

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

**CHANAI FAHEM**

**ICHALLAL LAALA**

**Thème**

---

**Application de la décomposition en mode Empirique  
(EMD) pour la détection des Défauts de roulement**

---

Soutenu le : 26/09/2022 devant le jury composé de :

Mr.	BENSAID	Président
Mr.	HARROUCHE	Rapporteur
Mr.	BOUTAANI	Examineur

*Année universitaire 2021/2022*

# ***REMERCIEMENTS***

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 Harouche Fatah 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 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 A/Mira « Bejaia » '

**Merci à vous tous**



*Tout d'abord je veux commencer à dédier ce modeste travail aux précieuses personnes qui Nous ont quittés, mes deux chère grande mère et mon cher cousin massi , Je n'oublierai Jamais vos précieux conseils et je serai toujours fier de vous avoir comme mes ancêtres.*

### ***A mon très cher père***

*Qui a consacré toute sa vie pour répondre à nos besoins et pour nos données la meilleure vie possible. Ta présence signifie beaucoup, Que Dieu vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

### ***A ma chère mère***

*Tu es une mère formidable. La plus gentille des mamans du monde. Merci Maman pour tout ce que tu fais pour moi ma tendresse et ma reconnaissance sont infinies.*

### ***A mes deux frères***

*Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous, je vous souhaite beaucoup de réussite et de succès dans ta vie.*

### ***A mes deux sœurs***

*Sabrina et katia qui je remercie infiniment pour toute leurs aides et à qui je souhaite tout le bonheur du monde.*

### ***A tous mes amis***

*Lamine mazigh anis aissa kouciela soufien ghani hassen nassim djamel said ...Ça été un plaisir de vous connaître.*

### ***A mon binôme***

*Je remercie mon amis laala ichallal qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*



### ***A mon très cher père***

*Celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, qui est toujours  
Disponible pour nous, et prêt à nous aider. Ta présence signifie beaucoup, Que Dieu vous  
Accorder santé, bonheur et longue vie.*

### ***A ma très chère mère***

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel  
Que Dieu vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

### ***A mes sœurs***

*Louiza et Rania, à qui je leur souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.*

### ***A tout ma famille***

*A mes oncles et mes tantes, et particulièrement mon oncle Mokran qui m'a beaucoup  
aidé par ses conseils et son soutien. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*

### ***A ma future femme***

*A ma chère Samia qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude.  
Je vous souhaite que de bonheur et de la réussite*

### ***A mes amies***

*A tous mes amis particulièrement Hamza . Ça été un plaisir de Vous connaître.  
A mes collègues de promotion de génie mécanique*

### ***A mon binôme***

*Je remercie mon ami Faham Chanai i qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

# ***SOMMAIRE***

<b>Remerciement.....</b>	<b>I</b>
<b>Dédicaces.....</b>	<b>II</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des Figures.....</b>	<b>IX</b>
<b>Liste des Tableaux.....</b>	<b>XII</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

## **Chapitre I : Généralités et Notions Fondamentales sur les Défauts Mécaniques des Machines Tournantes**

I.1- Généralité sur les signaux.....	5
I.1.1- Qu'est-ce qu'un signal ?.....	5
I.1.2- Types de signaux.....	5
I.2- Défaillances des machines tournantes.....	5
I.2.1. Défauts liés aux arbres.....	6
I.2.2. Défauts d'engrenages.....	7
I.2.2.1. Détérioration d'une dent.....	7
I.2.2.2. Détérioration de deux dents sur les deux roues.....	7
I.2.2.3. Ecaillage.....	7
I.2.2.4. Fissuration.....	8
I.2.3. Roulements et leurs défauts.....	8
I.2.3.1. Géométrie et constitution d'un roulement.....	8
I.2.3.2 Défauts rencontrés sur les roulements.....	9
I.2.3.3. Sources des défauts sur les roulements à billes.....	10
I.2.4. fréquence caractéristique pour les défauts d'un roulement .....	11
I.2.5. Stratégie de détection des défauts de roulements.....	15
I.2.5.1. Surveillance.....	15
I.2.5.2. Détection.....	15
I.2.5.3. Diagnostic.....	15
I.3- Méthodes d'analyse.....	15
I.3.1. Méthodes temporelles.....	15
I.3.1.1. Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square).....	16
I.3.1.2. Indicateurs crêtes.....	16
I.3.1.3. Le Kurtosis.....	17

I.3.2. Méthodes fréquentielles.....	18
I.3.2.1. Analyse en fréquence.....	18
I.3.2.2. Analyse d'enveloppe.....	19
I.3.2.3. Cepstre .....	20
I.3.3. Méthodes temps-fréquence.....	21
I.3.3.1. Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	21
I.3.3.2. Transformée en ondelettes.....	22
I.3.3.3. Décomposition en Mode Empirique (EMD).....	22
I.4- Conclusion .....	23

## ***Chapitre II***

### ***Notions de base sur la Décomposition en mode empirique (EMD) et synthèse bibliographique***

II.1- Décomposition en modes empiriques (EMD) .....	25
II.2 Quelques définitions.....	25
II.2.1- L'enveloppe moyenne.....	25
II.2.2- IMF (pour Intrinsic Mode Function).....	26
II.2.3- Sifting Process (SP).....	26
II.2.4- Une intermittence.....	26
II.2.5- Mode mixing.....	26
II.3- Principe de la méthode EMD .....	26
II.3.1- La procédure de tamisage (Sifting process).....	27
II.3.2- Algorithme de L'EMD .....	27
II.3.3- Exemple d'application de l'EMD .....	29
II.3.4- Le Mode « Mixing ».....	29
II.4- Synthèse bibliographique des travaux utilisant l'EMD pour la détection des défauts des machines tournantes.....	31
II.5- Conclusion.....	34

**Chapitre III****Application de l'EMD pour le diagnostic des défauts de roulements**

III.1- Introduction.....	36
III .2- Application sur le banc d'essais du centre « Bearing Data Center ».....	36
III.2.1 Présentation du banc d'essais.....	36
III.2.2. Diagnostic des défauts à partir des signaux et spectres bruts .....	38
III.2.2.1 Mode de fonctionnement sans défauts (cas sain) .....	38
III.2.2.2 Mode de fonctionnement avec défaut sur la bague extérieure (0.007").....	39
III.2.2.3 Mode de fonctionnement avec défaut sur la bague intérieure (0.014") .....	40
III.2.2.4 Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bille (0.021") .....	41
III.2.3. Diagnostic des défauts du banc d'essais par application de l'EMD .....	42
III.2.3.1. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bague extérieure (0.007")...42	
III.2.3.2. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bague intérieure (0.021")...44	
III.2.3.3. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bille (0.021").....46	
III.2.4. Etude de l'effet de la charge et de la taille du défaut.....	48
III.2.4.1. Effets de la charge.....	48
III.2.4.2. Effets de la taille du défaut.....	49
III.3. Conclusion .....	51
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>52</b>
<b>Référence Bibliographique.....</b>	<b>53</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>56</b>

*Liste des FIGURES*

<b>Numéro de figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure 1.1	Types de signaux vibratoires	5
Figure 1.2.	Représentation du balourd	6
Figure 1.3	Désalignement axial, radial et angular	7
Figure 1.4	Défaut d'écaillage	8
Figure 1.5	Défaut de fissuration	8
Figure 1.6	Différentes composantes d'un roulement	9
Figure 1.7	Criques de corrosion sur une piste de roulement	10
Figure 1.8	Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant	11
Figure 1.9	Caractéristiques d'un roulement	12
Figure 1.10	Défaut de type écaillage affectant la bague intérieure	13
Figure 1.11	Défaut de type écaillage affectant la bague extérieure	13
Figure 1.12	Défaut de type écaillage sur un élément roulant	14
Figure 1.13	Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur de crête	17
Figure 1.14	Fréquence fondamentale d'un simple sinus	19
Figure 1.15	Densité spectrale de puissance effectuée sur un roulement avec un écaillage sur la bague extérieure à 34,75 H	20
Figure 1.16	Spectre enveloppe (0 – 100 Hz). Visualisation du défaut de bague extérieure à 34,75 Hz	20
Figure 1.17	Exemple d'analyse ceptrale d'un signal vibratoire provenant d'une boîte à vitesses : a) Spectre, b) Cepctre	21
Figure 1.18	Principe et représentation de la STFT	22
Figure 2.1	Principe de L'EMD : Oscillation rapide (a) oscillation lente (tendance) (b)	27
Figure 2.2	L'organigramme de la méthode EMD	28
Figure 2.3	Décomposition du signal somme par EMD	29
Figure 2.4	Signal original à décomposer	30
Figure 2.5	Résultats obtenus par application de l'EMD	30
Figure 3.1	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	36



Figure 3.2	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	37
Figure 3.3	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	38
Figure 3.4	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	39
Figure 3.5	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	39
Figure 3.6	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	40
Figure 3.7	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	40
Figure 3.8	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	41
Figure 3.9	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	41
Figure 3.10	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	42
Figure 3.11	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	43
Figure 3.12	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	43
Figure 3.13	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	44
Figure 3.14	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	44
Figure 3.15	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	45
Figure 3.16	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	45
Figure 3.17	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	46
Figure 3.18	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	46
Figure 3.19	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	47
Figure 3.20	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	47
Figure 3.21	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	48
Figure 3.22	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	48
Figure 3.23	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	49
Figure 3.24	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	49
Figure 3.25	Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp	50
Figure 3.26	Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut	50

*Liste des TABLEAUX*

<b>Numéro de tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau 1.1	Paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine	6
Tableau 1.2	Nomenclature entre spectre et cepstre	21
Tableau 3.1	Fréquences caractéristiques des défauts de roulement avec les différents couples résistants.	38

# *Introduction Générale*

## INTRODUCTION GENERALE

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.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- réduire le nombre d'arrêts sur casse ;
- 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.

Les roulements sont des éléments essentiels des machines tournantes. En effet, les pistes de roulement, chargées cycliquement, se dégradent par fatigue conduisant aux écaillages puis à la ruine du matériau. Lors de la mise en rotation, un train d'impulsion est généré par le défaut à une fréquence bien définie que l'on appelle « fréquence caractéristique » de défaut du roulement. Ce signal périodique est l'objet de l'application de nombreuses méthodes de détection de défaut.

Dans ce travail, nous appliquons une méthode très récente de traitement du signal appelée « Décomposition en Mode Empirique(DME) » ou « Empirical Mode Decomposition(EMD) » en Anglais, pour la détection des défauts de roulements. La Validité de la méthode proposée est prouvée sur le banc de test de roulements "Bearing Data Center", Où plusieurs paramètres ont été pris en considération afin d'optimiser les conditions d'utilisation de la méthode.

Le présent travail est structuré en trois chapitres suivis de conclusion générale. Nous utilisons le premier chapitre pour un aperçu général du diagnostic des machines tournantes.en donnant les défauts de roulements qui accrent sur les machines tournantes. Nous présentons également certaines méthodes utilisées dans le domaine du traitement du signal vibratoire. Le deuxième

chapitre portera sur les bases mathématiques de la méthode utilisée et quelques travaux réalisés à base de cette dernière, et enfin le troisième chapitre porte sur l'application de la méthode proposée sur des signaux de roulements sains et endommagés mesurés sur le banc d'essai "Bearing Data Center".

# *Chapitre I*

## *Généralités et Notions Fondamentales sur les Défauts Mécaniques des Machines Tournantes*

« Le domaine de détection des défauts est tellement passionnant et évolue rapidement qu'on ne se lassera jamais d'en parler. Ce chapitre présente d'une manière explicite les aspects d'apparition des défauts de roulements et les principales méthodes de leur détection ».

## I.1- Généralité sur les signaux :

### I.1.1- Qu'est-ce qu'un signal ?

Un signal, harmonique simple déterministe est une grandeur variable dans le temps et qui est définie par trois valeurs qui sont l'amplitude, la fréquence, et la phase. Son allure physique est définie par la relation (1) :

$$st = A_m \cdot \sin(2 \times \pi \times f \times t + \vartheta) \quad (1)$$

$A_m$  : Amplitude,  $f$  : Fréquence,  $\vartheta$  : Phase.

### I.1.2- Types de signaux

On compte plusieurs types de signaux (voir figure 1.1), comme les signaux périodiques, stationnaires, non stationnaires, non linéaires, déterministes...etc.

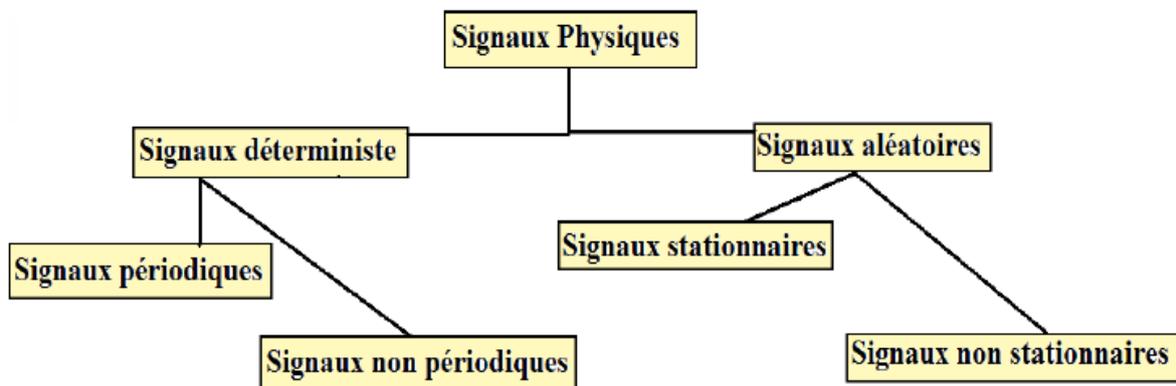


Figure 1.1 Types de signaux vibratoires

## I.2- Défaillances des machines tournantes :

Une machine tournante n'est en fait qu'un jeu de mécanismes mobiles entre eux, et d'organes combinés dans le but d'effectuer une tâche précise, transformer une énergie, transmettre un mouvement ... etc. Une panne dans une machine tournante n'est que la résultante d'une avarie ou d'une suite d'avarie sur l'un ou plusieurs de ses organes. Dans ce qui suit nous allons voir les défauts les plus courants pouvant se manifester sur quelques

organes de machines classés importants. (Le tableau 1.1 présent ces défauts et les paramètres permettant détecter des ces derniers).

Paramètre Défaits	Température	Pression	Débit	Analyse d'huile	Vibration
Déséquilibre					●
Arbre non aligné – Flexion d'arbre	●				●
Roulement	●			●	●
Palier	●	●	●	●	●
Engrenage	●			●	●
Frottement	●				●

Tableau 1.1 Paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine [1]

## I.2.1. Défaits liés aux arbres

### I.2.1.1. Balourd

Un balourd est caractérisé par un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui produit des forces d'inertie. Ces forces agissent sur les corps en rotation et surtout sur les roulements et excitent les paliers.

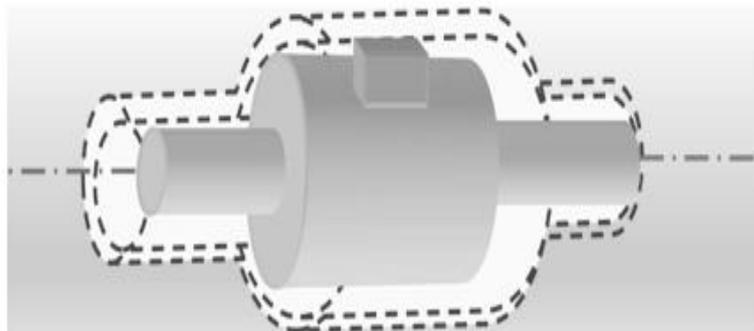


Figure 1.2 représentation du balourd

### I.2.1.2. Désalignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

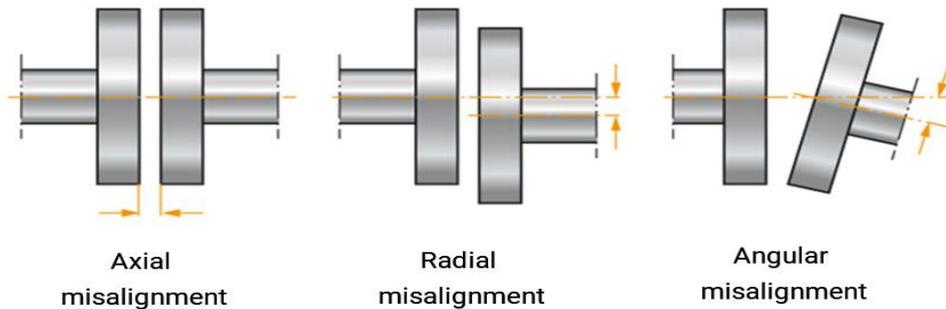


Figure 1.3 : Désalignement axial, radial et angular

## I.2.2. Défaits d'engrenages

### I.2.2.1. Détérioration d'une dent

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur à chaque tour du pignon.

### I.2.2.2. Détérioration de deux dents sur les deux roues

Si les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, les chocs peuvent être importants lorsque les deux défauts se rencontrent. La rencontre s'effectue à la fréquence appelée fréquence de coïncidence

### I.2.2.3. Ecaillage

L'écaillage est lié à l'absence de film d'huile entre les surfaces ; cette absence est causée par l'échauffement créé par la vitesse de frottement et de glissement entre les profils des dents.



Figure 1.4 : défaut d'écaillage

#### I.2.2.4. Fissuration

Elle progresse à chaque mise en charge, et elle est située en pied de dent. Elle apparaît sur des aciers fins et durcis superficiellement, qui sont sujets aux concentrations de contraintes. Leur apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent du côté de la dent en traction.

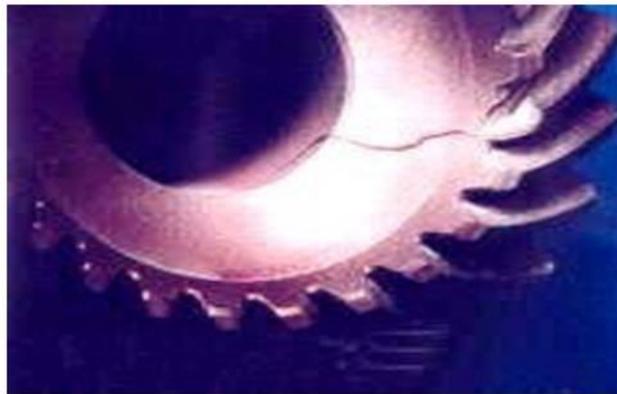


Figure 1.5 défaut de fissuration

### I.2.3. Roulements et leurs défauts

#### I.2.3.1. Géométrie et constitution d'un roulement

La performance des roulements est directement liée à la qualité du matériau utilisé et 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 [2], il faut que les éléments roulants soient complètement séparés par une cage.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels (figure I.6) [3] :

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

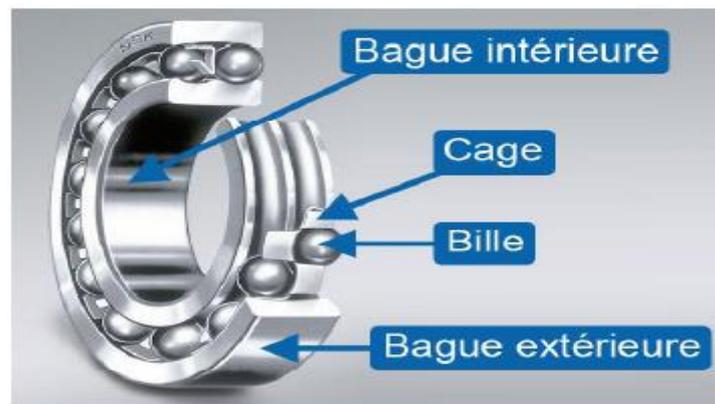


Figure 1.6. Différentes composantes d'un roulement [4]

### I.2.3.2 Défaits rencontrés sur les roulements

En effet les roulements sont les éléments les plus importants des machines tournantes. Souvent, ils sont soumis à des excitations qui provoquent dans la majorité des cas des défauts cause d'une défaillance partielle ou totale de la machine dont les conséquences sont catastrophiques. D'après les statistiques, les roulements sont dans 19% des cas la cause de la défaillance de la machine. Selon SNR (signal noise ration en anglais), il y a onze aspects des principales détériorations des roulements [5] :

- 1- **Ecaillage de fatigue** : Présent sous forme de fissuration et enlèvement de fragment de matière.
- 2- **Ecaillage superficiel** : Taches en surface provenant d'arrachement superficiel de métal.
- 3- **Grippage** : Echauffement violent, déformation des corps roulants, laminage du métal.
- 4- **Empreintes par déformation** : Empreintes sur les pistes et les corps roulants.
- 5- **Faux effet Brinell** : Enlèvement de matière par abrasion au niveau des points de contact internes du roulement.
- 6- **Usure** : Usure généralisée des corps roulants, des pistes et des cages, teinte grise.

7- **Cratères et cannelures** : Piqûres à bord net ou succession de plages étroites parallèles, liées à un passage de courant électrique.

8- **Coups, fissures, cassures** : Chocs violents, enlèvement de matière en surface, fissures, rupture des bagues.

9- **Corrosion de contact** : Coloration rouge ou noire sur les surfaces d'appui du roulement, dans l'alésage et sur le diamètre extérieur.

10- **Corrosion** : Oxydation localisée ou généralisée, à l'extérieur ou à l'intérieur du roulement.

11- **Détérioration des cages** : Déformation, usure, rupture.

Des statistiques plus précises montrent que 90% des défauts de roulements sont dus soit à la bague extérieure ou intérieure, rarement la cage et la bille. En effet les deux pistes subissent les effets dus à la transmission de charge par les éléments roulants ce qui les rend plus sujettes à la dégradation.

### I.2.3.3. Sources des défauts sur les roulements à billes

#### a) Montage

Ce type de défaut est dû à un mauvais montage du roulement, c'est à dire à une erreur humaine.

#### b) Corrosion

Des agents corrosifs, tels que des acides, sont susceptibles de s'introduire dans les roulements et de dégrader les matériaux métalliques les constituant. Des criques apparaissent alors sur les bagues et les billes, comme l'illustre la figure (1.7).

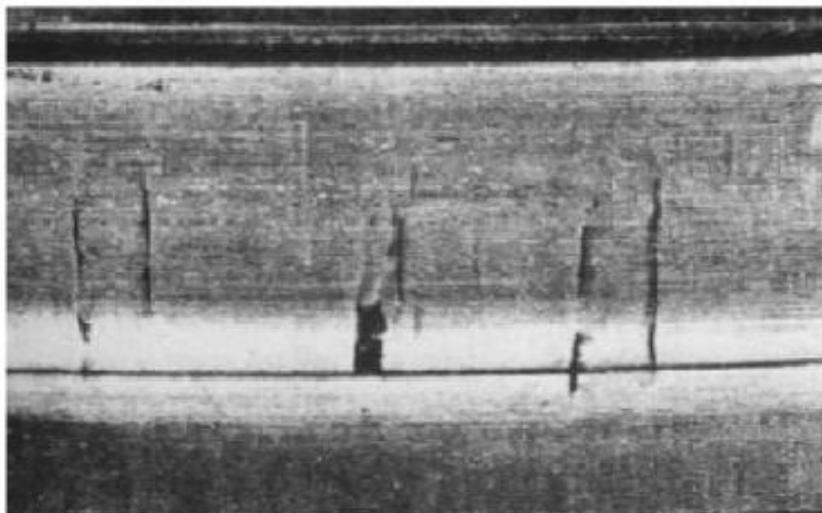
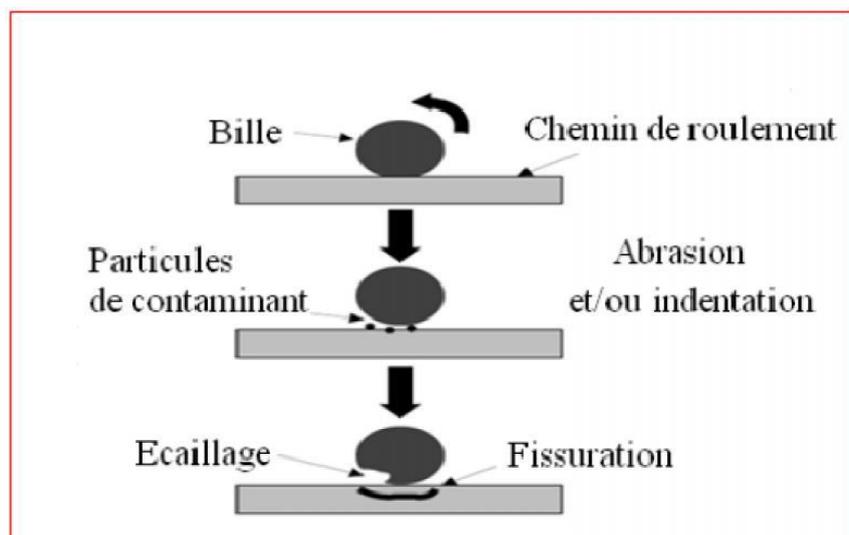


Figure 1.7. Criques de corrosion sur une piste de roulement [6]

## c) Défaut de lubrification [6]

Le lubrifiant est un organe essentiel des roulements dans la mesure où il crée un film d'huile protecteur au niveau des contacts bille/bague permettant de protéger les surfaces. Deux types de défauts de lubrification principaux peuvent se présenter. Le premier est une dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse ou de l'huile ou bien une absence de lubrifiant. En effet, en l'absence de lubrifiant, les surfaces métalliques se trouvent en contact direct, frictionnent et s'érodent rapidement, jusqu'à entraîner des écaillages des pistes, des éclatements des billes, un blocage et donc une destruction du roulement (figure (1.8)).



**Figure 1.8.** Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant [6]

#### I.2.4. Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage) ; ...etc. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication (figure 1.9), on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les équations (2) (3) (4) (5) : [7] [8] [9] [10]

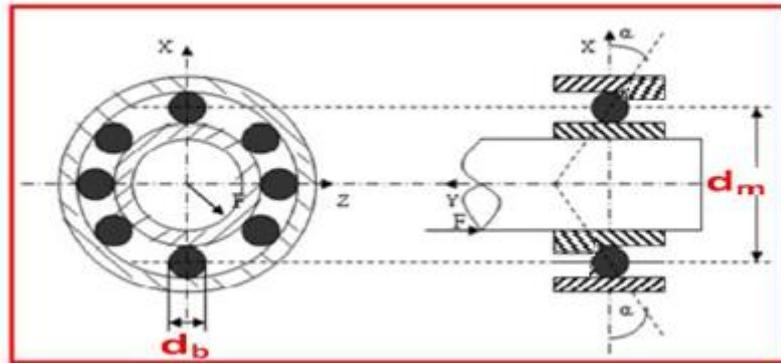


Figure 1.9 Caractéristiques d'un roulement

- $N$  : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- $d_m$  : le diamètre primitif.
- $d_b$  : le diamètre des éléments roulants.
- $\alpha$  : angle de contact

#### a) Défaut sur la bague intérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans (2). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut). (Voir la figure 1.10).

$$f_{bi} = \frac{N}{2} f_r \left( 1 + \frac{d_b \cos(\alpha)}{d_m} \right) \quad (2)$$

Avec :

$f_{bi}$ : Fréquence de bague interne

$N$  : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

$d_m$  : le diamètre primitif.

$d_b$  : le diamètre des éléments roulants.

$\alpha$  : angle de contact.

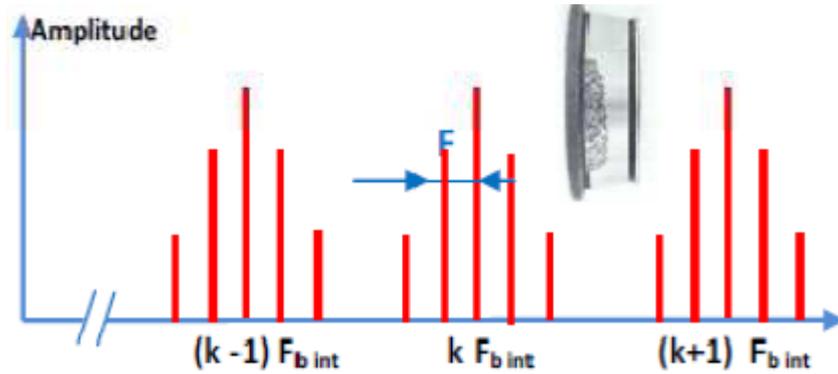


Figure 1.10 Défaut de type écaillage affectant la bague intérieure

**b) Défaut sur la bague extérieure**

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (3). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut. (Figure 1.11)

$$f_{be} = \frac{N}{2} f_r \left( 1 - \frac{d_b \cos(\alpha)}{d_m} \right) \quad (3)$$

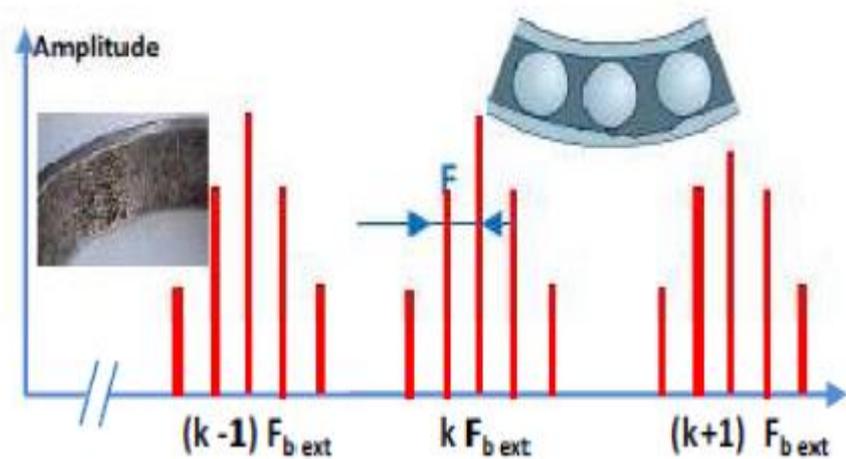


Figure 1.11 Défaut de type écaillage affectant la bague extérieure

**c) Défaut sur la cage**

Ces défauts se manifestent par la présence d'un pic à la fréquence  $f_{ca}$  et ses harmoniques (formule (4))

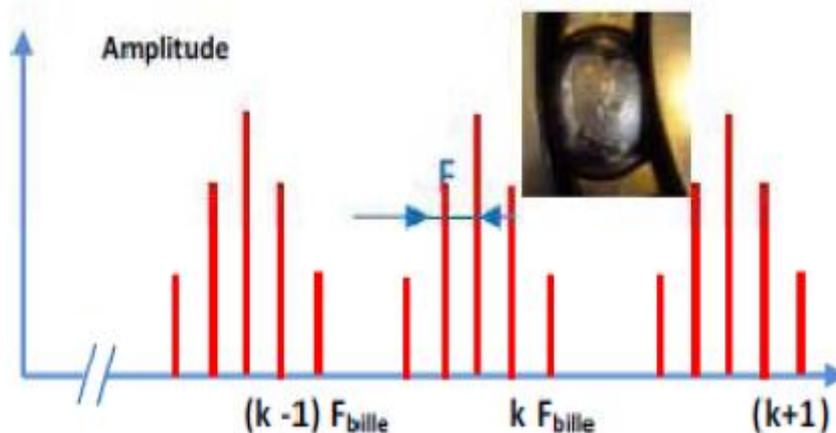
$$f_{be} = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d_b \cos(\alpha)}{d_m} \right) \quad (4)$$

**d) Défaut sur l'élément roulant**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la bague intérieure, est donnée par l'équation (5) :

La première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague intérieure et une fois la bague extérieure par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence. (Figure 1.12)

$$f_b = \frac{d_m}{d_b} f_r \left[ 1 + \left( \frac{d_b \cos(\alpha)}{d_m} \right)^2 \right] \quad (5)$$



**Figure 1.12** Défaut de type écaillage sur un élément roulant

### I.2.5. Stratégie de détection des défauts de roulements

#### I.2.5.1. Surveillance

La surveillance est l'observation « une observation systématique et significative ». La surveillance est un dispositif passif informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à **détecter** et **classer** les défaillances en observant l'évolution du système puis à les **diagnostiquer** en **localisant** les éléments défaillants et en identifiant les premières causes. La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la **détection** et le **diagnostic**.

#### I.2.5.2. Détection

Pour **détecter** les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant **normales** ou **anormales**. Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

#### I.2.5.3. Diagnostic

Le diagnostic est un outil particulièrement utile dans le cadre de la mise en place d'un concept de maintenance prévisionnelle. La démarche du diagnostic repose sur l'analyse systématique du signal vibratoire et le suivi de son évolution dans le temps en analysant son allure temporelle et spectrale afin d'identifier l'existence de défaut ou non.

## I.3- Méthodes d'analyse

Il existe différents outils d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition des défauts dans les roulements et engrenages. De nombreuses publications synthétisent ces différentes méthodes ou outils. Elles sont généralement classées en trois grandes familles.

### I.3.1. Méthodes temporelles

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir

de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut.

### I.3.1.1. Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts et il s'écrit sous forme discrétisée :

$$V_{\text{efficace}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (6)$$

Où  $x(n)$  est le signal temporel mesuré,  $N_e$  représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de fréquences d'analyse liées à la structure même des machines.

### I.3.1.2. Indicateurs crêtes

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête ou le kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles telles que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Il est possible de distinguer principalement :

- le *Facteur crête*, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace,

$$\text{Facteur crête} = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (7)$$

- le facteur  $K$ , défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$\text{Facteur } K = \text{valeur crête} \times \text{valeur efficace} = \sup |x(n)| \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (8)$$

Le facteur de crête comporte 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. Si la détérioration du roulement croît, la valeur crête augmentera jusqu'à une valeur asymptotique et la valeur efficace, quant à elle, augmentera à son tour, rendant le facteur de crête sensiblement égal à sa valeur de départ (Figure 1.13). Les états caractéristiques normaux ou anormaux qui peuvent se manifester sur des roulements peuvent être définis à partir de la valeur efficace de l'accélération et de la valeur crête de la vitesse.

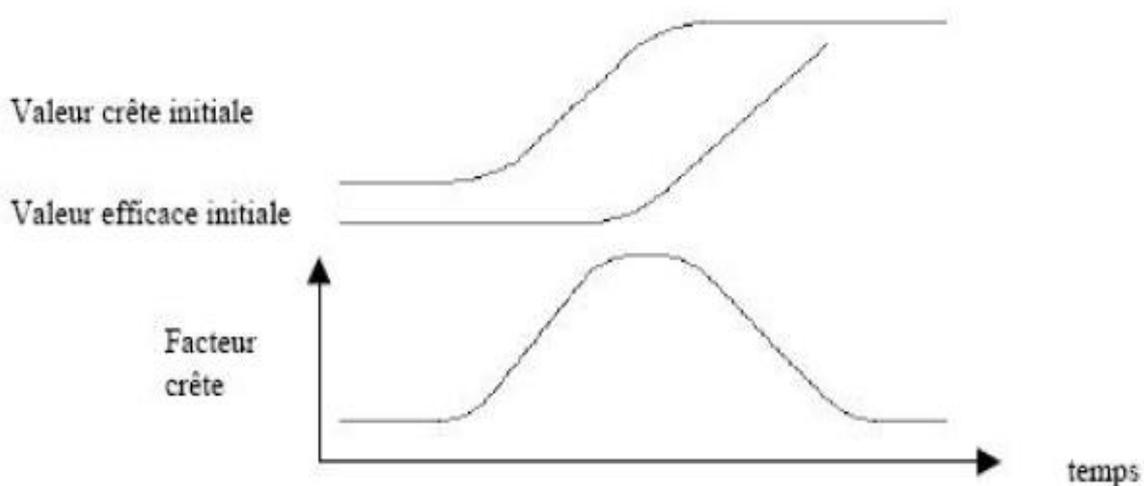


Figure 1.13. Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur de crête

### I.3.1.3. Le Kurtosis

Le kurtosis est le rapport entre le moment centré d'ordre 4 et le carré du moment centré d'ordre 2. De la distribution statistique du signal. 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 (Moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3. L'analyse des défauts de roulement par le kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^4\right)}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2\right]^2} \quad (9)$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,  $x(n)$  est le signal temporel,  $X$  est la valeur moyenne des amplitudes,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le principal avantage du kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du roulement. Le kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs, ce qui oblige un emploi du kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic.

### I.3.2. Méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques.

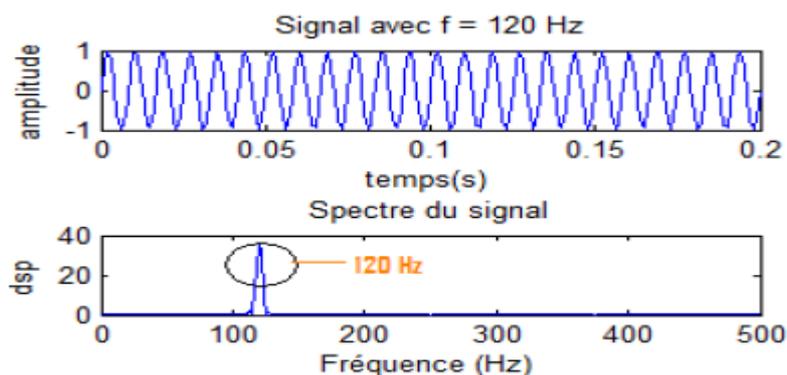
#### I.3.2.1. Analyse en fréquence

L'analyse dans ce domaine est basée sur la transformation du signal en domaine fréquentiel, l'avantage de l'analyse dans ce domaine par rapport au domaine temporel, est son aptitude d'identification et d'isolation facile de certains composants fréquentiels d'intérêt.

Ainsi cette analyse de spectre permet de mettre en évidence les différentes périodicités dans le signal original. Pour obtenir le spectre  $X(f)$  de  $x(t)$ , on applique la fonction mathématique de la transformée de Fourier :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

On prend par exemple un signal sinusoïdal périodique simple et stationnaire avec une fréquence de 120 Hz. L'analyse spectrale permet d'extraire la fréquence fondamentale qui existe dans ce signal.



**Figure 1.14** Fréquence fondamentale d'un simple sinus

L'outil le plus utilisé comme indicateur dans l'analyse spectrale est l'énergie ; elle est définie par :

$$E[X(f)X^*(f)] \quad (11)$$

Avec  $X(f)$  est la transformée de Fourier du signal  $x(t)$ , 'E' est l'espérance mathématique, et (\*) dénote le conjugué complexe de  $X(f)$ . [11]

- Elle indique la présence de défauts grossiers, mais ne permet pas de les localiser dans le cycle de rotation.
- Elle est inadaptée à la détection des signaux transitoires anormaux, car c'est une technique pour le cas des signaux stationnaires. [12]

### I.3.2.2. Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe (HFRT High frequency Résonance technique) est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure. En effet, pour des défauts tels que les écaillages de roulement, les harmoniques peuvent exciter un mode de résonance de structure (figure 1.15).

L'analyse d'enveloppe repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure. Ainsi, il devient alors possible d'extraire des informations basses fréquences difficiles à détecter sur une porteuse haute fréquence comme le montre la figure (1.16).

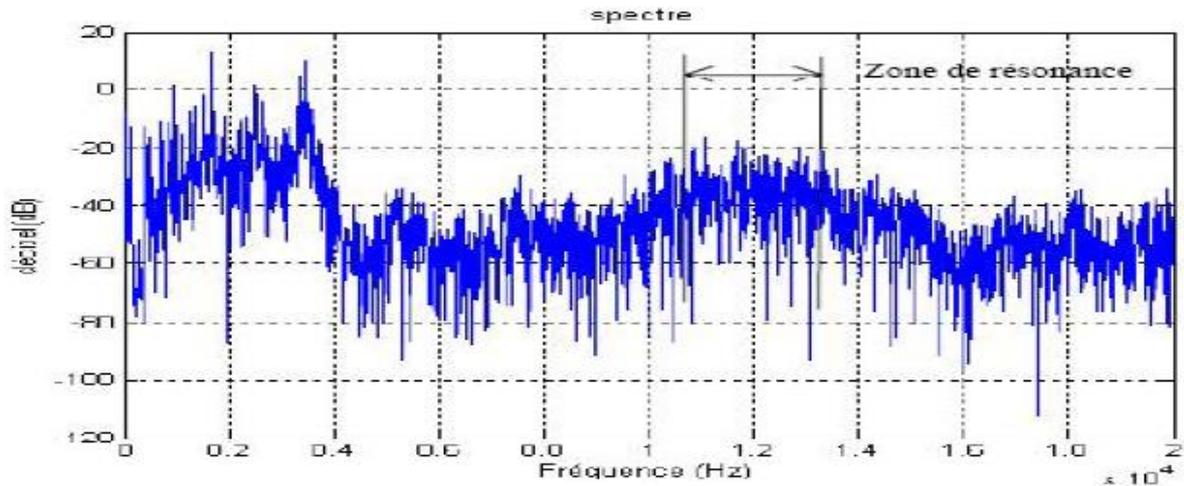


Figure 1.15. Densité spectrale de puissance effectuée sur un roulement avec un écaillage sur la bague extérieure à 34,75 H

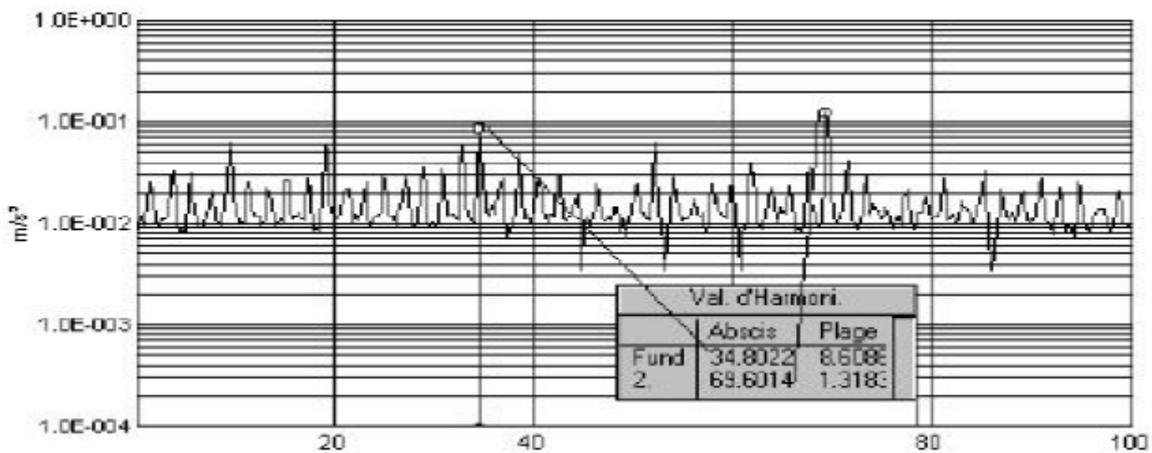


Figure 1.16. Spectre enveloppe (0 – 100 Hz). Visualisation du défaut de bague extérieure à 34,75 Hz

### I.3.2.3. Cepstre [13] [14]

C'est une méthode d'analyse qui a été développée pour le traitement de signal et qui a montré ses avantages par rapport à la transformée de Fourier rapide (FFT) dans certains cas.

Le cepstre a la capacité de détection des harmoniques et des bandes latérales, La figure (I.17) représente le cepstre provenant d'une boîte à vitesses.

Le cepstre est défini comme étant la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance :

$$C(\tau) = F^{-1}[\text{Log}_{10} s(f)] \tag{12}$$

La variable  $\tau$  qui a la dimension d'un temps est appelée quéfrence. [8]

La dénomination des concepts a été obtenue par permutation des lettres correspondant dans le champ fréquentiel (tableau [1.2]) :

Analyse spectrale	Analyses cepstrale
Spectre	Cepstre
Fréquence	Quéfrence
Harmonique	Rahmonique
Phase	Saphe
Filtre	Lifre

Tableau 1.2 Nomenclature entre spectre et cepstre

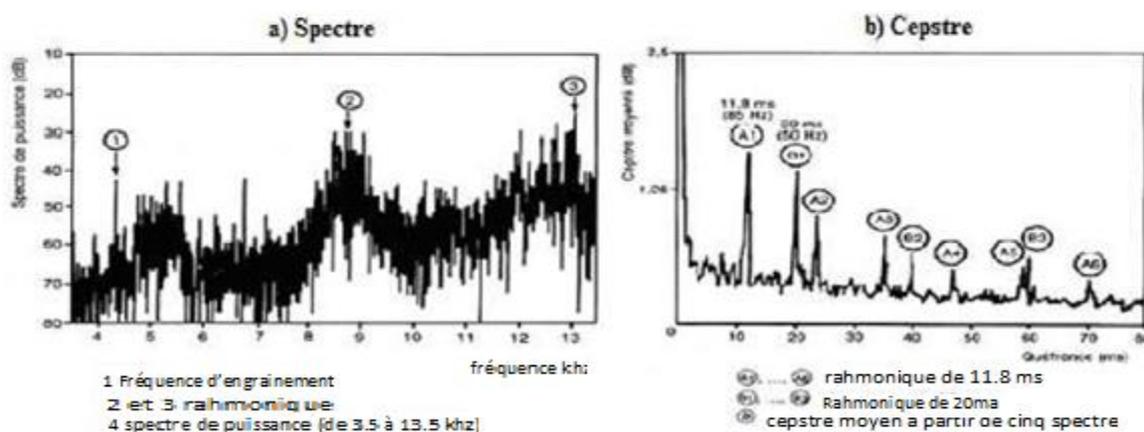


Figure 1.17. Exemple d'analyse cepstrale d'un signal vibratoire provenant d'une boîte à vitesses : a) Spectre, b) Cepstre [14] [15]

### I.3.3. Méthodes temps-fréquence

#### I.3.3.1. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (STFT Short-Time Fourier Transform)

Pour réaliser une analyse spectrale locale d'un signal  $f(t)$  autour d'un instant arbitraire  $0 t$ , il faudrait calculer une transformée de Fourier (TF) du voisinage immédiat de ce point. L'intégrale de Fourier nécessitant un temps d'intégration infini, cela suppose que l'aspect local soit introduit en n'observant le signal que dans un certain intervalle  $T$  proche de  $0 t$ , dans lequel on le considère comme stationnaire. Les fonctions sinusoïdales qui servent à décomposer le

signal dépendent à la fois du temps et de la fréquence. L'un des premiers à avoir appliqué ce principe aux transformées de Fourier est le physicien Dennis Gabor en 1940. On parle alors de transformées de Fourier à fenêtre glissante.

L'idée de base consiste à découper le signal en plages temporelles finies.

On réalise sur chaque plage, une analyse de Fourier. Cette analyse est donc dépendante de la localisation de la plage, la figure (1.18) donne un aperçu sur ce concept.



**Figure 1.18.** Principe et représentation de la STFT

### I.3.3.2. Transformée en ondelettes

La STFT utilise une fenêtre à largeur fixe, donc les hautes et les basses fréquences sont analysées avec la même résolution. Dans l'analyse en ondelettes on utilise des ondelettes qui ont la possibilité de translater et de se dilater. Donc chaque fréquence est analysée avec une résolution adaptée.

### I.3.3.3. 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 fonctions) 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. [16]

**I.4- Conclusion**

L'objectif de ce chapitre était de donner un aperçu des différents défauts des machines tournantes et les techniques, d'analyse vibratoire, utilisées dans le diagnostic de ces défauts. 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 ...).

Le chapitre deux sera consacré à une étude explicite de la décomposition EMD avec formulation mathématique et exemple détaillés. Une synthèse bibliographique des travaux utilisant l'EMD est également donnée à la fin du chapitre.

## *Chapitre II*

### ***Notions de base sur la Décomposition en mode empirique (EMD) et synthèse bibliographique***

« Le chapitre deux sera consacré à une étude explicite de la décomposition EMD avec formulation mathématique et exemple détaillés. Une synthèse bibliographique des travaux utilisant l'EMD est également donnée à la fin du chapitre. »

## II.1- Décomposition en modes empiriques (EMD) :

L'EMD est une méthode de décomposition du signal récente (initiée en 1998 par Norden Huang [16]) consistant à décomposer un signal en une somme finie de différents signaux, dits modes, oscillant de moins en moins vite. Cette méthode est réputée adaptative et ne dépendre que du signal de départ et non de choix arbitraires d'une banque fréquentielle. Cette transformation permet de séparer des modes du signal, fonctions centrées en zéro oscillant chacune dans une gamme de fréquence limitée. Pour les inventeurs de cette décomposition, cela permet de mieux comprendre des signaux en ne s'intéressant qu'à ceux ayant un sens lié au problème. Ainsi, pour étudier les fluctuations de température d'un océan en vue de conclure à un réchauffement, on peut ignorer les modes ayant une fréquence de l'ordre de l'heure, du jour, ou même du mois pour ne s'intéresser qu'à ceux dont la fréquence est de l'ordre de la dizaine d'années. Il est plus facile de comprendre la transformation en regardant les sommes partielles des modes en commençant par le dernier. On voit que le dernier mode est le signal vu à une échelle très grossière, et qu'en rajouter revient principalement à augmenter la résolution de la reconstruction. L'EMD est souvent considérée dans la littérature sous le nom de transformée de Hilbert-Huang. Il s'agit, une fois les modes extraits, de les écrire sous la forme  $a(t) \cos(\omega(t))$ , ce qui permet de représenter le signal de départ comme la fonction  $(t, \omega) \mapsto a$ , où l'un des modes du signal vaut en  $t$  :  $a \cos(\omega)$ . Cette représentation est donc en temps, fréquence et amplitude, l'a où la représentation induite par la transformée de Fourier par exemple, est en fréquence et amplitude

## II.2 Quelques définitions :

### II.2.1- 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 maxima et des minima respectivement. Il existe différentes méthodes d'interpolation pour les enveloppes. La plus utilisée est l'interpolation par spline cubique.

**II.2.2- 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

**II.2.3- 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.

**II.2.4- 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.

**II.2.5- 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.

**II.3- Principe de la méthode EMD :**

La méthode EMD est développée à partir de l'hypothèse simple que tout signal consiste en différents modes intrinsèques simples d'oscillations. Chaque mode linéaire ou non linéaire aura le même nombre d'extrêmes et de zéro-croisements. Chaque mode doit être indépendant des autres. De cette façon, chaque signal pourrait être décomposé en un certain nombre d'IMF. [17]

D'une autre façon, l'EMD postule que tout signal réel se décompose en une moyenne locale ou tendance locale «  $m$  » et une composante plus oscillante «  $d_1$  ». On a ainsi :

$$\mathbf{S = d_1 + m}$$

Considérons un signal  $S$ , l'EMD va le décomposer en une somme finie de modes oscillants. On pourra alors écrire :

$$\mathbf{S = \sum dk + r \quad Nk = 1}$$

Les modes oscillants  $dk$  appelés IMFs (Intrinsic Mode Function), sont des fonctions oscillantes autour de 0, et de moyenne locale nulle. Le résidu  $r$  est plutôt moins oscillant donc plus basse fréquence que  $dk$ , c'est-à-dire qu'il contient au plus 3 extrema.

### II.3.1- 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. [17]

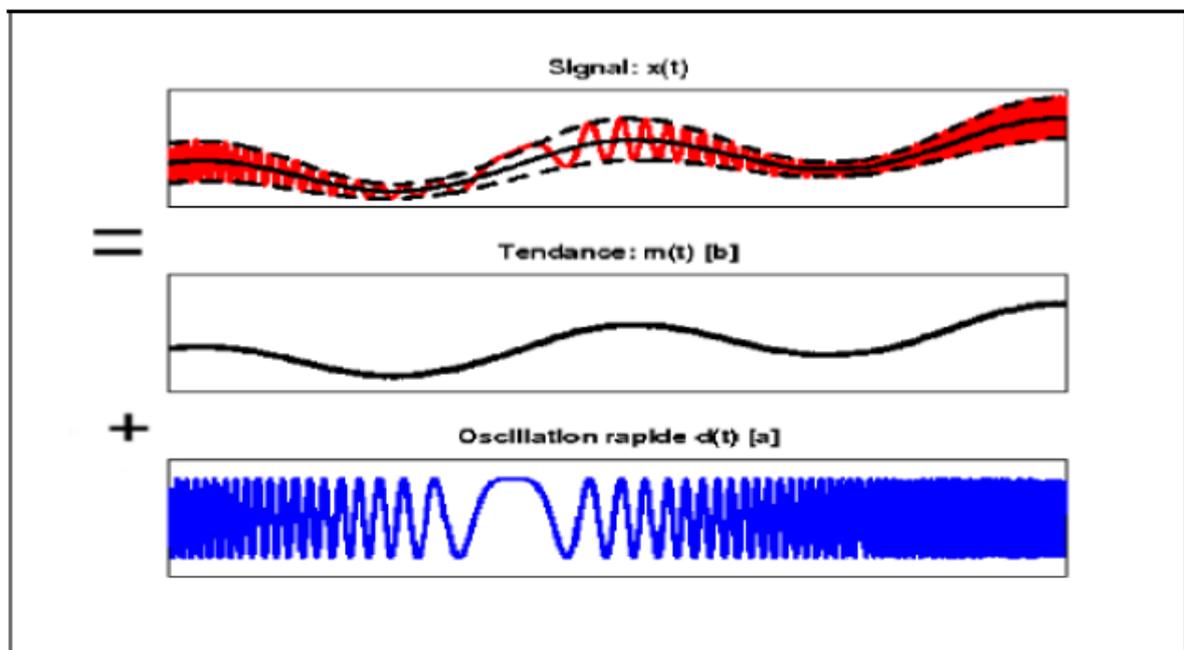


Figure 2.1. Principe de L'EMD : Oscillation rapide (a) oscillation lente (tendance) (b)

### II.3.2- Algorithme de L'EMD :

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

1. Identifier tous les extrema (maxima et minima) du signal  $x(t)$  ;
2. Calculer l'enveloppe supérieure et inférieure par interpolation par spline cubique des extrema 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  $C_n(t)$ . [18] [19]

La figure (II.2) montre l'organigramme détaillé de l'algorithme de l'EMD.

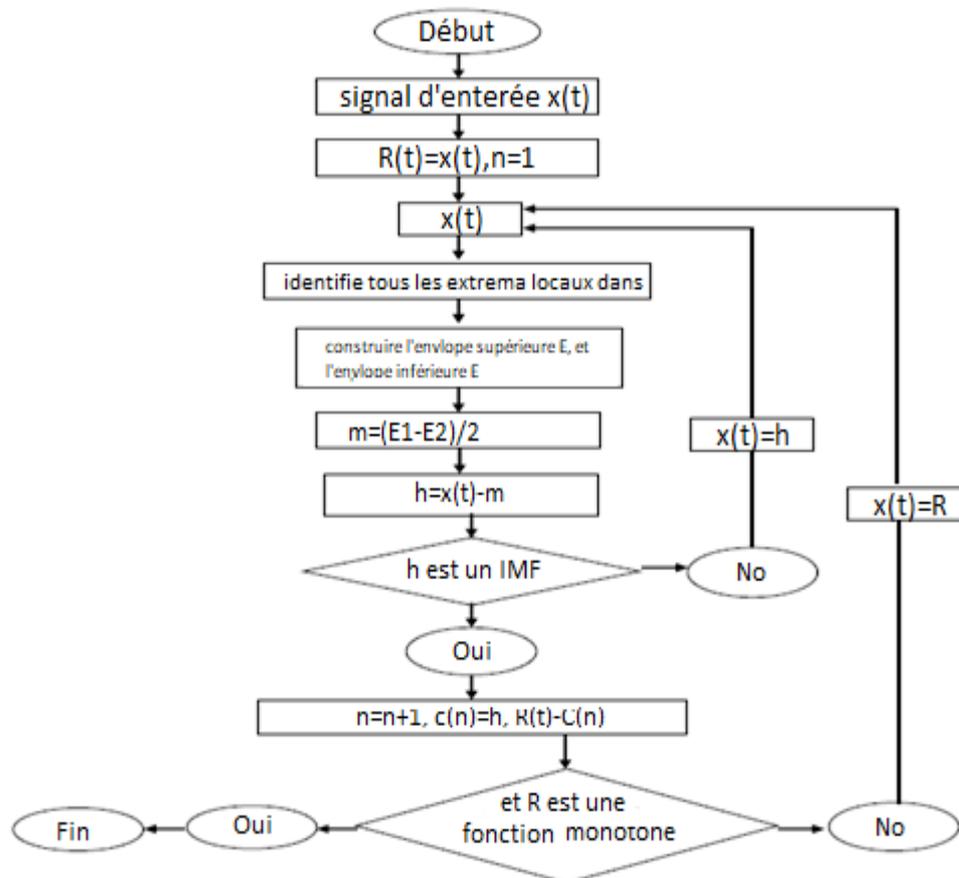


Figure 2.2. L'organigramme de la méthode EMD [19]

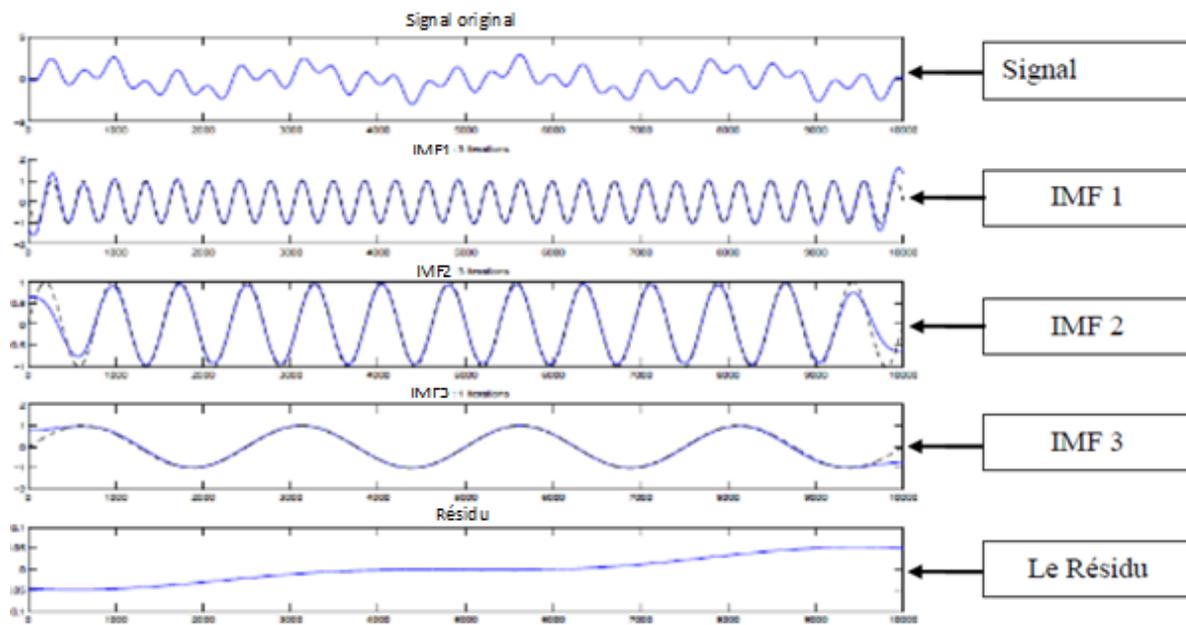
### II.3.3- Exemple d'application de l'EMD :

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

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

$$i=1$$

On applique la méthode EMD sur le signal  $S_I(t)$ , les résultats sont présentés dans la figure (II.3).



**Figure 2.3.** Décomposition du signal somme par EMD [20]

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).

### II.3.4- 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.

- 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 (II.4) montre le signal et ses constituants, la figure (II.5) montre le résultat de la décomposition de ce signal par l'EMD.

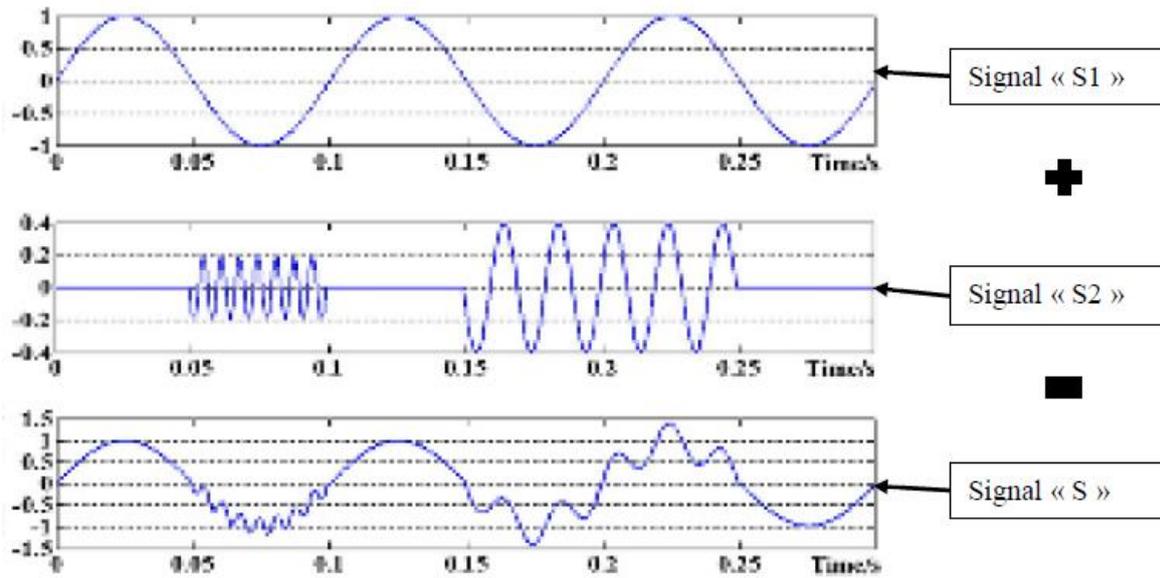


Figure 2.4. Signal original à décomposer [20]

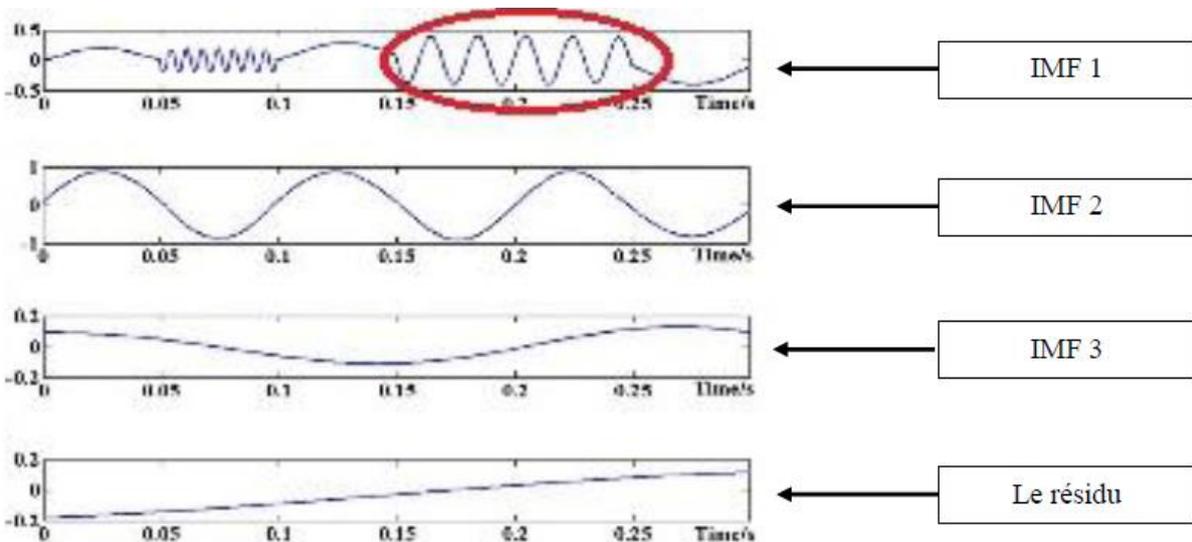


Figure 2.5. Résultats obtenus par application de l'EMD [20]

A partir de la figure (II.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.

#### **II.4- Synthèse bibliographique des travaux utilisant l'EMD pour la détection des défauts des machines tournantes**

Les premières applications de l'EMD pour la détection des défauts des machines tournantes, notamment ceux des roulements et des engrenages, remontent au début des années 2000, c'est-à-dire peu de temps après la mise en place de l'approche elle-même par Huang en 1998.

L'article de Dybala et al. [21] 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 tamissage 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 [22], l'approche EMD est utilisée pour la détection des défauts dans un générateur de puissance d'une centrale thermoélectrique. En utilisant l'EMD un signal complexe peut-être décomposé en un certain nombre de fonctions du mode intrinsèque (IMF : Intrinsic Mode Functions) sur la base de l'échelle de temps caractéristique local du signal. Les IMFs, travaillant comme les fonctions de base, représentent les modes d'oscillation intrinsèques incorporés dans le signal. Cependant, l'étude proposée dans cet article montre que les IMFs ne

parviennent pas toujours à révéler les caractéristiques du signal dû à l'effet de bruit. Ainsi, la fonction de mode combiné (CMF) est présentée.

Avec la CMF, l'IMF voisin est combiné pour obtenir un mode d'oscillations caractéristiques plus précis des signaux. Enfin, un signal réel mesuré sur un générateur de puissance d'une centrale thermoélectrique est analysé pour diagnostiquer le défaut en utilisant l'EMD et la CMF. Les résultats montrent que la méthode proposée peut extraire les caractéristiques des défauts des machines tournantes de manière efficace.

Dans une autre application réalisée par Djebala et al. [23] 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 Qiu et al. [24] 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.

L'analyse d'enveloppe classique est une méthode efficace pour la détection des défauts de roulements. Cependant, toutes les bandes des fréquences de résonance doivent être examinées au cours du processus de détection. Pour remédier à ce problème, une approche pour la sélection de la fréquence de résonance optimale a été proposée par Pan et al. [25]. Dans cet article la fréquence de résonance optimale est sélectionnée à l'aide de la transformée de Fourier à court terme. L'EMD est ensuite appliquée et l'IMF sélectionné est celui dont le spectre couvre cette fréquence de résonance. Une enveloppe calculée à partir de la transformée de Hilbert et un

spectre d'enveloppe sont par la suite calculés pour mettre en évidence la fréquence caractéristique du défaut. Cette étude tend à démontrer qu'il n'est pas toujours optimal de prendre l'IMF1 comme composante principale et que l'information peut être mieux mise en évidence par la sélection d'un IMF approprié. Les performances de l'approche proposée ont été testées sur des roulements avec double et triple défauts pour justifier sa supériorité par rapport à l'analyse d'enveloppe traditionnelle.

L'inconvénient majeur de l'EMD est le mode mixing, qui est défini comme une information résiduelle dans plusieurs IMFs qui rend le signal sans signification. Pour cela

Q. GAO et al. [26], ont présenté dans cet article une méthode basée sur la CMF (Combined Mode Function) qui aide à se débarrasser du mode mixing. L'idée est de combiner les IMFs voisines qui contiennent la même information pour obtenir un CMF plus précise et significative pour être traitée, de telle sorte que :

$$C_s = C_i + C_{i+1} + \dots + C_{i+m}$$

Où  $C_s$  est le CMF,  $C_i$  est le IMF ;  $1 \leq i \leq n - m$ ,  $n$  est le nombre maximal des IMFs.

La méthode CMF ainsi que les ondelettes combinées à l'FFT ont été appliquées sur un signal d'un générateur d'électricité d'une centrale thermique-électrique. Les résultats montrent que les ondelettes combinées à l'FFT n'ont pas pu extraire les caractéristiques du défaut, par contre la CMF l'a fait d'une manière effective, ce qui montre que la CMF augmente la précision de l'EMD. En réalité l'EMD est par nature une banque de filtres adaptatifs et la CMF est une méthode qui redessine cette banque de filtres c'est pourquoi elle fonctionne mieux.

Dans l'article de Kedadouche et al. [27] l'EMD a été appliquée pour la détection des défauts de roulements non pas sur des signaux vibratoires mais sur des signaux d'émission acoustique. Les indicateurs scalaires classiques ont été utilisés à l'image du kurtosis, du facteur de crête et du RMS. Des indicateurs spécifiques ont été également utilisés comme le thikat et le thalaf. Le travail consiste à calculer les indicateurs scalaires de tous les IMFs obtenus par l'EMD et voir l'IMF le plus représentatif. La sensibilité des indicateurs scalaires a été étudiée en fonction de plusieurs paramètres tels que la vitesse de rotation du roulement et la fréquence centrale.

L'étude montre que l'utilisation de l'EMD améliore considérablement la sensibilité des indicateurs scalaires comparés à ceux du signal brut.

Notons enfin qu'une synthèse très intéressante des travaux marquants utilisant l'EMD pour la détection des défauts dans les machines tournantes est présentée par Lei et al. [28]. Les auteurs ont pris en considération les articles qui ont utilisé plusieurs versions de l'EMD : l'EMD classique, l'EMD améliorée telle que l'EEMD (Ensemble EMD), et l'EMD combinée à d'autres méthodes.

Les applications présentées dans cet article synthèse concernent principalement les roulements, les engrenages, et d'autres applications

## **II.5- Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à donner un aperçu général sur la décomposition en modes empiriques (EMD). 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.

Dans le chapitre 3, on va utiliser l'application EMD pour la détection des défauts de roulements à partir de signaux mesurés sur le banc d'essais de « Bearing Data Center »

*Chapitre III*

**Application de l'EMD pour le  
diagnostic des défauts de roulements**

### III.1- Introduction

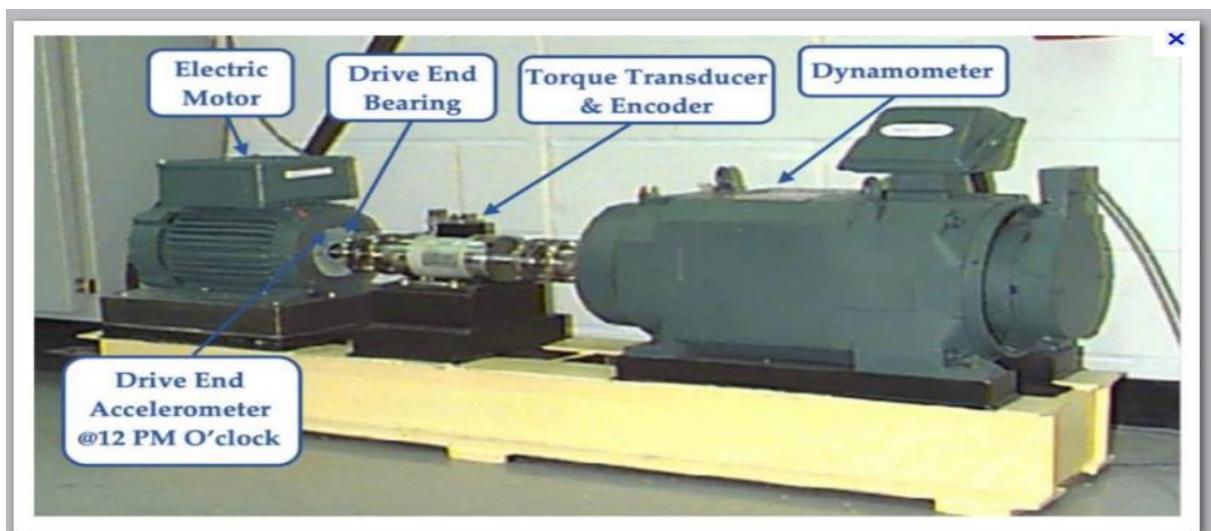
Dans ce chapitre, on va traiter l'application de l'EMD sur des signaux de roulements sains et endommagés prélevés sur un banc d'essais du centre 'Bearing Data Center'. Le but principal est de mettre à l'épreuve l'approche proposée sur des signaux réels (non simulés).

En deuxième lieu le chapitre comprend l'étude de l'influence de deux autres paramètres sur le comportement vibratoire du système étudié, à savoir la taille du défaut et la charge appliquée au roulement.

### III .2- Application sur le banc d'essais du centre « Bearing Data Center »

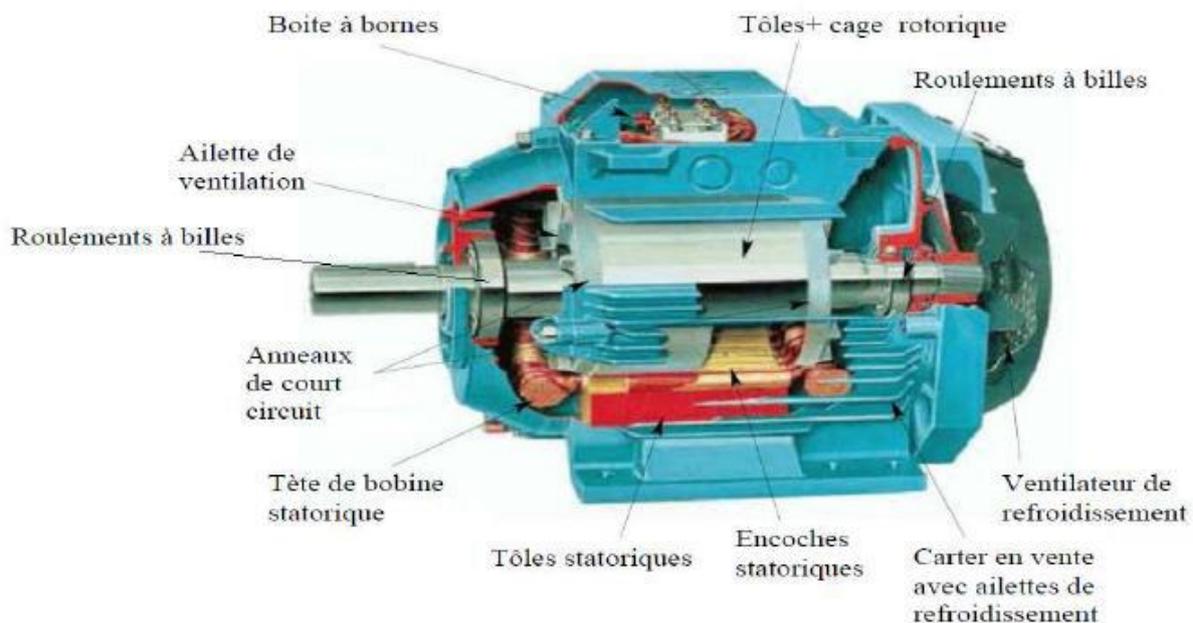
#### III.2.1 Présentation du banc d'essais [29]

Les signaux temporels utilisés dans ce chapitre proviennent de " the Case Western Reserve University- Bearing Data Center « ; base de données internationale des essais de roulements à billes. Les signaux de roulements sains et endommagés sont recueillis sur un banc d'essais très simple, composé d'un moteur, un accouplement et une génératrice (figure 3.1). De simples défauts sous forme de points, de différent diamètres et profondeurs, ont été créés sur les différents organes composants les roulements : sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille.



**Figure 3.1.** Banc d'essais de roulements

Les roulements testés soutiennent l'arbre du moteur des deux côtés (coté entraînement et coté ventilateur). La figure (3.2) représente une coupe sur le moteur électrique.



**Figure 3.2.** Coupe sur le moteur électrique

Les signaux ont été mesurés à l'aide d'accéléromètres fixés par aimant sur les deux côtés du moteur électrique. Les couples résistants utilisés sont respectivement 0, 1, 2, 3 Hp (Horse Power), ce qui donne respectivement des vitesses de rotation de 1797, 1772, 1750, 1730 tr/min. Les signaux sont échantillonnés à 12 KHz et chaque signal contient 243938 points (pour faciliter les calculs nous n'avons pris que les 5000 premiers points).

Dans ce travail les roulements que nous avons considéré sont montés du côté accouplement. Il s'agit de roulement à billes du type 6205-2RS JEM de la marque SKF dont les caractéristiques sont comme suit (en inch) : diamètre extérieur 2.0472, diamètre intérieur 0.984, largeur 0.5906, diamètre de la bille 0.3126. Des défauts sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille sont simulés avec différents diamètres : 0.007", 0.014", 0.021" et 0.028" (1" = 2.54 cm).

Les fréquences caractéristiques des défauts sont :

- ✓ Fréquence de la bague intérieure :  $f_{b_i} = 5.415.f_r$
- ✓ Fréquence de la bague extérieