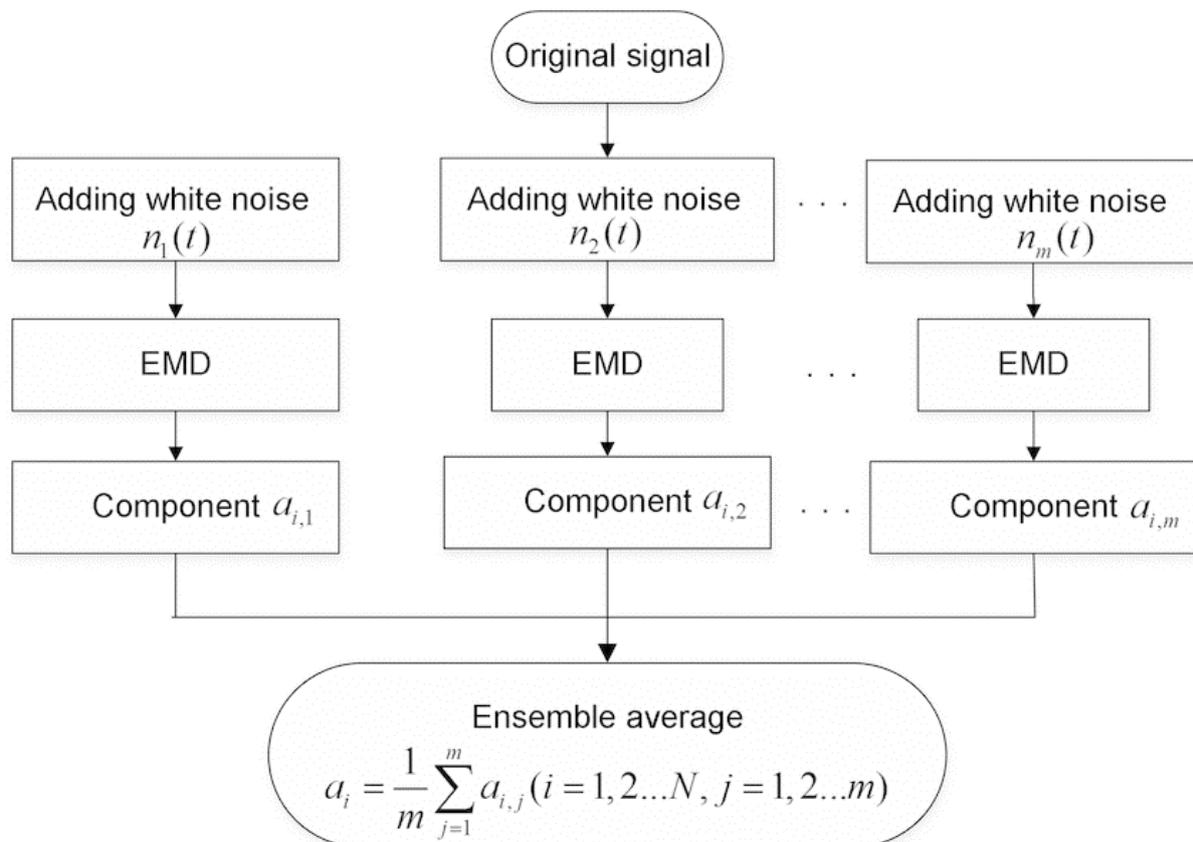


Figure 2.6. L'organigramme de la méthode EEMD

11. Exemple d'application de l'EEMD

Pour montrer le pouvoir de l'EEMD à éliminer le mode mixing, une application a été faite sur le même signal précédent (figure 2.4). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure (2.8). Il est évident que le phénomène de mode « mixing » est atténué. Dans la première IMF, seul le signal de haute fréquence apparaît, dans la seconde IMF seul le signal de fréquence moyenne apparaît, et enfin la troisième IMF ne met en évidence que le signal de basse fréquence.

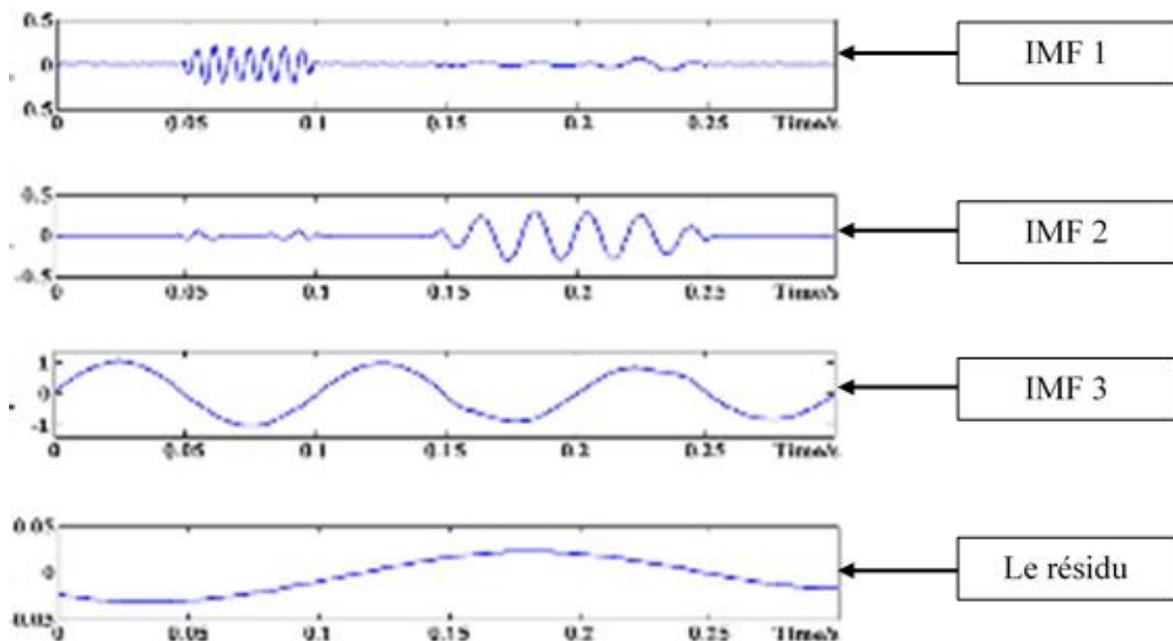


Figure 2.7. Résultats obtenus par application de l'EEMD [43]

12. Comparaison entre L'EMD et L'EEMD

La méthode EMD est bien connue et largement utilisée. Cependant, elle souffre d'un inconvénient majeur qui est le mixage des modes. Il se traduit par le fait qu'une IMF peut être présente dans une ou plusieurs IMF. Pour pallier le problème de mixage des modes, la méthode EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) a été proposée.

12.1. Les inconvénients de L'EMD

Comme toute méthode, l'EMD possède plusieurs inconvénients qui sont analysés dans la littérature, et que l'on peut classer en trois catégories :

- La première concerne l'implémentation de l'algorithme : la méthode d'interpolation, le critère d'arrêt, mais surtout la gestion des bords. En effet, durant le tamisage il faut construire la moyenne locale, qui n'est pas définie aux bords (avant le deuxième extrema et après l'avant-dernier). [44]
- La seconde concerne l'initialisation du tamisage. En effet, la détection de l'échelle fine du signal (correspondant à la fréquence instantanée de la première IMF) par les extrema pose parfois problème, de même que la définition de la moyenne locale par interpolation des extrema.
- Enfin, la formulation classique de l'EMD empêche quasiment toute analyse mathématique de son fonctionnement et de ses propriétés, même pour des signaux simples. [45]

12.2 Inconvénients de la méthode EEMD

Théoriquement, le bruit blanc ajouté est complètement éliminé par une décomposition utilisant un nombre d'essais très élevé (infini) qui pose un problème dans la méthode EEMD. Ainsi, cette méthode possède deux inconvénients :

- Difficulté d'éliminer complètement le bruit
- Grand temps de calcul (figure 2.8)

Par exemple, si le nombre d'essais Ne est fixé à 100, l'EEMD devrait exécuter 100 fois le processus de l'EMD et par conséquent l'EEMD est plus lente que l'EMD. Nous pouvons noter que le temps de calcul dans la méthode EEMD est fixé par le nombre d'essais Ne dont la Figure (2.8) donne quelques exemples. Le PC utilisé a les caractéristiques suivantes :

Chapitre II : Fondements Mathématiques de l'EMD et l'EEMD

Processeurs : Intel pentium CPU B950, 2.1 GHz (dual core), avec une mémoire de 4GB.

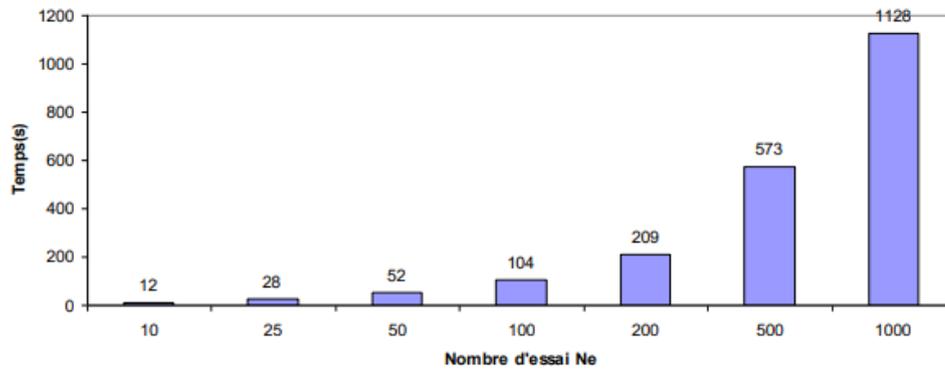


Figure 2.8. Le temps de calcul en fonction de N_e pour la décomposition EEMD

13. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases mathématiques des deux méthodes d'analyse que nous allons utiliser dans les prochains chapitres. Des exemples détaillés sur des signaux simulés ont été présentés. Une attention particulière a été réservée au mode mixing, le problème majeur de l'EMD. Une comparaison entre l'EMD et l'EEMD a montré le grand avantage d'utiliser cette dernière qui contribue efficacement à résoudre le problème du mode mixing et permettre une analyse plus fine des signaux

CHAPITRE III :

**APPLICATION DE L'EMD ET L'EEMD
POUR LA DETECTION DES DEFAUTS
DE ROULEMENTS : ETUDE
COMPARATIVE DANS LE DOMAINE
TEMPOREL**

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer L'EMD (Empirical Mode Decomposition) et L'EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) sur des signaux réels obtenus à partir de la base de données Américaine « Bearing Data Center ». Le but de ce chapitre est l'étude comparative entre l'EMD et l'EEMD dans le domain temporel.

2. Présentation de la base des données Américaine (Bearing Data Center)

Les signaux de vibration que nous proposons d'étudier ont été fournis par " *the Case Western Reserve University- Bearing Data Center* " ; base de données des essais de roulements à billes normaux ou défectueux, recueillis sur un banc d'essai très simple, composé d'un moteur, un accouplement et une génératrice. De simples défauts sous forme de points, de différent diamètres et profondeurs, ont été créés sur les différents organes composants les roulements d'essais.

2.1. Présentation du banc d'essais

Le site Web suivant : "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. Comme représenté sur la figure (3.1), le banc d'essai se compose principalement d'un moteur (à gauche), d'un accouplement « transducteur/encodeur » (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et des circuits de commande (non montrés) [46].

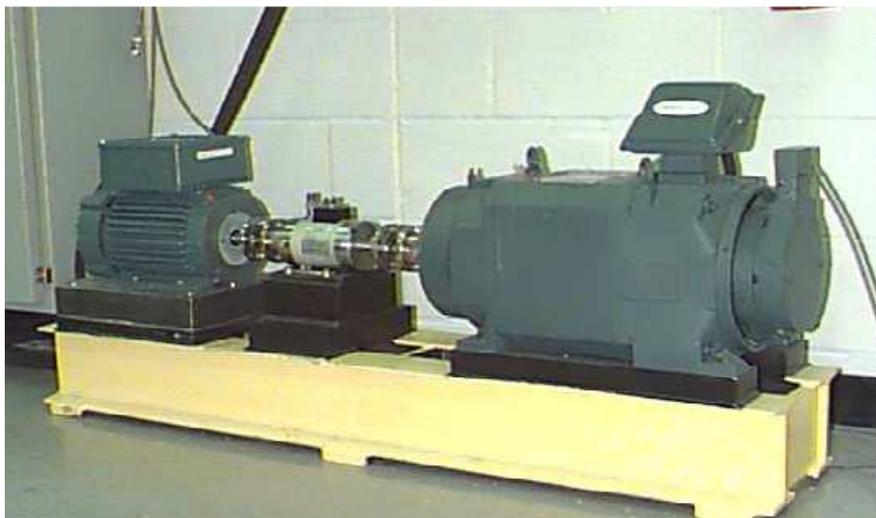


Figure 3.1. Banc d'essais de roulements Bearing Data Center

Chapitre III : Etude comparative dans le domaine temporel

Les roulements testés soutiennent l'arbre du moteur des deux côtés (coté entraînement et coté ventilateur). La figure (3.2) représente une coupe d'un moteur électrique pour comprendre la position des roulements testés.

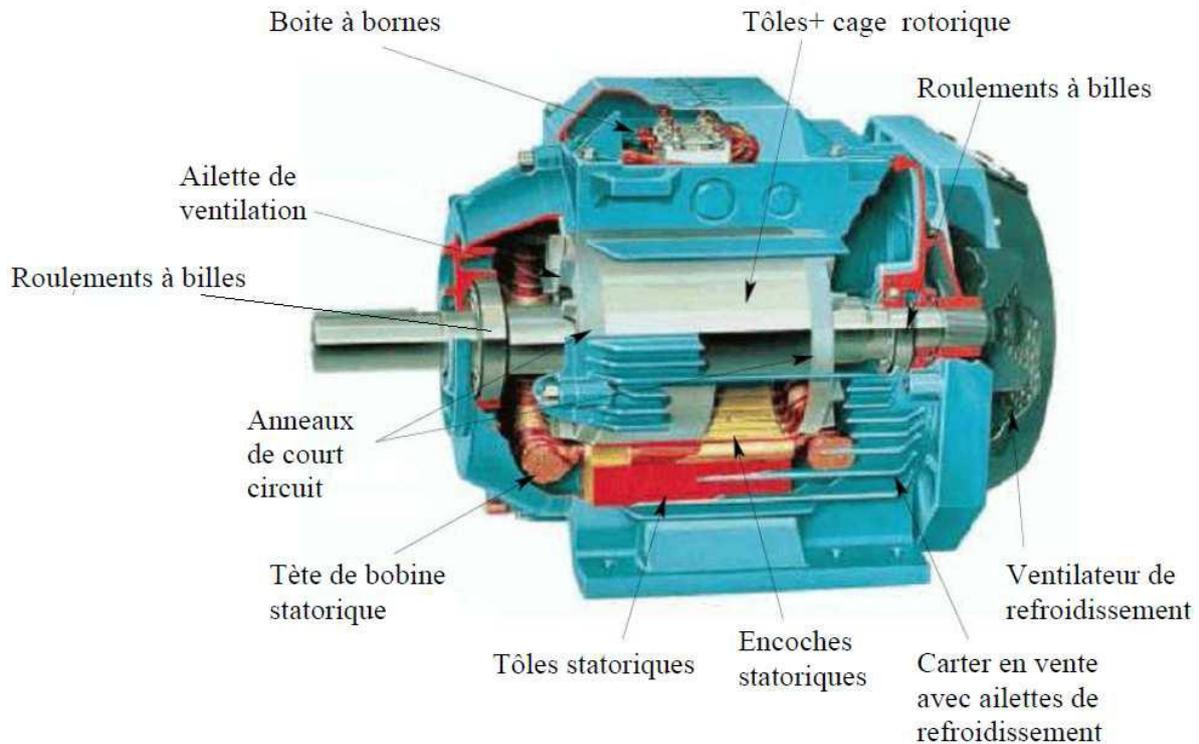


Figure 3.2. Coupe d'un moteur

Les signaux vibratoires ont été enregistrés à l'aide d'accéléromètres fixés sur la cage du moteur par aimant. Plusieurs paramètres ont été étudiés et variés dans la campagne de mesures, à savoir :

1. Trois types de défauts de roulement : sur la bague extérieure, sur la bague intérieure et sur la bille, en plus de roulements sains ;
2. Quatre gravités du défaut créé sur la bague intérieure (**0.007"**, **0.014"**, **0.021"** et **0.028"**) et trois gravités de celui sur la bague extérieure et la bille (**0.007"**, **0.014"**, **0.021"**) Sachant que : **1" = 25.4mm** ;
3. Trois charges différentes plus le cas sans charge, les couples sont respectivement **0**, **1**, **2**, **3 Hp** donnant des vitesses de rotation respectives de **1797**, **1772**, **1750** et **1730 Tr/min** ;
4. Trois positions du capteur pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure (**à 12 heures**, **à 6 heures** et **à 3 heures**),

Chapitre III : Etude comparative dans le domaine temporel

5. Deux fréquences d'échantillonnage : **12 KHz et 48 KHz** avec un nombre de points de **243938 pts**

Dans ce travail, les roulements que nous avons considérés sont les roulements de côté accouplement. Les fréquences caractéristiques des défauts sont (cf. chapitre 1) :

- Fréquence de la bague intérieure : $f_{bi} = 5.415 \times f_r$
- Fréquence de la bague extérieure : $f_{be} = 3.584 \times f_r$
- Fréquence de la cage : $f_c = 0.3982 \times f_r$
- Fréquence de la bille : $f_b = 4.7135 \times f_r$

	29.95 Hz (0Hp)	29.53 Hz (1Hp)	29.16 Hz (2Hp)	28.83 Hz (3Hp)
Bague intérieure	162.18 Hz	159.9 Hz	157.9 Hz	156.11 Hz
Bague extérieure	107.01 HZ	105.83 Hz	104.50 Hz	103.32 Hz
La cage	11.89 HZ	11.75 Hz	11.61 Hz	11.48 Hz
Les billes	140.74 Hz	139.18 Hz	137.44 Hz	135.89 Hz

Tableau 3.1. Fréquences caractéristiques des défauts de roulements pour différents couples résistants

3. Etude des signaux de la base des données

3.1. Cas sans défaut

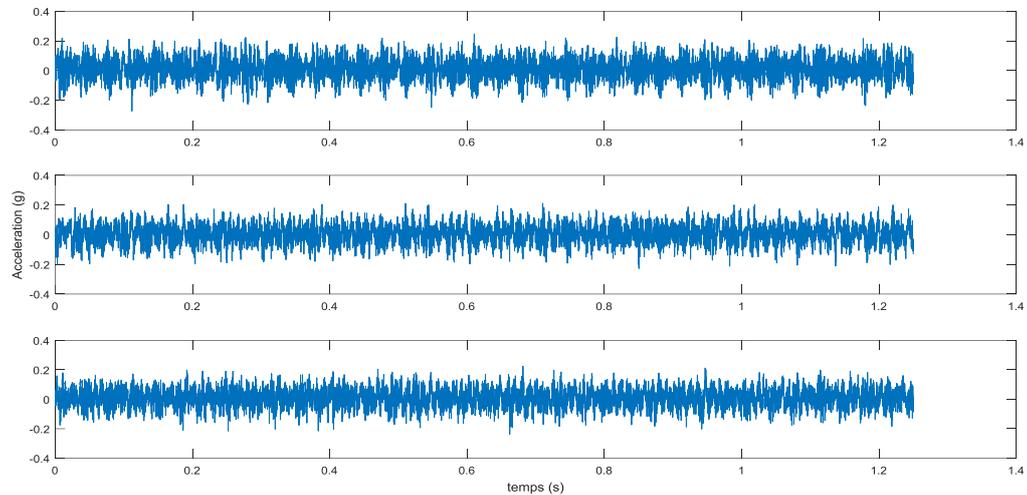


Figure 3.3. Signaux mesurés dans le cas sans défaut pour trois charges différentes (0 Hp, 1 Hp et 2 Hp de haut en bas)

La figure (3.3) représente les signaux d'accélération de roulements sans défaut pour trois différentes charges (0 Hp, 1 Hp, 2 Hp), respectivement. Aucune remarque particulière n'est à soulever, dans ce cas les valeurs du kurtosis sont aux alentours de trois ce qui est une valeur normale (cf chapitre 1). L'amplitude en terme d'accélération est comprise entre -0.4 g et 0.4 g

3.2. Cas d'un défaut sur bague intérieure

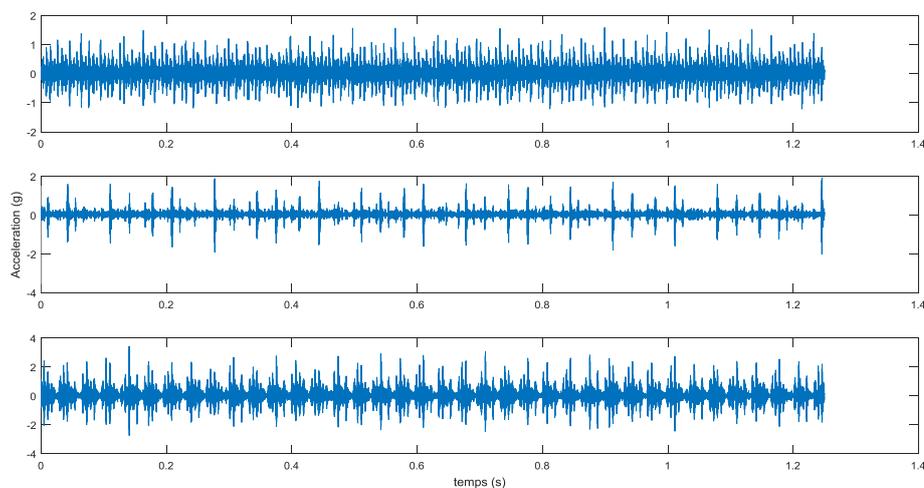


Figure 3.4. Signaux d'un défaut sur la bague intérieure pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) de haut en bas

Chapitre III : Etude comparative dans le domaine temporel

La figure (3.4) représente les signaux d'un roulement avec un défaut sur la bague intérieure pour différentes gravités du défaut (Diamètre du défaut) (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) respectivement. On remarque que ces signaux contiennent plusieurs impacts périodiques caractéristiques d'un défaut de type choc. En effet ces impacts se produisent à chaque passage de la bille sur le défaut. Leur période est l'inverse de la fréquence caractéristique du défaut sur la bague intérieure mentionnée auparavant. Ces impacts sont plus clairs pour la gravité 0.014'' par rapport à la gravité 0.007'' ce qui est logique. Par contre ceux de la plus grande gravité (0.021'') le sont moins ce qui paraît à première vue illogique. En effet si le diamètre du défaut augmente trop les impacts résultants immergent les uns dans les autres ce qui apparaît moins clair et donne l'impression d'un défaut de moindre gravité. On remarque aussi le changement d'amplitude par rapport au cas sans défaut, celle-ci est comprise entre -4g et 4g pour la plus grande gravité. Dans ce cas les valeurs du kurtosis sont nettement supérieures à trois.

3.3. Cas d'un défaut sur la bague extérieure

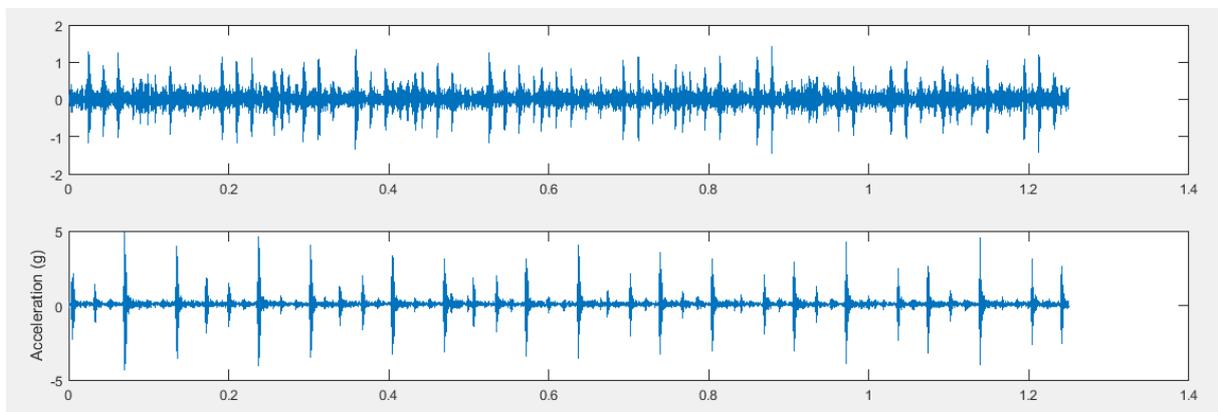


Figure 3.5. Signaux d'un défaut sur la bague extérieure pour deux gravités différentes (0.007 inch, 0.021 inch) de haut en bas

La figure (3.5) représente les signaux d'un roulement avec un défaut sur la bague extérieure pour deux gravités (Diamètre du défaut) (0.007 inch, 0.021 inch) respectivement. Les mêmes remarques faites pour le cas précédent (défaut sur la bague intérieure) sont valables pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure : Impacts périodiques, augmentation de l'amplitude, valeurs du kurtosis supérieures à trois.

3.4. Cas d'un défaut sur la bille

La figure (3.6) représente les signaux d'un roulement avec un défaut sur la bille pour différentes gravités (Diamètre du défaut) (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) respectivement. Le plus important à signaler dans ce cas est que la période des impacts n'est pas évidente comme pour le cas des défauts sur la bague extérieure et intérieure. Ceci est dû au roulement chaotique de la bille qui rend la détection de ce type de défaut difficile.

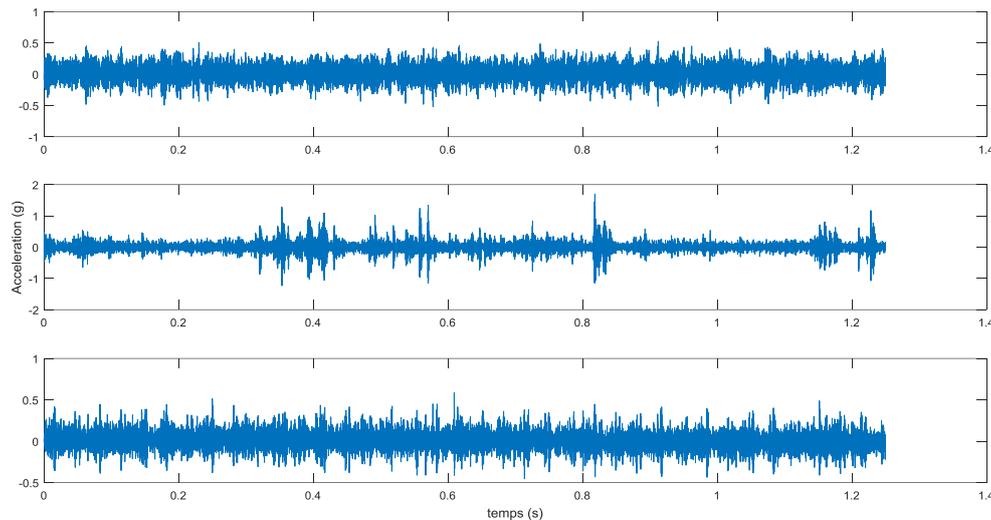


Figure 3.6. Signaux d'un défaut sur la bille pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch) de haut en bas

4. Approche proposée

L'approche que nous proposons dans ce travail est basée sur l'application de l'EMD et de l'EEMD comme outils de traitement et du kurtosis comme outil de sélection. En effet, comme les deux méthodes (EMD et EEMD) permettent de décomposer le signal en plusieurs sous-signaux appelés IMFs, le problème reste à déterminer quelle IMF choisir comme optimale, c'est-à-dire celle qui met en évidence la signature du défaut de roulement mieux que les autres IMFs. Pour ce faire, nous proposons le kurtosis comme critère de sélection, car comme mentionné dans le chapitre 1, le kurtosis est l'indicateur le plus sensible aux chocs périodiques causés par le défaut. Sa valeur est aux alentours de trois en absence d'un défaut de type choc, mais dépasse 3 en présence d'un défaut. Donc la stratégie adoptée consiste à calculer les kurtosis de toutes les IMFs obtenues et de choisir l'IMF ayant le plus grand kurtosis. Par ce fait, nous sommes sûrs que c'est la partie du signal d'où on peut extraire, au mieux, la signature du défaut. La stratégie adoptée est résumée dans l'organigramme de la figure (3.7).

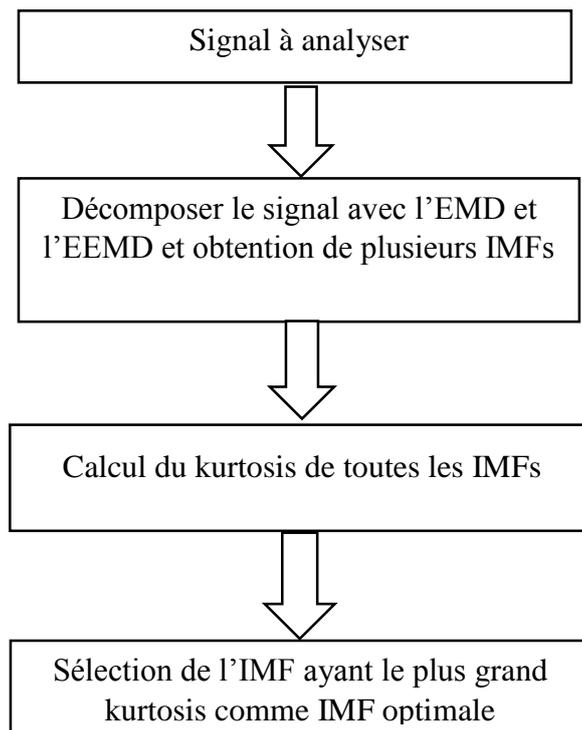


Figure 3.7. Organigramme de l'approche utilisée

4.1. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure

La figure (3.8) représente un signal mesuré dans le cas d'un petit défaut de diamètre 0.007 inch situé sur la bague extérieure et sans application d'aucune charge (0 Hp). Ce signal est décomposé par l'EMD en plusieurs IMFs. La figure (3.9) représente les quatre premières IMFs qui sont les plus significatives, les autres correspondent aux basses fréquences et n'ont aucun intérêt. L'histogramme de la figure (3.10) montre les valeurs du kurtosis des quatre IMFs et montre clairement que l'IMF2 a le plus grand kurtosis (6.94) ce qui est une valeur très significative de la présence d'un défaut. Cette IMF sera considérée donc comme la plus optimale (figure 3.11).

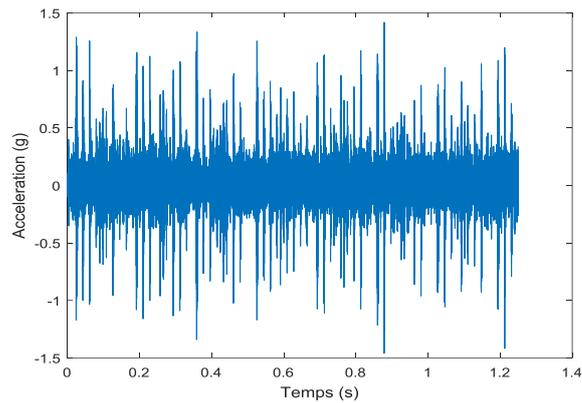


Figure 3.8. Signal mesuré dans le cas d'un petit défaut sur la bague extérieure (0.007 inch, 0 Hp).

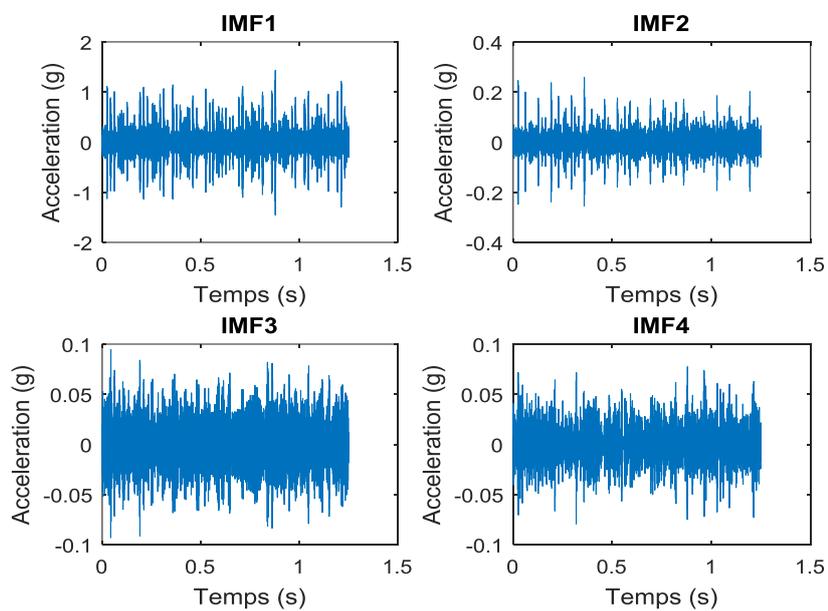


Figure 3.9. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD

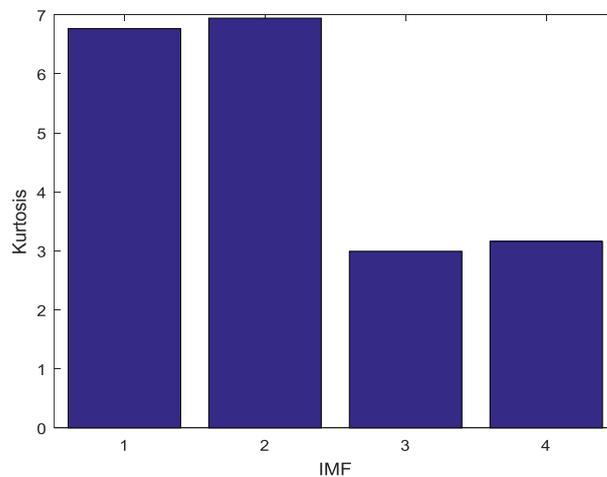


Figure 3.10. Kurtosis des quatre IMFs

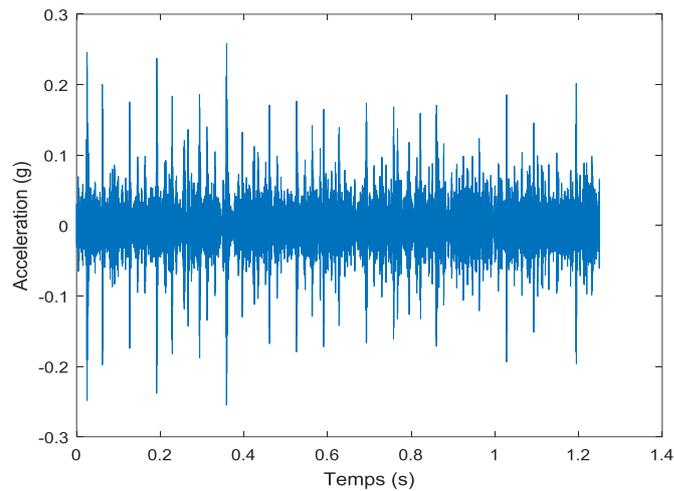


Figure 3.11. IMF optimale (IMF2, kurtosis=6.94)

Le même signal est ensuite décomposé par l'EEMD en plusieurs IMFs, la figure (3.12) montre les quatre premières IMFs. La même approche d'auparavant est appliquée : l'histogramme de la figure (3.13) montre que c'est toujours l'IMF 2 qui enregistre le plus grand kurtosis, c'est donc la plus optimale (figure 3.14). Néanmoins, la valeur du kurtosis dans ce cas est égale à 8.7, plus importante que celle obtenue par l'EMD. Ceci montre que l'EEMD a donné un résultat meilleur que l'EMD.

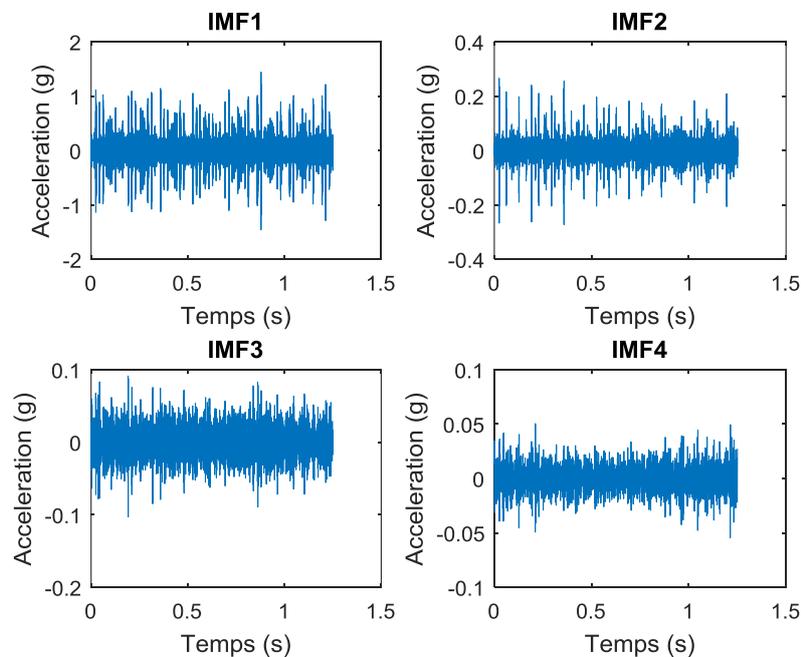


Figure 3.12. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD

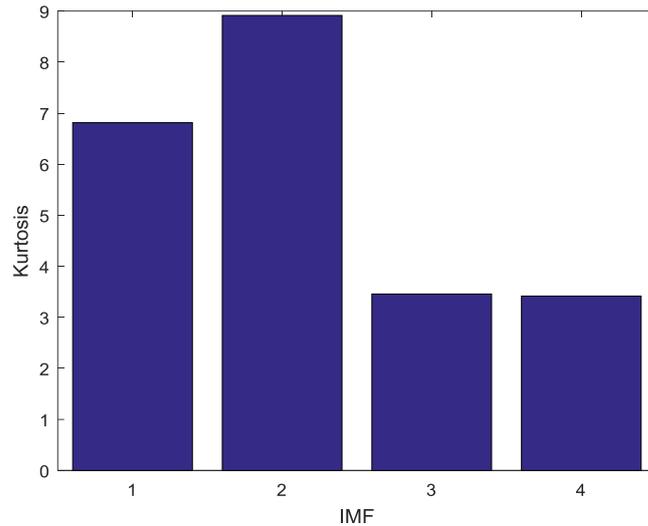


Figure 3.13. Kurtosis des quatre IMFs

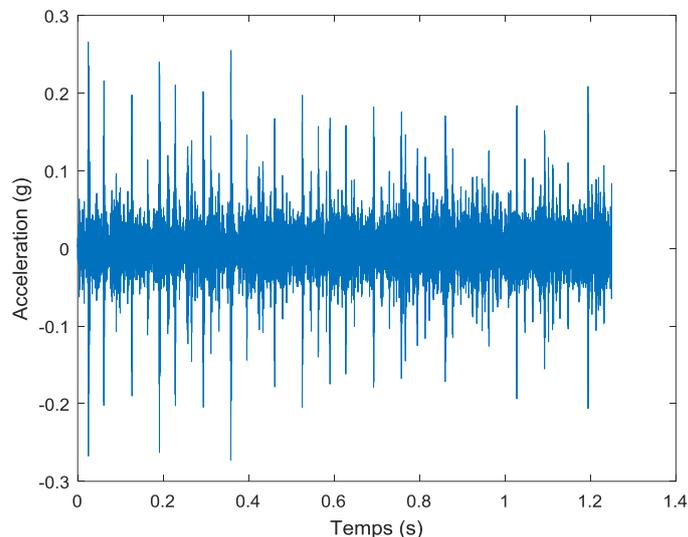


Figure 3.14. IMF optimale (IMF2, kurtosis=8.7)

4.2. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure

Ce cas concerne un petit défaut d'une gravité 0.007'' sur la bague intérieure et sans l'application d'aucune charge (0 Hp). La même approche appliquée pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure est aussi appliquée pour ce cas. Les figures (3.15), (3.16), (3.17) et (3.18) montrent respectivement le signal mesuré, les quatre premières IMFs obtenues par l'EMD, les valeurs du kurtosis des IMFs et enfin l'IMF optimale ayant le plus grand kurtosis. Dans ce cas il s'agit de l'IMF2 avec un kurtosis de 21. La même approche est ensuite appliquée en utilisant l'EEMD. Les figures (3.19), (3.20) et (3.21) montrent les résultats obtenus. Dans ce cas l'IMF optimale est l'IMF1 affichant un kurtosis de 20.97. Dans ce cas l'EMD et l'EEMD ont donné pratiquement le même résultat.

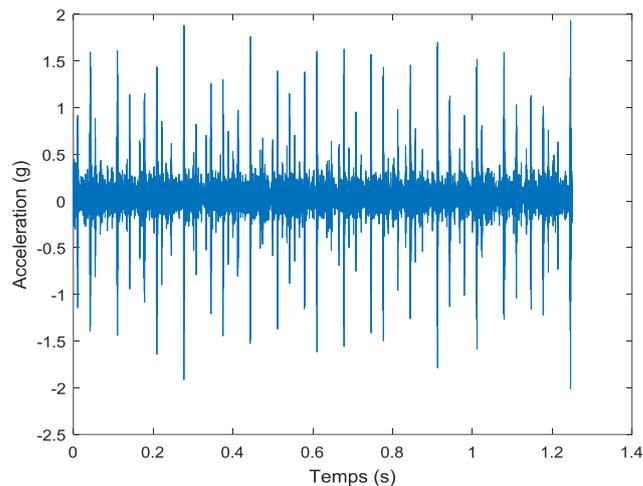


Figure 3.15. Signal mesuré dans le cas d'un petit défaut sur la bague intérieure (0.007 inch, 0 Hp).

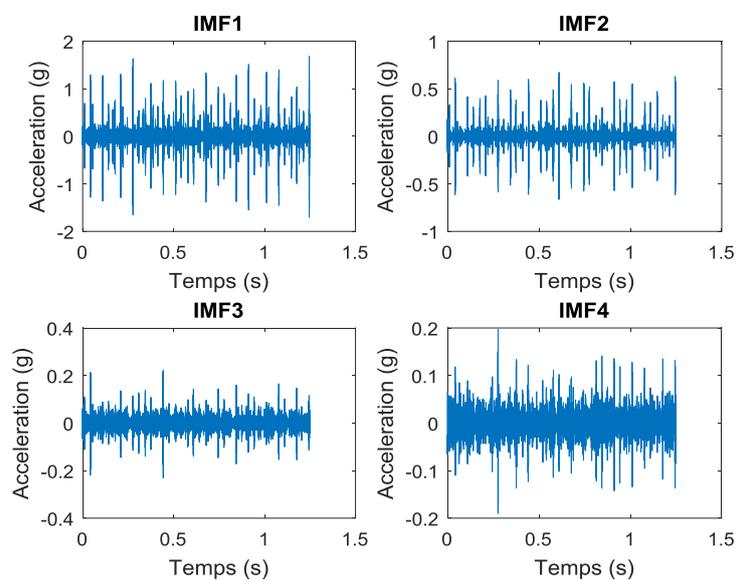


Figure 3.16. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD

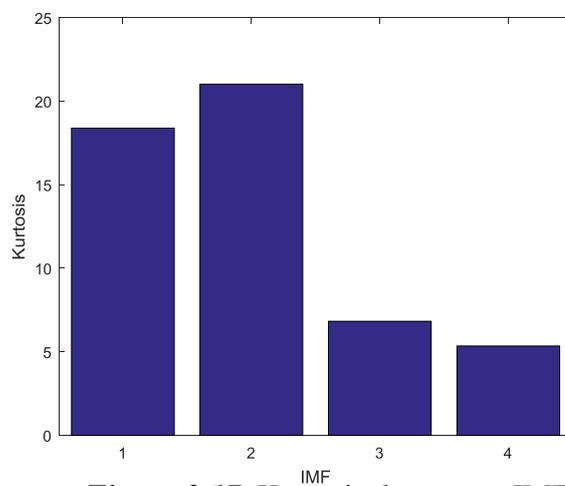


Figure 3.17. Kurtosis des quatre IMFs

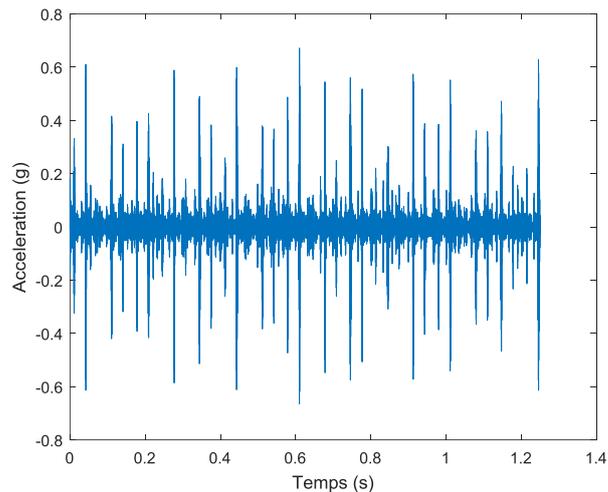


Figure 3.18. IMF optimale (IMF2, kurtosis=21.01)

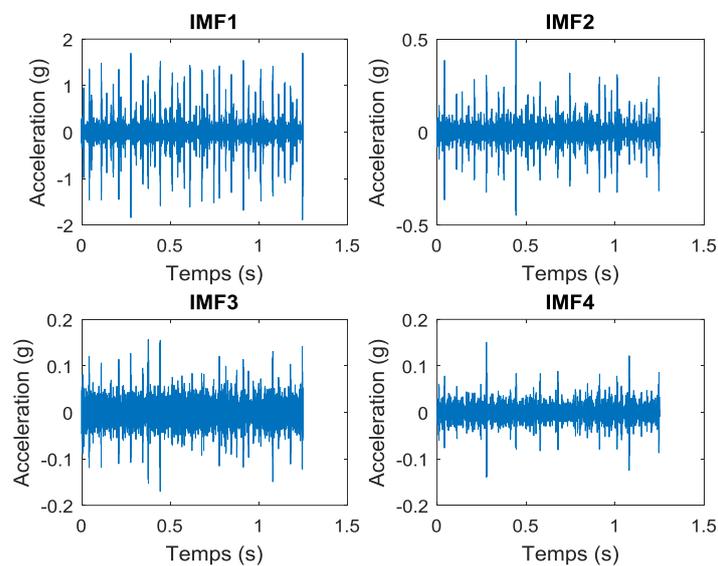


Figure 3.19. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD

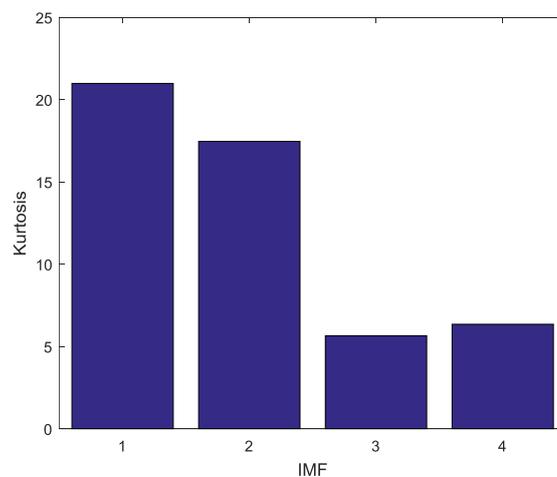


Figure 3.20. Kurtosis des quatre IMFs

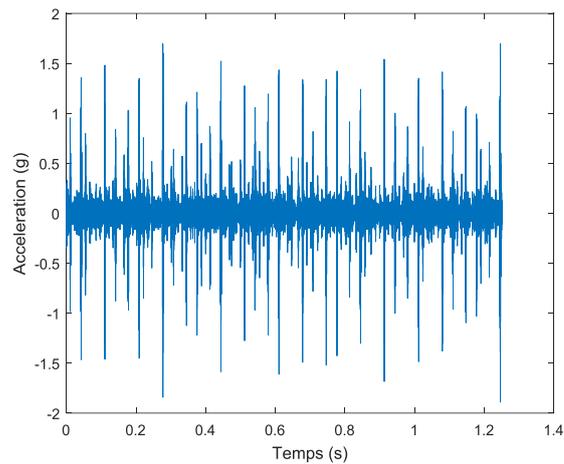


Figure 3.21. IMF optimale (IMF1, kurtosis=20.97)

4.3. Application de l'approche proposée pour le cas d'un défaut sur la bille

La figure (3.22) représente un signal d'un défaut de diamètre 0.014 inch situé sur la bille et avec une charge de 3 Hp. L'EMD et l'EEMD sont alors appliquées selon la même démarche expliquée auparavant. Dans ce cas l'EEMD a donné un kurtosis maximal de 13.05 contre 12.17 pour l'EMD. Là encore l'EEMD a donné un résultat meilleur que l'EMD en terme de clarté du signal de l'IMF optimale. Les figures (3.23 jusqu'à 3.25) montrent les résultats obtenus par l'EMD et les figures (3.26 jusqu'à 3.28) montrent ceux obtenus par l'EEMD.

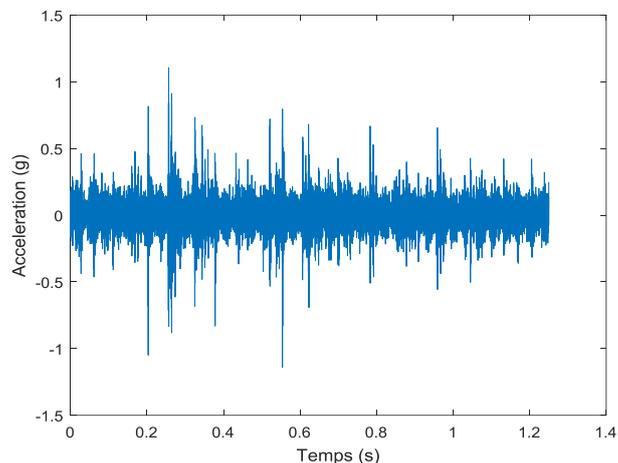


Figure 3.22. Signal mesuré dans le cas d'un défaut moyen sur la bille (0.014 inch, 3 Hp)

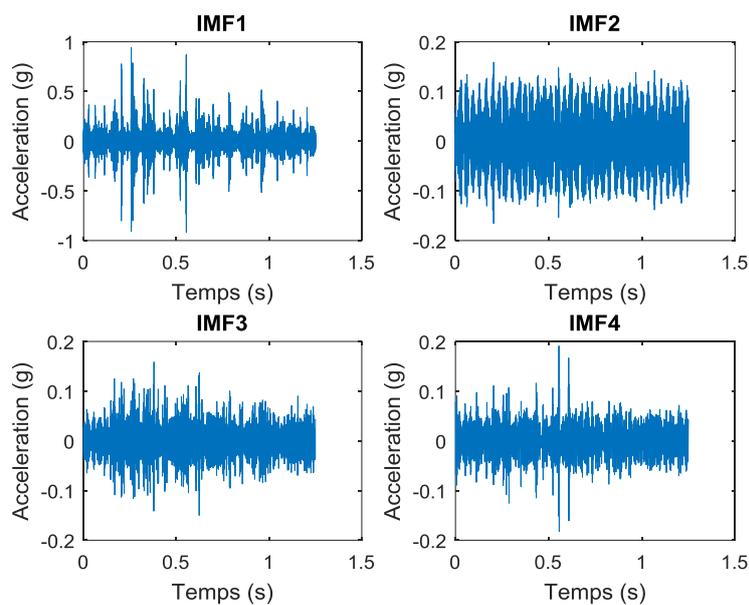


Figure 3.23. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EMD

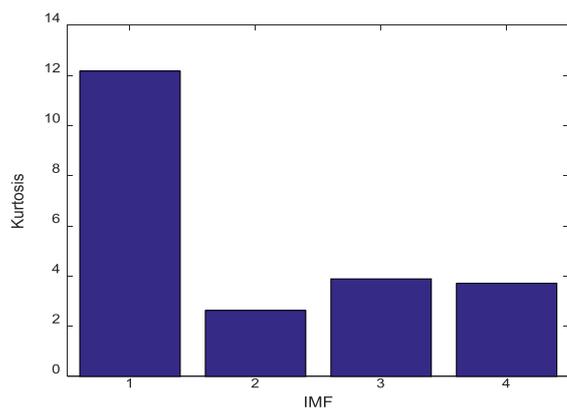


Figure 3.24. Kurtosis des quatre IMFs

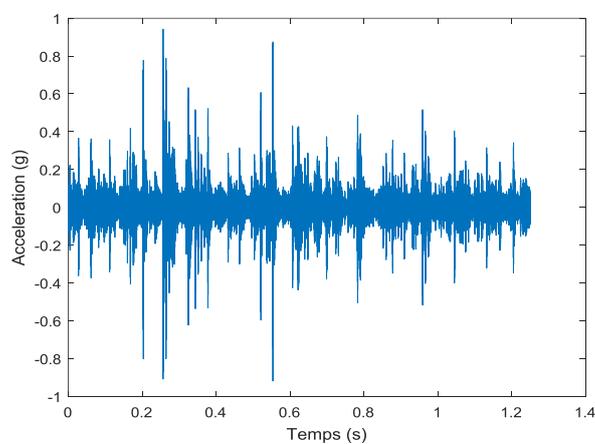


Figure 3.25. IMF optimale (IMF1, kurtosis=12.17)

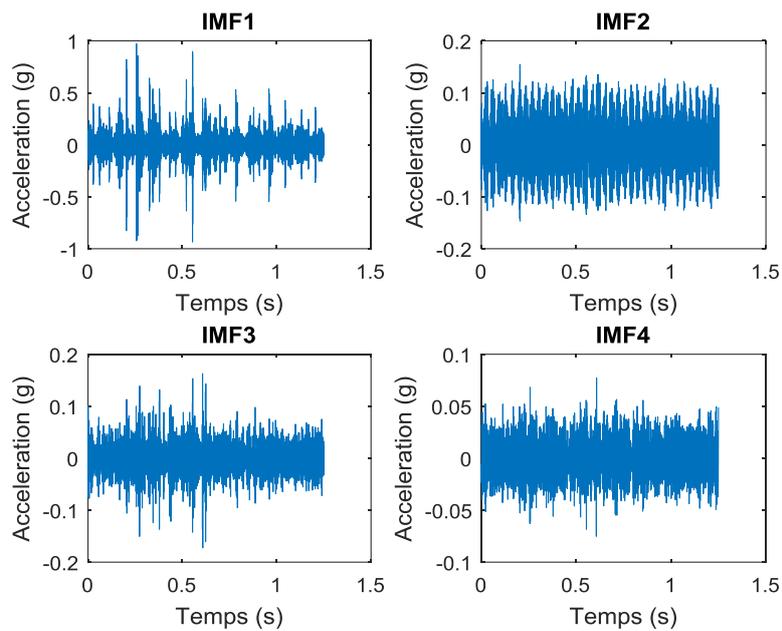


Figure 3.26. Quatre premières IMFs obtenues après l'application de l'EEMD

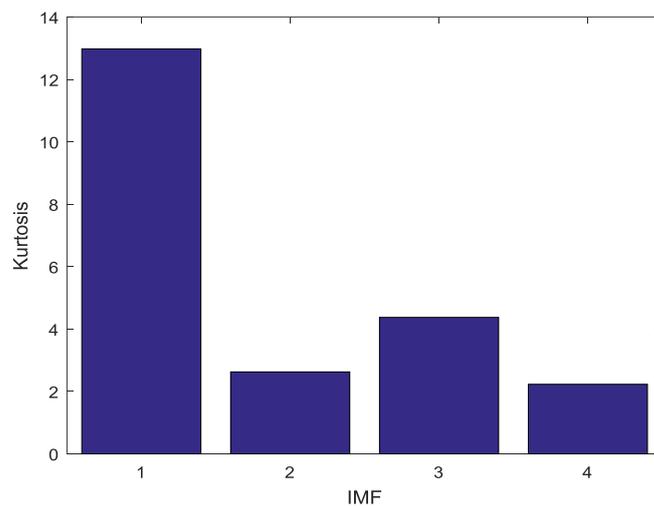


Figure 3.27. Kurtosis des quatre IMFs

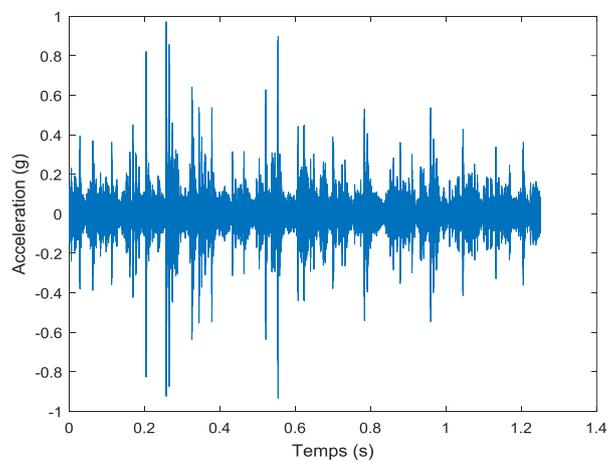


Figure 3.28. IMF optimale (IMF1, kurtosis=13.05)

5. Comparaison entre l'EMD et l'EEMD

5.1. Comparaison en fonction de la charge du roulement

Les figures (3.29), (3.30) et (3.31) montrent respectivement l'influence du couple résistant (la charge) sur la sensibilité du kurtosis de l'IMF optimale obtenue par les deux méthodes EMD et EEMD pour les trois types de défaut ; la bague intérieure, la bague extérieure, la bille. On constate que, quel que soit le type de défaut, le kurtosis du résultat obtenu par l'EEMD est ;h, beaucoup plus significatif que celui obtenu par l'EMD notamment pour des charges élevées.

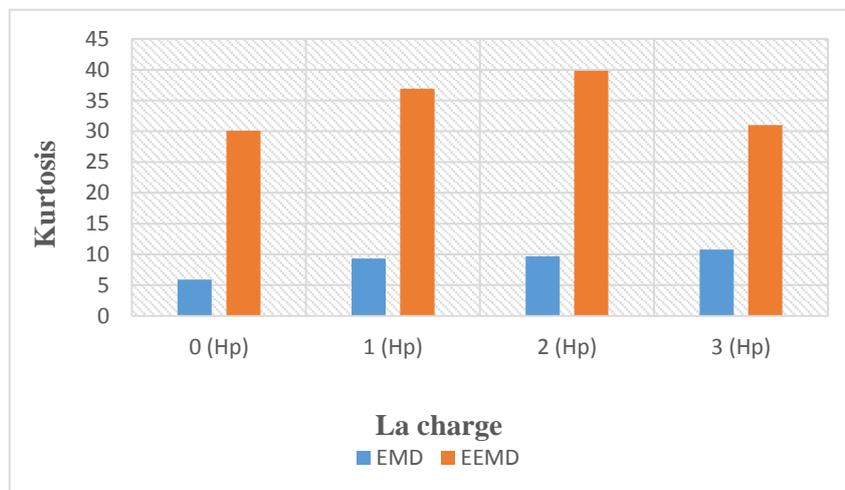


Figure 3.29. Influence de la charge pour un défaut sur la bague intérieure

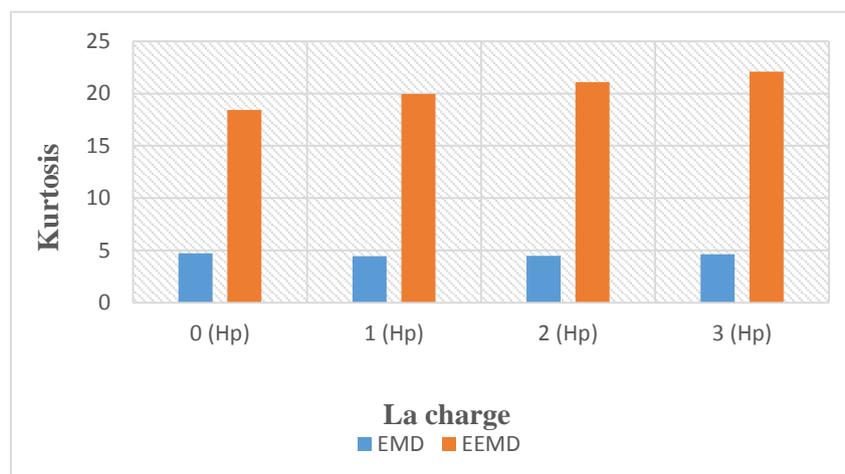


Figure 3.30. Influence de la charge pour un défaut sur la bague extérieure

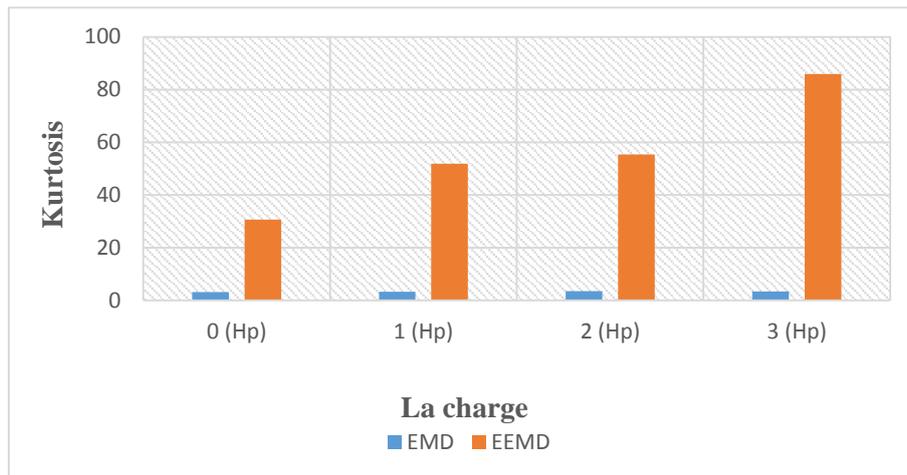


Figure 3.31. Influence de la charge pour un défaut sur la bille

5.2. Comparaison en fonction la taille de défaut

Les figures (3.32), (3.33) et (3.34) montrent respectivement l'influence de la taille de défaut sur la sensibilité du kurtosis des deux méthodes. On constate que le kurtosis obtenu par l'EEMD est très supérieur à celui obtenu par l'EMD, peu importe la taille du défaut, ce qui confirme encore une fois la supériorité de l'EEMD. Notons également qu'au-delà d'une certaine taille du défaut, le kurtosis diminue au lieu d'augmenter. Cette tendance a été largement validée est discutée dans la littérature.

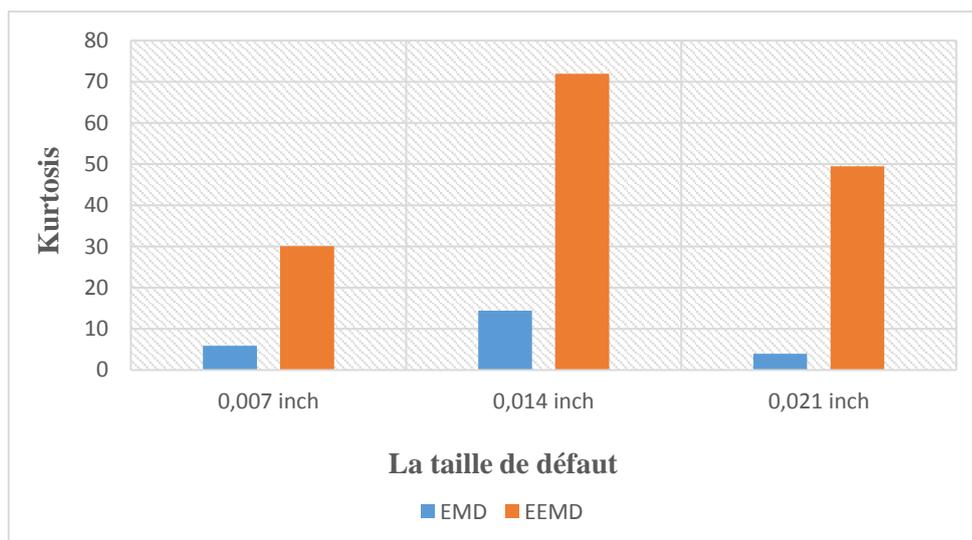


Figure 3.32. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure

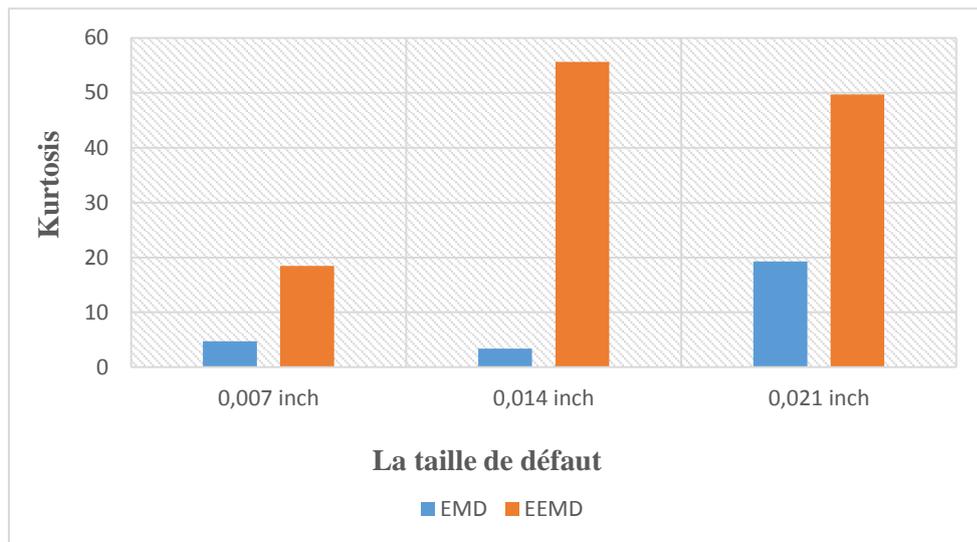


Figure 3.33. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bague extérieure

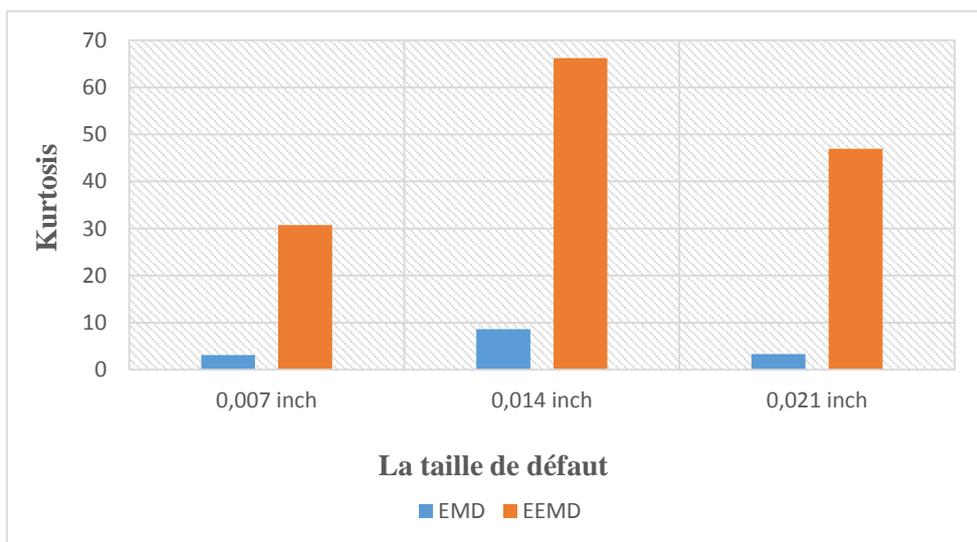


Figure 3.34. Influence de la taille de défaut pour un défaut sur la bille

6. Conclusion du chapitre

Ce chapitre concerne l'application de l'EMD et de l'EEMD pour la détection des défauts de roulements en domaine temporel. Une démarche basée sur ces deux méthodes ainsi que sur le kurtosis en tant que critère de sélection de l'IMF optimale a été proposée et appliquée. Trois types de défauts ont été considérés ; sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille. Les résultats montrent d'une part que les deux méthodes permettent d'avoir une IMF optimale où les impacts du défauts sont très clairs. D'une autre part les résultats obtenus par l'EEMD sont nettement plus significatifs que ceux obtenus par l'EMD. Une comparaison entre les deux méthodes faite en fonction de la taille du défaut et de la charge du roulement confirme parfaitement ce résultat.

CHAPITRE IV :

**APPLICATION DE L'EMD ET L'EEMD
POUR LA DETECTION DES DEFAUTS
DE ROULEMENTS : ETUDE
COMPARATIVE DANS LE DOMAINE
FREQUENTIEL**

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application de l'EMD (Empirical Mode Decomposition) et l'EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) sur des signaux réels obtenus, à partir de la base de données Américaine « Bearing data center », dans le domaine fréquentiel, afin de voir la capacité de ces méthodes de détecter la présence de défauts sur les roulements.

2. Application de l'EMD et de l'EEMD dans le domaine fréquentiel

2.1. Cas d'un défaut sur la bague extérieure

On considère un petit défaut de diamètre 0.007 inch situé sur la bague extérieure avec l'application d'une charge de 3 Hp. Dans ce cas et conformément au tableau (3.1), la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague extérieure correspondant à une charge de 3 Hp est égale à 103.32 Hz. La figure (4.1) représente le signal vibratoire mesuré et son spectre. On remarque que le spectre correspondant ne donne aucune information sur la fréquence caractéristique du défaut sur la bague extérieure. Plusieurs modulations sont visibles et qui sont dues aux fréquences de résonance du système.

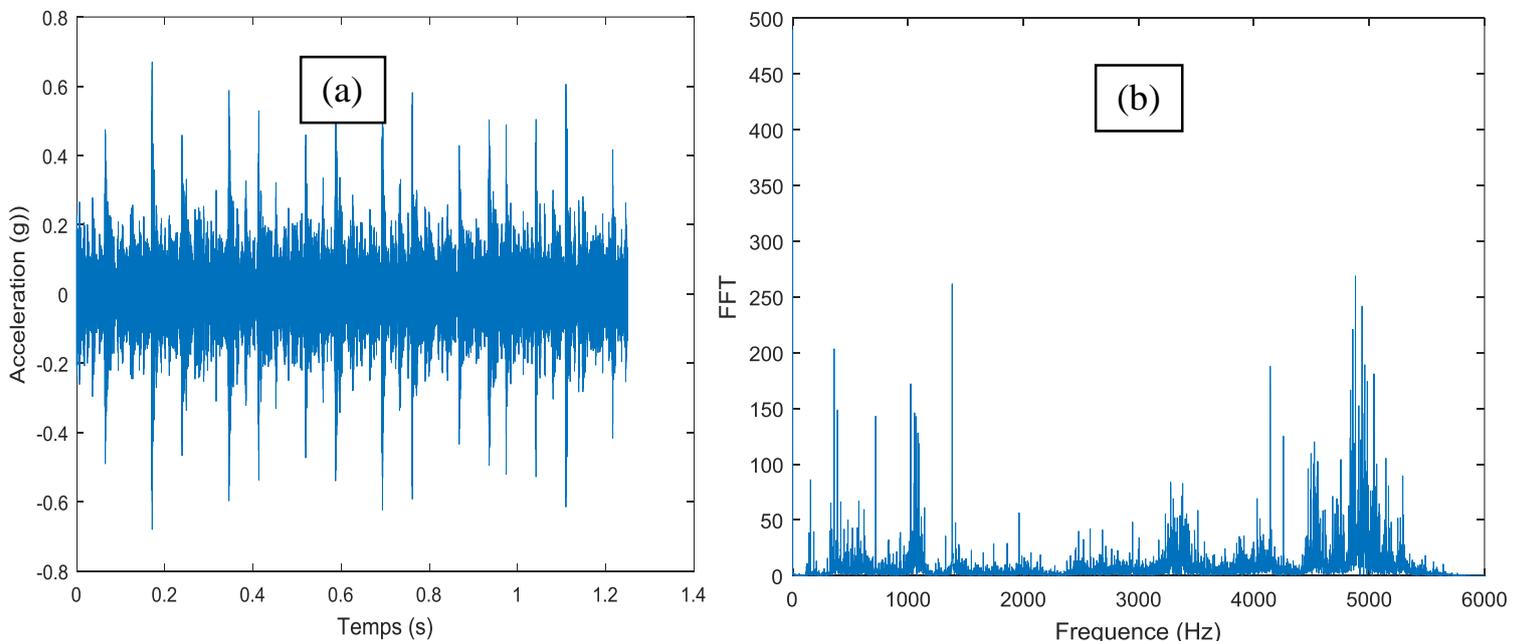


Figure 4.1. (a) : Signal mesuré, (b) : Son spectre

Le signal est ensuite décomposé en plusieurs IMFs par l'EMD et l'EEMD, la figure (4.2) représente l'IMF1 ayant le plus grand kurtosis obtenue par l'EMD est son spectre d'enveloppe.

Chapitre IV : Etude comparative dans le domaine fréquentiel

La figure (4.3) représente l'IMF1 obtenu par l'EEMD et son spectre d'enveloppe.

On constate que l'EEMD a donné une IMF ayant un kurtosis plus grand que celui de l'IMF obtenue par l'EMD, chose confirmée dans le chapitre 3. Le plus important est que les deux spectres d'enveloppe ont clairement mis en évidence la fréquence caractéristique du défaut (103.2 Hz contre 103.3 Hz pour la fréquence théorique) et ses harmoniques. La fréquence de rotation ainsi que plusieurs de ses harmoniques sont également visibles. La chose la plus importante est le fait que dans le domaine fréquentiel les deux méthodes ont pratiquement donné le même résultat, du moins pour l'exemple traité.

Notons que nous avons utilisé le spectre d'enveloppe au lieu d'un simple spectre, car les IMFs sont considérées comme des signaux filtrés et donc un spectre normal ne donne aucune information dans ce cas. Nous étions donc obligé d'avoir recourt à la démodulation par la transformée de Hilbert, calculer une enveloppe et enfin calculer un spectre d'enveloppe, appelée méthode d'enveloppe.

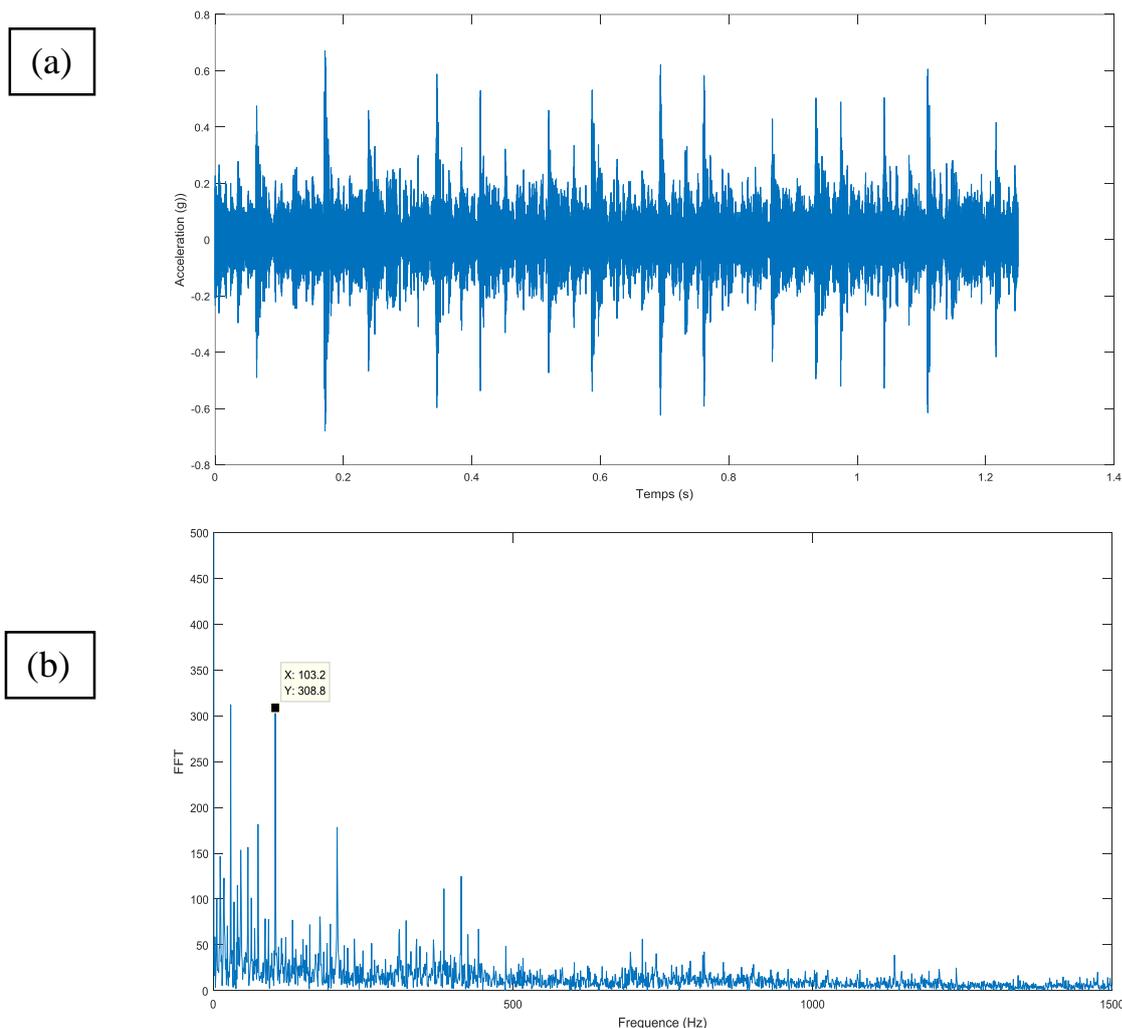


Figure 4.2. (a) : IMF 1 obtenue par l'EMD (K=4.88), (b) : Son spectre d'enveloppe

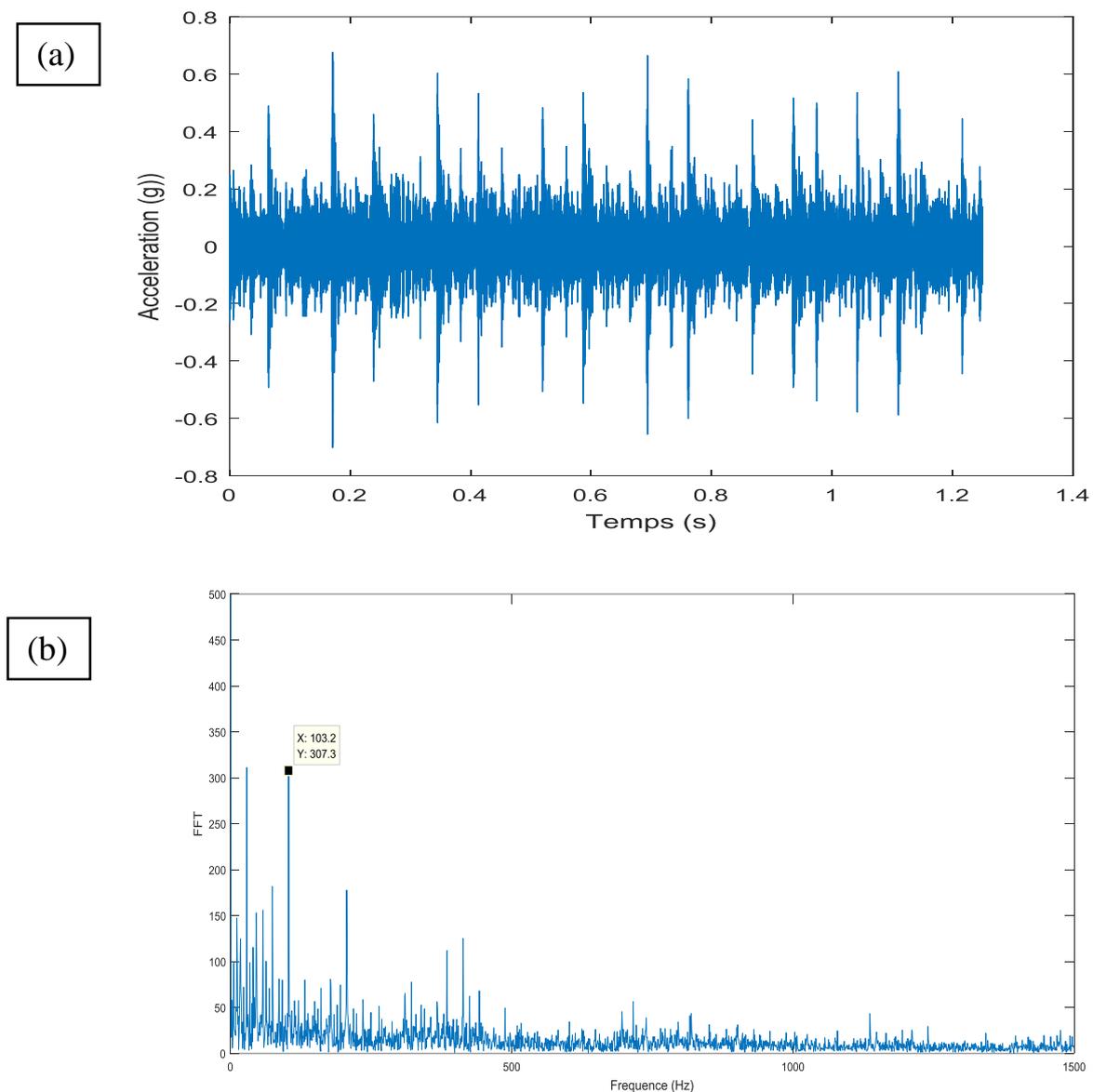


Figure 4.3. (a) : IMF 1 obtenue par l'EEMD (K=5.05), (b) : Son spectre d'enveloppe

2.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieure

On considère un petit défaut de diamètre 0.007 inch situé sur la bague intérieure et sans l'application d'aucune charge (0 Hp). Dans ce cas et toujours conformément au tableau (3.1), la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague intérieure correspondant à une charge de 0 Hp est égale à 162.18 Hz. La figure (4.4) représente le signal vibratoire mesuré et son spectre. Comme pour le cas précédent, on remarque que le spectre correspondant ne donne aucune information sur la fréquence caractéristique du défaut sur la bague extérieure. Plusieurs modulations sont visibles et qui sont dues aux fréquences de résonance du système.

Chapitre IV : Etude comparative dans le domaine fréquentiel

Les mêmes remarques faites pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure sont valables pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure. L'EEMD donne un kurtosis plus grand que l'EMD, et le résultat fréquentiel reste pratiquement le même du fait que les spectres d'enveloppe obtenus par les deux méthodes sont identiques. La fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague intérieure est clairement mise en évidence par les deux spectres avec un petit décalage ce qui est parfaitement normale (161.6 Hz contre 162.18 Hz pour la fréquence théorique) (figures 4.5 et 4.6).

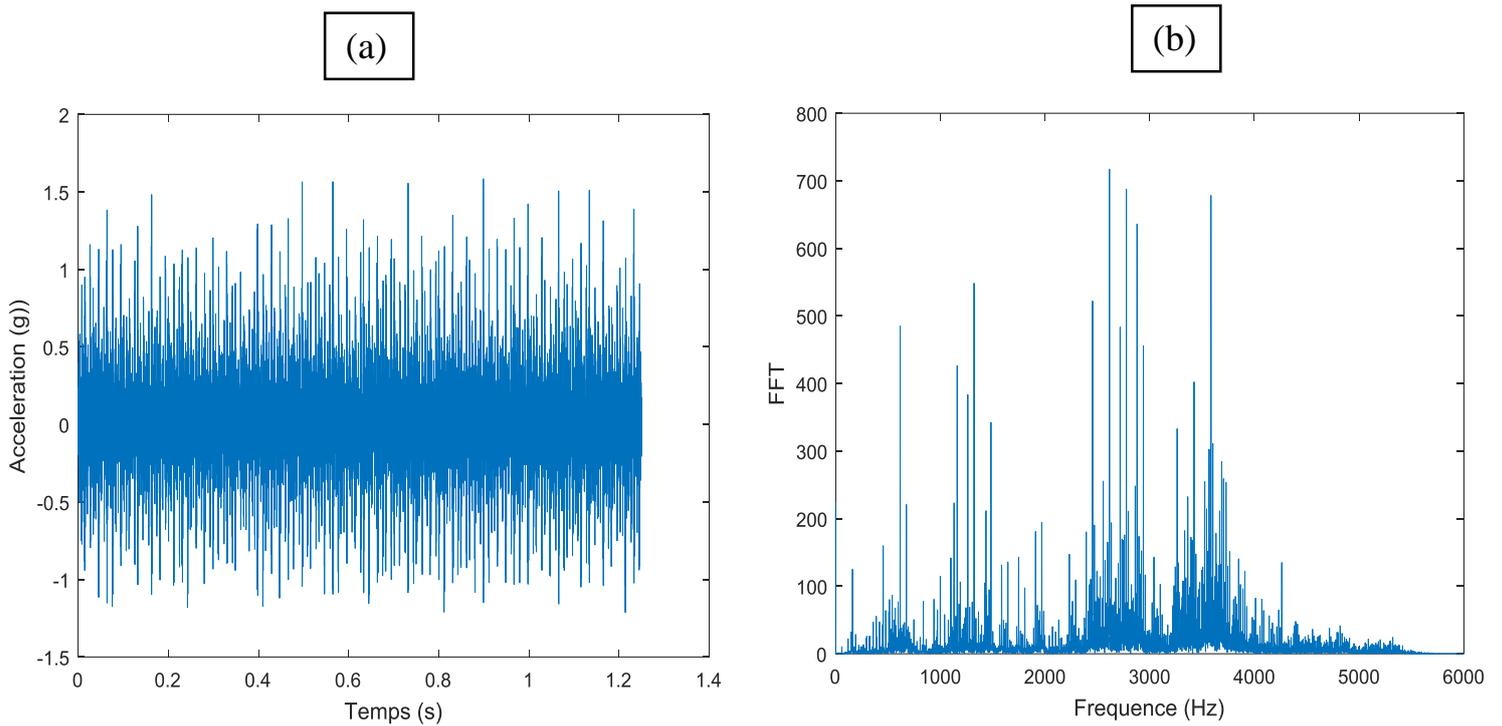
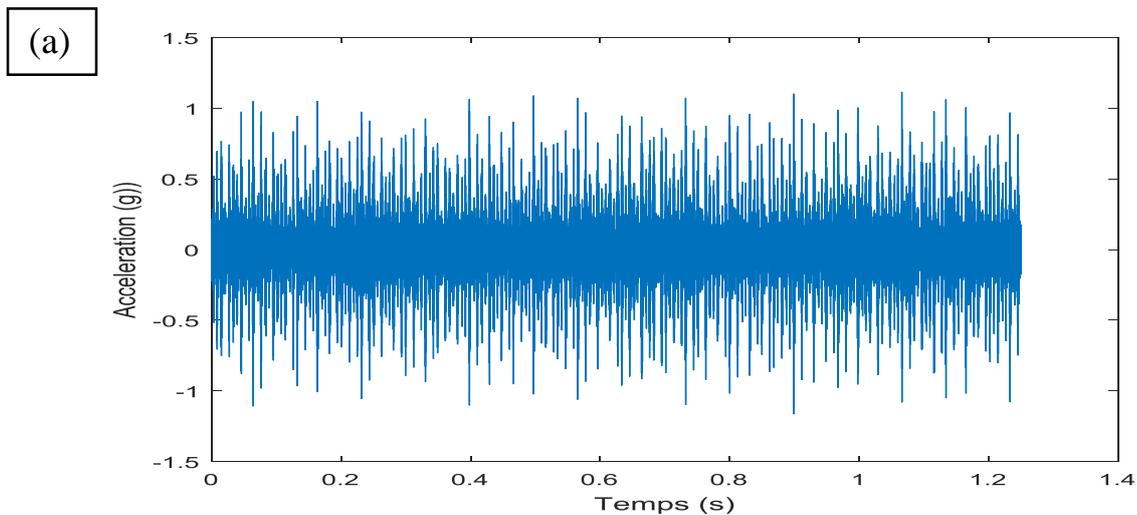


Figure 4.4. (a) : Signal mesuré, (b) : Son spectre



(b)

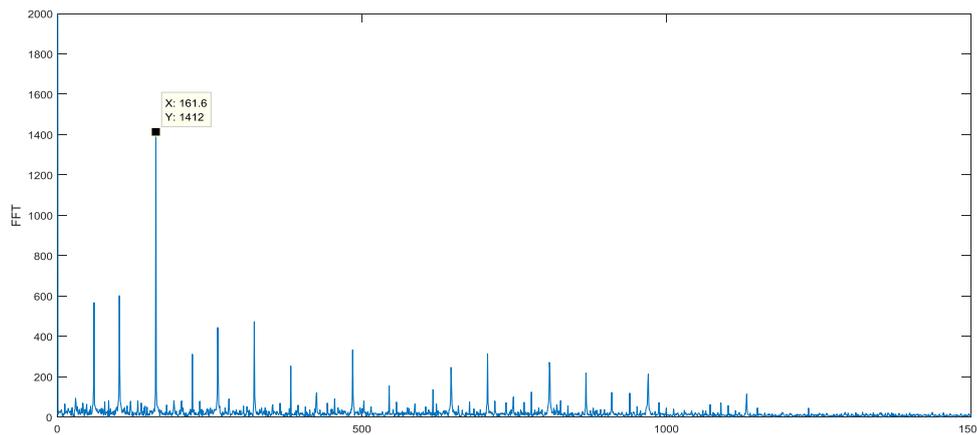
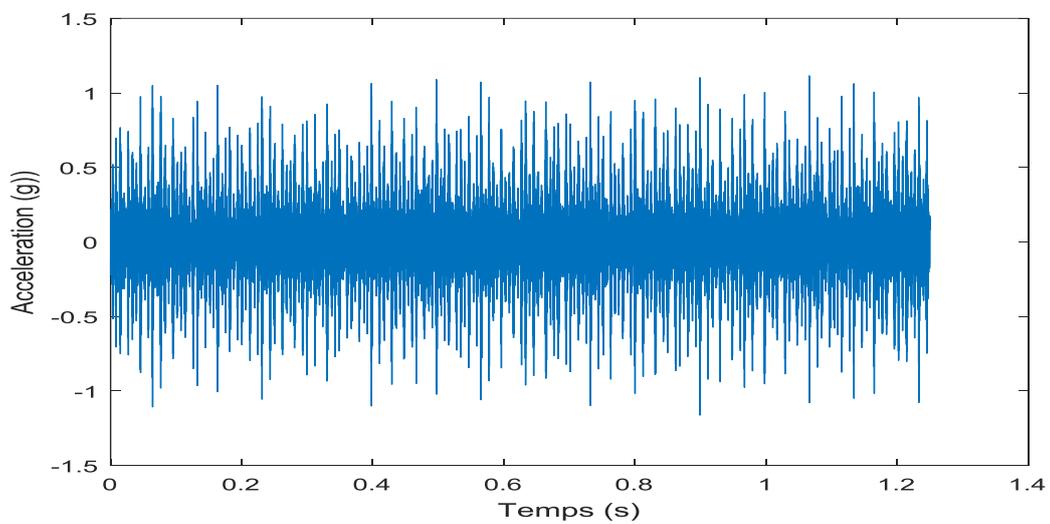


Figure 4.5. (a) : IMF 1 obtenue par l'EMD ($K=4.66$), (b) : Son spectre d'enveloppe

(a)



(b)

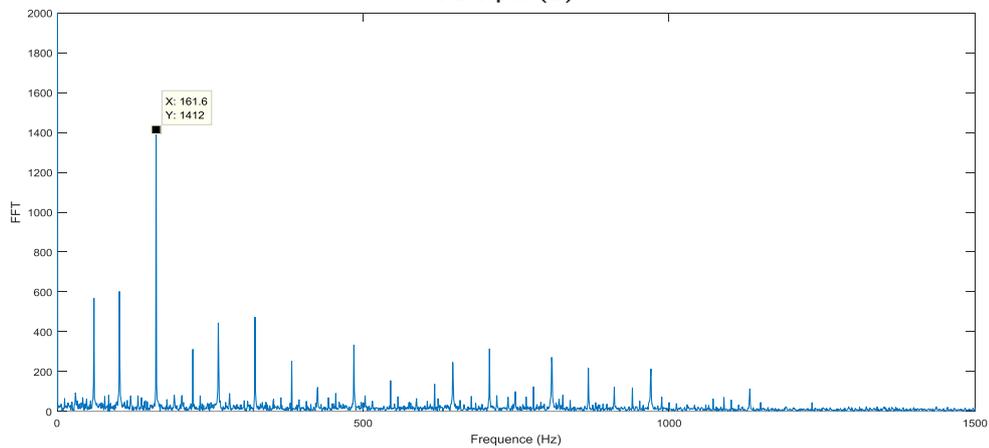


Figure 4.6. (a) : IMF 1 obtenue par l'EEMD ($K=5.03$), (b) : Son spectre d'enveloppe

3. Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'entamer une comparaison entre l'EMD et l'EEMD dans le domaine fréquentiel. Le but est de pouvoir vérifier la capacité des deux méthodes à détecter le défaut, donc de mettre en évidence la fréquence caractéristique du défaut, et de voir laquelle des deux méthodes permet un résultat fréquentiel plus clair que l'autre.

Les résultats obtenus ont montré que les deux méthodes ont parfaitement pu extraire la fréquence d'un défaut sur la bague extérieure et intérieure avec une très bonne résolution, chose que le spectre normal n'a pu faire à partir du signal brut mesuré. Néanmoins, nous n'avons pas pu différencier entre les deux méthodes dans le domaine fréquentiel, comme nous l'avons fait dans le domaine temporel, du fait que les spectres d'enveloppe obtenus par les deux méthodes sont exactement identiques.

Notons enfin que nous n'avons pas traité le cas d'un défaut sur la bille, car les cas que nous avons traités n'ont pas donné un résultat fréquentiel satisfaisant. Ceci a été soulevé par plusieurs chercheurs dans la littérature indiquant la difficulté de mettre en évidence la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bille (ou l'élément roulant en général).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés au diagnostic des défauts liés aux roulements par utilisation de l'analyse vibratoire. Le roulement est l'un des éléments essentiels dans presque chaque machine tournante. Le roulement, dont on ne peut jamais négliger l'importance, est l'élément le plus susceptible de tomber en panne dans une machine tournante, ce qui oblige une détection et un diagnostic précoce de ces pannes.

L'objectif de notre travail est d'utiliser une démarche expérimentale pour analyser les signaux mesurés par des méthodes temps-fréquence. Cette étude nous a permis de comparer deux méthodes récentes de traitement de signal ; l'Empirical Mode Decomposition (EMD) et l'Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD).

L'EMD et L'EEMD ont alors été appliquées sur des signaux réels de roulements défectueux obtenus à partir de la base des données Américaine « Bearing Data Center » dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. En temporel le gain apporté par les méthodes proposé et quantifié par le kurtosis, tandis qu'en domaine fréquentiel la fréquence caractéristique du défaut est mise en évidence par le spectre d'enveloppe.

De l'application de ces méthodes, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le kurtosis est un indicateur très efficace pour choisir l'IMF optimale de l'une et l'autre des deux méthodes. Son utilisation comme critère d'évaluation et de comparaison entre les deux méthodes nous semble très correcte.
- Ce travail a montré que le problème majeur de la méthode EMD est le mode mixing, la méthode EEMD contribue efficacement à résoudre ce problème et permet une analyse plus fine des signaux.
- Bien que la méthode EEMD est en voie de développement, elle a donné des résultats meilleurs que ceux de l'EMD. Cette différence est parfois écrasante dans certains cas, notamment pour les signaux mesurés en domaine temporel.
- Bien que l'EEMD ait donné de résultats meilleurs que l'EMD dans le domaine temporel, nous n'avons pas pu déceler une différence claire dans le domaine fréquentiel. Les spectres d'enveloppe obtenus à partir de l'une ou l'autre des méthodes sont pratiquement identiques. Bien évidemment cette conclusion ne peut être certifiée qu'après traitement d'un nombre considérable de signaux dans différentes configurations.

Annexes

Annexe I

Annexe 1 : Valeurs du kurtosis calculées par l'EMD et l'EEMD pour Fe=12000 Hz

Tab 3.1 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure : coté accouplement – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
105.mat	DE	4.66	4.17	3.77	2.92	3.09
	FE	3.70	2.88	2.97	2.72	2.80
106.mat	DE	4.61	4.09	3.74	2.73	2.92
	FE	3.09	3.28	2.94	2.62	2.52
107.mat	DE	4.97	4.14	3.83	2.98	2.87
	FE	2.63	3.64	2.98	2.64	2.79
108.mat	DE	4.53	3.59	3.87	2.69	3.22
	FE	2.67	3.28	3.04	2.68	2.76
169.mat	DE	18.38	21.01	6.82	5.34	3.94
	FE	2.64	5.76	4.51	3.74	2.95
170.mat	DE	15.57	24.26	6.76	5.32	3.37
	FE	2.92	4.45	2.92	2.97	3.08
171.mat	DE	13.73	20.76	5.93	3.64	3.02
	FE	3.61	4.48	3.33	3.51	4.00
172.mat	DE	13.91	6.46	4.97	4.72	3.84
	FE	3.91	5.43	3.43	3.69	2.83
209.mat	DE	7.07	4.93	3.54	5.29	4.36
	FE	2.79	3.84	3.56	2.55	3.20
210.mat	DE	7.50	4.95	4.76	3.97	3.08
	FE	2.94	3.45	3.83	3.26	2.92
211.mat	DE	7.94	4.49	4.11	4.27	4.07
	FE	3.18	3.50	3.97	3.07	2.93
212.mat	DE	8.31	3.52	3.42	4.49	3.15
	FE	3.18	3.43	3.04	3.37	3.10
3001.mat	DE	3.07	3.16	2.77	4.69	3.04
	FE					
3002.mat	DE	2.92	2.98	2.61	4.10	2.99
	FE					
3003.mat	DE	3.01	2.82	2.52	4.21	3.16
	FE					
3004.mat	DE	2.83	2.95	2.44	4.41	3.39
	FE					

Tab 3.2 : Roulement avec défaut sur la bille : coté accouplement – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
118.mat	DE	2.76	2.46	3.046	3.04	2.60
	FE	1.89	2.75	3.72	3.25	2.70
119.mat	DE	2.83	3.12	2.90	2.76	2.73
	FE	2.02	3.74	2.72	2.94	2.99
120.mat	DE	2.46	2.81	2.83	2.815	2.78
	FE	2.04	3.07	3.29	2.83	2.88
121.mat	DE	2.61	2.59	2.72	2.56	2.62
	FE	2.26	2.33	3.44	2.81	2.83
185.mat	DE	11.49	4.12	3.73	6.10	3.44
	FE	2.76	4.61	4.77	3.43	3.83
186.mat	DE	10.06	4.32	3.47	2.43	3.23
	FE	2.39	3.24	3.03	3.28	2.58
187.mat	DE	7.20	3.51	4.65	2.90	3.06
	FE	2.43	2.62	3.96	2.81	3.08
188.mat	DE	12.17	2.62	3.89	3.70	3.58
	FE	4.87	2.46	9.21	3.15	3.21
222.mat	DE	3.32	2.63	3.10	2.86	2.86
	FE	1.85	5.18	2.74	2.80	2.85
223.mat	DE	9.36	6.05	3.55	3.07	2.85
	FE	3.49	4.36	3.06	2.69	2.691
224.mat	DE	3.02	2.69	2.83	2.69	2.54
	FE	2.06	4.55	3.35	2.73	2.67
225.mat	DE	2.92	2.28	2.71	2.90	2.87
	FE	2.06	4.30	3.48	2.81	2.83
3005.mat	DE	2.14	3.47	3.54	4.64	4.14
	FE					
3006.mat	DE	3.859	3.39	3.851	3.71	3.61
	FE					
3007.mat	DE	3.571	3.579	3.42	3.83	3.52
	FE					
3008.mat	DE	3.82	3.81	4.02	3.88	4.18
	FE					

Tab 3.3 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure : coté accouplement – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
156.mat	DE	6.76	6.94	2.99	3.16	3.11
	FE	4.33	5.62	2.81	2.88	2.86
158.mat	DE	6.13	6.55	3.16	3.82	2.83
	FE	3.88	5.75	3.21	3.13	3.001
159.mat	DE	8.27	6.45	4.80	3.28	3.37
	FE	5.53	4.79	3.11	3.13	2.64
160.mat	DE	7.49	4.12	3.23	3.12	3.01
	FE	4.88	4.27	3.04	2.96	2.71
258.mat	DE	29.95	25.76	16.82	8.05	13.84
	FE	7.43	5.72	5.40	5.21	3.76
259.mat	DE	28.73	25.57	16.34	8.96	7.29
	FE	9.28	6.20	4.35	4.08	3.03
260.mat	DE	31.09	31.15	14.51	13.44	11.22
	FE	9.14	5.48	4.85	6.43	3.12
261.mat	DE	30.14	17.95	10.56	8.31	8.55
	FE	7.85	3.37	4.07	4.30	3.33

Tab 3.4 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure : coté ventilateur – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
270.mat	DE	4.49	5.85	3.95	3.34	3.17
	FE	6.64	5.12	3.71	3.38	3.44
271.mat	DE	3.69	5.95	3.79	3.15	3.41
	FE	5.63	5.60	3.84	3.41	3.24
272.mat	DE	3.35	4.45	3.88	3.95	2.60
	FE	5.07	5.55	4.55	3.47	3.45
273.mat	DE	3.44	3.62	3.86	3.61	3.96
	FE	5.26	5.11	3.35	3.19	3.20
274.mat	DE	3.73	3.33	3.87	3.18	3.11
	FE	5.13	3.80	3.55	3.88	3.54
275.mat	DE	4.23	3.97	2.87	3.46	2.94
	FE	5.25	4.54	4.58	4.51	3.36
276.mat	DE	5.03	3.73	2.89	4.49	3.16
	FE	4.69	4.84	4.30	4.88	3.24
277.mat	DE	6.93	3.26	2.86	2.93	3.11
	FE	4.74	5.00	4.62	4.37	3.08
278.mat	DE	3.44	3.25	3.74	3.13	3.06
	FE	5.73	7.48	6.07	9.83	3.55
279.mat	DE	3.43	4.57	4.52	3.37	2.91
	FE	5.04	5.96	7.89	6.17	4.37
280.mat	DE	3.42	4.26	3.59	3.26	2.55
	FE	4.92	5.77	4.86	4.12	4.20
281.mat	DE	3.56	4.02	3.74	2.96	3.10
	FE	5.01	4.22	3.87	3.62	3.52

Tab 3.5 : Roulement avec défaut sur la bille : coté ventilateur – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
282.mat	DE	3.94	2.83	3.72	3.17	2.72
	FE	12.14	6.68	4.25	3.51	3.03
283.mat	DE	2.89	2.90	3.82	3.17	3.29
	FE	5.15	4.01	2.66	2.88	2.94
284.mat	DE	2.60	2.77	3.43	3.20	2.94
	FE	2.42	3.67	3.08	3.02	2.56
285.mat	DE	3.04	3.69	3.23	3.59	3.09
	FE	5.21	3.73	3.15	2.84	2.59
286.mat	DE	10.91	3.46	4.36	3.46	3.41
	FE	8.15	10.15	4.61	4.05	3.96
287.mat	DE	11.04	5.02	3.77	3.06	4.01
	FE	11.13	23.39	5.02	7.47	3.53
288.mat	DE	9.15	3.99	3.14	2.95	3.62
	FE	7.58	8.39	6.54	3.48	3.56
289.mat	DE	7.45	3.32	3.05	2.92	3.14
	FE	7.00	9.14	5.07	3.86	3.54
290.mat	DE	3.39	2.89	3.07	2.53	3.21
	FE	12.02	4.30	3.35	3.01	2.81
291.mat	DE	3.29	3.52	3.61	2.48	2.75
	FE	2.74	3.57	2.94	2.84	2.77
292.mat	DE	3.90	3.29	4.39	2.82	3.70
	FE	9.73	5.17	4.27	3.07	2.95
293.mat	DE	3.30	2.72	3.49	2.53	2.66
	FE	3.34	3.29	2.64	2.65	2.77

Tab 3.6 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure : coté ventilateur – EMD

Signal		IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
302.mat	DE	3.26	2.69	3.03	3.34	2.86
	FE	2.42	2.73	4.97	3.32	3.03
305.mat	DE	3.05	2.96	2.89	3.27	3.09
	FE	2.85	4.73	8.85	3.75	3.39
306.mat	DE	2.84	2.92	2.83	3.71	2.85
	FE	2.50	5.62	5.13	3.57	3.40
307.mat	DE	3.02	2.99	3.00	3.13	2.74
	FE	2.80	3.53	4.81	2.86	2.93

Tab 3.7 : roulement sans défaut – EMD

Signal	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5	
97.mat	DE	3.54	3.08	4.27	3.43	2.96
	FE	5.79	2.63	5.32	3.96	2.91
98.mat	DE	3.40	2.87	3.35	3.59	2.72
	FE	3.89	2.68	4.44	2.93	2.43
99.mat	DE	2.712	2.713	3.02	3.01	2.62
	FE	3.19	2.74	4.43	2.88	2.60
100.mat	DE	1.94	2.56	3.72	3.01	3.12
	FE	2.60	2.78	6.00	2.84	3.03

Tab 3.8 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure : coté accouplement – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
105.mat	DE	5.03	5.02	3.13	4.16	2.80
	FE	4.01	2.801	2.805	3.11	3.04
106.mat	DE	4.95	4.90	3.28	3.68	3.04
	FE	3.75	3.44	2.48	2.64	2.69
107.mat	DE	5.46	4.70	3.26	3.90	2.94
	FE	2.92	4.13	2.44	3.08	2.73
108.mat	DE	5.03	3.77	3.03	4.65	3.26
	FE	3.17	3.42	2.36	2.87	2.83
169.mat	DE	20.97	16.40	5.67	6.36	3.40
	FE	2.89	6.02	4.31	2.80	3.28
170.mat	DE	24.14	11.43	5.08	5.15	4.46
	FE	3.01	4.88	3.22	2.45	3.74
171.mat	DE	21.27	8.01	4.67	4.87	3.67
	FE	3.86	4.64	3.56	3.29	4.14
172.mat	DE	20.76	2.59	4.06	4.09	3.63
	FE	4.59	4.86	4.38	2.75	3.35
209.mat	DE	7.13	4.65	3.68	4.59	4.32
	FE	2.85	3.69	3.60	2.67	2.83
210.mat	DE	7.75	5.15	4.60	3.32	2.82
	FE	3.04	3.63	4.86	2.72	2.76
211.mat	DE	8.40	4.64	4.29	2.93	2.51
	FE	3.34	3.45	4.94	2.85	3.48
212.mat	DE	8.40	3.74	4.02	3.45	2.46
	FE	3.34	3.27	4.32	3.37	3.25
3001.mat	DE	3.22	3.27	2.75	3.34	3.02
	FE					
3002.mat	DE	3.0545	3.25	2.56	3.0542	3.50
	FE					
3003.mat	DE	3.16	3.06	2.52	3.60	3.49
	FE					
3004.mat	DE	3.00	3.60	2.34	3.39	4.35
	FE					

Tab 3.9 : Roulement avec défaut sur la bille : coté accouplement – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
118.mat	DE	2.77	2.67	3.07	2.88	2.24
	FE	1.94	3.76	3.36	2.96	3.21
119.mat	DE	2.80	3.20	3.13	2.50	2.40
	FE	2.09	3.75	2.82	2.42	2.63
120.mat	DE	2.50	2.91	3.02	2.53	2.50
	FE	2.16	3.13	2.83	2.51	2.98
121.mat	DE	2.60	2.72	2.87	2.57	2.45
	FE	2.25	2.31	2.65	2.43	2.64
185.mat	DE	11.74	3.92	4.74	3.99	2.52
	FE	2.91	4.55	5.30	2.86	2.95
186.mat	DE	10.57	3.59	3.40	2.15	2.61
	FE	2.67	3.35	3.96	2.27	2.83
187.mat	DE	7.68	3.15	4.02	2.38	2.43
	FE	2.63	2.52	3.53	2.91	2.69
188.mat	DE	13.05	2.62	4.60	2.21	2.42
	FE	4.16	2.60	5.30	2.49	2.78
222.mat	DE	3.34	2.76	3.22	2.749	2.747
	FE	1.89	4.79	2.75	2.73	2.77
223.mat	DE	9.59	7.05	3.89	2.99	2.52
	FE	3.72	4.41	2.91	2.19	3.41
224.mat	DE	3.08	2.77	2.87	2.53	2.50
	FE	2.16	4.17	3.16	2.32	2.98
225.mat	DE	3.05	2.41	2.72	2.58	2.48
	FE	2.22	3.50	3.32	2.48	2.77
3005.mat	DE	4.15	3.70	3.71	3.90	5.14
	FE					
3006.mat	DE	3.89	3.60	3.96	3.56	3.24
	FE					
3007.mat	DE	3.59	3.57	3.52	4.01	3.86
	FE					
3008.mat	DE	3.84	4.00	4.90	3.50	3.41
	FE					

Tab 3.10 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure : coté accouplement – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
156.mat	DE	6.81	8.70	3.42	3.33	2.54
	FE	4.51	5.69	3.05	2.79	3.28
158.mat	DE	6.14	8.28	4.14	3.24	2.66
	FE	4.02	5.93	3.05	3.04	3.44
159.mat	DE	8.73	7.75	4.17	3.35	2.89
	FE	5.73	4.79	3.49	2.80	3.68
160.mat	DE	7.84	4.52	3.38	3.04	2.80
	FE	5.05	4.28	3.13	2.87	2.90
258.mat	DE	36.43	36.33	9.14	19.22	6.17
	FE	7.81	5.69	7.96	4.99	3.33
259.mat	DE	35.17	42.79	9.48	17.77	6.09
	FE	9.68	6.55	5.44	3.59	3.45
260.mat	DE	40.28	41.20	9.97	18.80	8.62
	FE	9.78	5.87	6.09	5.97	3.82
261.mat	DE	33.83	26.48	7.88	19.81	5.23
	FE	8.45	3.68	4.36	4.37	3.52

Tab 3.11 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure : coté ventilateur – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
270.mat	DE	4.63	6.70	3.75	2.91	3.29
	FE	6.75	6.20	3.42	3.29	2.63
271.mat	DE	3.68	6.68	4.09	3.08	2.88
	FE	5.64	6.73	4.62	3.37	2.90
272.mat	DE	3.31	6.29	4.17	3.13	2.95
	FE	5.10	6.56	4.23	3.87	2.52
273.mat	DE	3.52	3.74	3.95	3.30	2.55
	FE	5.22	5.29	3.76	3.06	2.59
274.mat	DE	3.84	3.52	3.14	3.19	2.76
	FE	5.57	5.11	3.49	3.91	2.70
275.mat	DE	4.28	3.79	2.79	3.49	2.60
	FE	5.58	6.14	5.15	4.55	2.66
276.mat	DE	5.07	3.46	2.71	3.13	2.51
	FE	4.94	5.87	6.28	4.79	2.52
277.mat	DE	7.08	3.51	2.78	3.57	2.86
	FE	5.08	4.84	5.97	5.07	2.48
278.mat	DE	3.67	4.16	3.29	3.90	2.98
	FE	5.93	7.10	7.12	5.38	2.70
279.mat	DE	3.60	5.10	2.92	2.96	3.68
	FE	5.21	6.15	4.15	3.77	2.78
280.mat	DE	3.54	4.45	3.31	2.98	2.51
	FE	5.04	5.85	3.48	4.19	2.44
281.mat	DE	3.66	4.02	2.90	2.91	2.50
	FE	5.14	4.41	4.18	4.09	2.31

Tab 3.12 : Roulement avec défaut sur la bille : coté ventilateur – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
282.mat	DE	4.02	2.99	3.88	3.30	2.48
	FE	12.62	7.15	3.77	3.15	2.53
283.mat	DE	3.00	2.88	4.21	2.74	2.76
	FE	5.34	3.65	3.25	3.17	2.36
284.mat	DE	2.73	2.75	3.47	2.92	2.38
	FE	2.52	3.27	3.30	3.00	2.30
285.mat	DE	3.17	3.41	3.97	3.00	2.57
	FE	5.33	3.33	3.18	2.91	2.14
286.mat	DE	11.13	3.73	4.53	3.02	2.39
	FE	8.65	11.25	4.51	4.50	3.55
287.mat	DE	11.22	6.04	4.14	2.73	2.99
	FE	11.89	25.65	8.34	3.55	3.05
288.mat	DE	9.28	4.42	3.58	2.72	2.57
	FE	8.50	9.58	6.18	2.86	3.28
289.mat	DE	7.56	3.31	3.13	2.94	2.63
	FE	7.65	9.88	4.81	3.50	3.73
290.mat	DE	3.47	2.91	3.17	2.52	2.22
	FE	11.95	5.46	2.85	2.93	2.37
291.mat	DE	3.33	3.57	2.76	2.58	2.65
	FE	2.79	3.52	3.03	2.50	2.14
292.mat	DE	3.99	3.41	3.34	2.89	2.46
	FE	9.81	6.43	4.12	2.56	2.13
293.mat	DE	3.37	2.84	3.29	2.36	2.42
	FE	3.40	3.12	2.91	2.44	2.33

Tab 3.13 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure : coté ventilateur – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
302.mat	DE	3.30	2.91	3.77	3.27	2.77
	FE	2.55	2.55	4.19	4.15	2.41
305.mat	DE	3.11	3.14	2.84	2.94	2.78
	FE	2.93	4.57	9.56	2.65	2.19
306.mat	DE	2.93	3.01	2.73	3.52	2.61
	FE	2.64	4.15	4.93	2.61	2.16
307.mat	DE	3.10	3.01	2.86	2.96	2.71
	FE	2.84	3.54	4.15	2.62	2.20

Tab 3.14 : roulement sans défaut – EEMD

Signal		IMF 11	IMF 22	IMF 33	IMF 44	IMF 55
97.mat	DE	7.12	2.29	2.78	3.80	3.28
	FE	8.17	2.19	4.36	3.30	2.85
98.mat	DE	2.33	3.04	2.75	2.85	2.84
	FE	2.36	2.79	2.90	2.76	2.35
99.mat	DE	2.07	2.96	3.73	3.02	2.80
	FE	2.40	2.86	3.34	2.61	2.45
100.mat	DE	1.95	2.81	3.17	3.06	2.96
	FE	2.31	3.11	3.95	2.88	2.67

Annexe II

Annexe II : Valeurs du kurtosis calculées par l'EMD et l'EEMD pour $F_e=48000$ Hz

Tab 3.15 : roulement sans défaut – EMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La Charge Appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>IMF 1</i>	3,5435	3,4045	2,7121	1,9466
<i>IMF 2</i>	3,0893	2,8779	2,7136	2,5602
<i>IMF 3</i>	4,2782	3,3546	3,0277	3,7249
<i>IMF 4</i>	3,4398	3,5933	3,0198	3,0169
<i>IMF 5</i>	2,9615	2,7257	2,6200	3,1213

Tab 3.16 : roulement sans défaut – EEMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La Charge Appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>IMF 1</i>	6.8096	2.3757	2.0458	1.9248
<i>IMF 2</i>	2.2342	3.0198	2.9549	2.8201
<i>IMF 3</i>	2.6690	2.8259	2.7800	3.2345
<i>IMF 4</i>	3.7677	2.9870	3.0308	2.9583
<i>IMF 5</i>	3.0522	3.1038	2.7097	2.9133

Annexe II

Tab 3.17 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure – EMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	5,8913	9,3249	9,6987	10,7990
<i>IMF 2</i>	4,0096	5,5371	3,9117	3,3718
<i>IMF 3</i>	4,0138	4,3522	5,6428	4,2420
<i>IMF 4</i>	3,3740	5,9416	3,5396	2,8525
<i>IMF 5</i>	3,3447	3,3737	2,7120	3,1907
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	14,3723	20,3671	25,0796	21,4388
<i>IMF 2</i>	6,9249	5,2918	4,7499	4,2279
<i>IMF 3</i>	5,2875	3,8232	3,8147	3,0823
<i>IMF 4</i>	4,2639	3,0820	3,5683	3,1540
<i>IMF 5</i>	4,5028	3,4490	2,9511	2,6744
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	3,9670	3,2219	3,5292	3,3422
<i>IMF 2</i>	11,4511	4,9835	5,4297	5,1302
<i>IMF 3</i>	3,9238	3,7630	4,7024	5,5872
<i>IMF 4</i>	6,9489	2,7749	4,8429	5,0041
<i>IMF 5</i>	3,8993	2,8268	4,0452	3,3045

Tab 3.18 : Roulement avec défaut sur la bague intérieure - EEMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	30.0644	36.9407	39.8286	31.0305
<i>IMF 2</i>	4.7769	5.3744	5.0797	4.7360
<i>IMF 3</i>	4.5351	5.8110	5.1734	4.6784
<i>IMF 4</i>	3.1073	3.3808	3.1461	2.7646
<i>IMF 5</i>	2.7824	2.3817	2.2899	2.5209
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	71.9506	54.4606	69.2008	59.9039
<i>IMF 2</i>	5.6062	9.0546	8.6649	8.8547
<i>IMF 3</i>	3.4484	2.3347	2.3796	2.4249
<i>IMF 4</i>	8.0070	3.2369	3.5431	2.9189
<i>IMF 5</i>	3.6778	2.9157	2.6511	3.2867
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				

<i>IMF 1</i>	49.4427	99.8966	81.2429	149.5652
<i>IMF 2</i>	3.8345	3.1193	3.2206	3.2714
<i>IMF 3</i>	2.6230	2.7898	3.2627	3.0361
<i>IMF 4</i>	5.3817	5.8432	5.2461	4.0488
<i>IMF 5</i>	2.9151	2.6212	3.3255	4.3061

Tab 3.19 : Roulement avec défaut sur la bille – EMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	3.1452	3.2439	3.5531	3.4191
<i>IMF 2</i>	2.8011	3.3486	3.4239	3.0755
<i>IMF 3</i>	2.7447	3.2077	3.5062	2.9783
<i>IMF 4</i>	3.0811	2.8874	2.7089	2.8843
<i>IMF 5</i>	2.8673	2.6323	2.8606	2.5670
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	8.6219	34.9164	26.6206	16.1083
<i>IMF 2</i>	3.6826	4.2803	5.7071	3.3172
<i>IMF 3</i>	3.2505	5.8308	4.3815	2.7594
<i>IMF 4</i>	3.4783	3.1744	3.5928	3.0430
<i>IMF 5</i>	2.6509	3.3550	2.1759	2.2967
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	3.3341	3.0444	9.0732	3.6916
<i>IMF 2</i>	3.9118	5.3283	3.6263	2.8258
<i>IMF 3</i>	3.2070	2.9767	3.4956	3.3171
<i>IMF 4</i>	3.5404	2.6714	3.9482	3.6814
<i>IMF 5</i>	3.3185	2.7368	2.8870	2.7817

Annexe II

Tab 3.20 : Roulement avec défaut sur la bille - EEMD

<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	30.7246	51.9323	55.4355	85.9657
<i>IMF 2</i>	2.6183	2.7752	2.9484	2.8984
<i>IMF 3</i>	2.7541	2.9937	2.8746	2.7451
<i>IMF 4</i>	2.8585	3.0818	3.2351	2.9088
<i>IMF 5</i>	3.1904	2.6720	2.8369	2.7496
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	66.2230	152.5756	87.9171	105.3348
<i>IMF 2</i>	4.4322	6.3939	7.1256	5.1940
<i>IMF 3</i>	3.2515	2.5908	2.9580	2.5871
<i>IMF 4</i>	3.6103	8.2451	2.9647	2.9883
<i>IMF 5</i>	3.5082	2.4648	2.9412	2.1736
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	46.9541	118.0981	69.2161	51.8798
<i>IMF 2</i>	3.0506	2.8681	4.4941	3.6361
<i>IMF 3</i>	2.6330	2.8083	2.4115	2.4356
<i>IMF 4</i>	3.0435	3.5021	3.3588	3.6792
<i>IMF 5</i>	3.0690	2.7152	2.8934	2.8357

Annexe II

Tab 3.21 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure – EMD

<i>Orientation de la mesure A 6h00</i>				
<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	5.4363	4.4505	4.4767	4.6348
<i>IMF 2</i>	5.3507	5.5698	5.7511	5.6103
<i>IMF 3</i>	4.7146	5.5948	5.2008	4.3941
<i>IMF 4</i>	3.4902	3.2032	2.8672	3.1851
<i>IMF 5</i>	2.9747	2.9380	3.3950	3.2899
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	3.3668	3.5868	3.4281	3.7282
<i>IMF 2</i>	3.3320	4.4318	4.9362	3.5233
<i>IMF 3</i>	3.7610	3.5026	3.4325	2.7478
<i>IMF 4</i>	3.5813	2.8276	3.0080	3.0255
<i>IMF 5</i>	2.9269	3.0341	3.1014	3.2317
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	19.2989	19.1400	16.9977	18.4913
<i>IMF 2</i>	19.8542	28.1971	17.0474	43.8577
<i>IMF 3</i>	11.1171	9.9284	8.0433	13.7493
<i>IMF 4</i>	10.5130	7.2299	9.9014	6.6982
<i>IMF 5</i>	9.9522	6.3896	4.6044	3.6017

Annexe II

<i>Orientation de la mesure A 12h00</i>				
<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	7.8761	20.0211	16.7303	14.8803
<i>IMF 2</i>	8.6960	9.9505	8.1716	7.7617
<i>IMF 3</i>	10.5956	10.7823	5.3403	3.7480
<i>IMF 4</i>	3.2646	5.9998	3.1618	4.0427
<i>IMF 5</i>	3.3192	3.4595	2.8751	3.6097
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	29.2387	21.0080	27.6730	23.1565
<i>IMF 2</i>	9.3771	29.7686	8.3246	9.3133
<i>IMF 3</i>	5.1270	8.5667	4.9014	6.2878
<i>IMF 4</i>	10.2940	4.8794	9.6338	7.6177
<i>IMF 5</i>	2.8318	4.5270	3.2120	3.6746

Annexe II

Tab 3.22 : Roulement avec défaut sur la bague extérieure – EEMD

<i>Orientation de la mesure A 6h00</i>				
<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	18.4418	19.9493	21.0988	22.0878
<i>IMF 2</i>	3.9007	4.0453	3.8999	4.1189
<i>IMF 3</i>	3.4218	2.8792	3.5715	3.1826
<i>IMF 4</i>	5.3299	4.5900	5.4763	3.5032
<i>IMF 5</i>	3.1925	2.8489	4.7408	2.9010
<i>Diamètre du défaut 0.014 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	55.6149	44.7105	52.4940	74.5696
<i>IMF 2</i>	3.0858	2.8970	2.8234	2.8967
<i>IMF 3</i>	2.7121	2.9308	3.0354	2.6295
<i>IMF 4</i>	4.4496	2.9028	2.9363	3.0156
<i>IMF 5</i>	3.3580	3.0519	2.9395	2.7470
<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	49.7165	47.7134	38.5243	42.7252
<i>IMF 2</i>	9.2815	8.9641	9.6488	10.1546
<i>IMF 3</i>	3.9073	6.4358	4.0986	4.3181
<i>IMF 4</i>	9.6516	11.9632	11.1995	9.5940
<i>IMF 5</i>	2.8193	2.7525	2.5598	2.9457

Annexe II

<i>Orientation de la mesure A 12h00</i>				
<i>Kurtosis</i>	<i>La charge appliquée (HP)</i>			
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Diamètre du défaut 0.007 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	95.7843	68.8350	62.1688	80.6891
<i>IMF 2</i>	3.6888	5.1651	5.6813	4.6492
<i>IMF 3</i>	3.4268	5.2396	3.2855	2.8203
<i>IMF 4</i>	3.4822	3.4289	3.1024	2.9637
<i>IMF 5</i>	2.7134	3.2398	2.9756	2.8623

<i>Diamètre du défaut 0.021 inch</i>				
<i>IMF 1</i>	55.5278	47.9574	56.0349	55.3877
<i>IMF 2</i>	14.0091	10.5710	12.2057	11.1198
<i>IMF 3</i>	3.0993	4.1221	3.4751	3.0669
<i>IMF 4</i>	11.9590	11.7230	8.4866	5.1976
<i>IMF 5</i>	3.6395	3.7335	3.0275	3.0585

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] D. Bouami, Le grand livre de la maintenance, AFNOR, 2019.
- [2] D. Bouami, Le Grand livre de la gestion des stocks et approvisionnements, AFNOR, 2019.
- [3] D. Augeix, Analyse vibratoire des machines tournantes. Techniques de l'ingénieur, BM 5 145. France, 2012.
- [4] Document SKF, Catalogue technique. France, 1981.
- [5] Document AFNOR, Norme AFNOR X 60-010. Paris, 1990.
- [6] Q. Meng, L. Qu, rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, pp 155-166, 1991.
- [7] Catalogue NSK roulements (Nippon Seikō Kabushiki-gaisha, Japanese Precision Company) imprimé en Allemagne, Réf ; RB/A/FR/01.12, 2009.
- [8] F. Landolsi, Cours de techniques de surveillance. Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, département de génie mécanique, 1995.
- [9] J.R. Stack, T.G. Habetler, R.G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40 n. 3, pp. 735-739, May-Jun. 2004.
- [10] C. Kojchen, La maintenance préventive, Dunod, 2017.
- [11] S. Maillard, J. Cadith, H. Walaszek, J. L. Bodnar, La thermographie infrarouge active et ses nouvelles applications aux matériaux métalliques. Grespi, UFR Sciences Exactes et Naturelles, Reims, France Aout - Septembre 2012.
- [12] J.C. Mindeguia, C. Sirieix, M. Larget, D. Breysse, Développement expérimental et numérique de la thermographie infrarouge en tant qu'outil d'évaluation de la dégradation du béton d'enrobage. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [13] Guide d'inspection caméras Fluke TiX560 et TiX520.
- [14] Norme NF A 09-350 de 1984, paris, AFNOR.
- [15] Norme NF EN 1330-9 d'Avril 2000, paris, AFNOR.
- [16] C. Migeon, Emission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs. Mécanique [physics.med-ph], 2011.

Références bibliographiques

- [17] Foulayronnes, Electromécanicien (ne) de maintenance industrielle «maintenance roulements », AFPA 2013.
- [18] Z. Hameeda, Y.S. Honga, Y.M. Choa, S.H. Ahnb et C.K. Songc, Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n°1, p. 1-39, 2009.
- [19] L. Rasolofondraire, Mise en œuvre des méthodes paramétriques adaptatives pour la surveillance d'une machine de production par analyse vibratoire. Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, Déc. (1995).
- [20] C. Pachaud et al., Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces. *Mechanical Systems and Signal Processing* 11(6), 903-916, 1997.
- [21] A. Boulenger & C. Pachaud, *Diagnostic vibratoire en maintenance préventive*, Dunod, Paris 1998.
- [22] H. R. Martin, F. Honarvar, Application of Statistical Moments to Bearing Failure Detection, *Applied Acoustics*, Vol. 44, pp 67-77, 1995.
- [23] R. E. Bekaa. *Fondements du traitement du signal*, livre office des publications universitaires, OPU. 05-2008.
- [24] R. Ziani, Contribution à l'analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques, Thèse de doctorat, éniuersite ferhat abbas – Setif 1, 2015.
- [25] M. El Badaoui, F. Guillet, J. Danière, New applications of the real cepstrum to gear signals, including definition of a robust fault indicator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18, pp.1031–1046, 2004.
- [26] A.V. Oppenheim; R.W. Schafer, From frequency to quefrequency: a history of the cepstrum, *IEEE Signal Processing Magazine*, August 2004, 95 – 106.
- [27] A. Djebala. Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [28] N. E. Huang, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, 454:903–995, 1998.
- [29] Lei Y, Lin J, He Z, Zuo MJ. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing* 35:108-126, 2013.

Références bibliographiques

- [30] J. Dybala, R. Zimroz, Rolling Bearing Diagnosing Method Based on Empirical Mode Decomposition (EMD) of Machine Vibration Signal. *Applied Acoustics* 77 (2014) 195-203.
- [31] Q. Gao, C. Duan, H. Fan, Q. Meng, Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 (2008) 1072-1081.
- [32] M. Kedadouche et al. Empirical Mode Decomposition of Acoustic Emission for Early Detection of Bearing Defects. *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.
- [33] A. Djebala, M. K. Babouri, N. Ouelaa, Rolling bearing fault detection using a hybrid method based on empirical mode decomposition and optimized wavelet multi-resolution analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 79(9 – 12):2093 – 2105, 2015.
- [34] C. Junsheng, Y. Dejie, Y. Yu, A Fault Diagnosis Approach for Roller Bearings Based on EMD Method and AR Model. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 350-362.
- [35] D. Qihua, Y. Shunian. Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2007)2634–2644.
- [36] M. Pan, W. Tsao, Using Appropriate IMFs for Envelope Analysis in Multiple Fault Diagnosis of Ball Bearings. *International Journal of Mechanical Sciences* 69 (2013) 114-124.
- [37] Z. Wu, N. E. Huang, Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Adv Adapt Data Anal* 1(01):1 – 41, 2009.
- [38] W. Guo, P. W. Tse, A. Djordjevich. Faulty Bearing Signal Recovery from Large Noise Using a Hybrid Method Based on Spectral Kurtosis and Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). *Measurement* 45 (2012) 1308-1322.
- [39] M. Zhao et al. Multi-Fault Detection of Rolling Element Bearing Under Harsh Working Condition Using IMF-Based Adaptive Envelope Order Analysis. *Sensors* 2014, 14, 20320-20346.
- [40] M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin, A Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise. *Proceeding of the 36th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP 2011 (May 22-27, Prague, Czech Republic)*

Références bibliographiques

- [41] M. Bouhalais, A. Djebala, N.Ouelaa, M. K. Babouri, CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(5-8):2475-2489, 2018.
- [42] F. Fayad, Apprentissage et annulation des bruits impulsifs sur un canal CPL indoor en vue d'améliorer la QoS des flux audiovisuels. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand 2, École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand, Avril 2012, France.
- [43] T. Wang et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal. *Journal of applied Geophysics* 83 (2012) 29-34.
- [44] G. Rilling. Décompositions Modales Empiriques. Contributions à la théorie, l'algorithmie et l'analyse de performances. PhD thesis, ENS Lyon, 2007.
- [45] G. Rilling, P. Flandrin et P. Gonçalvès. On empirical mode decomposition and its algorithms. In *IEEE-EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing NSIP-03, Grado (I)*, 2003.
- [46] Bearing Data Center, Base de données des roulements, disponible à « www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing »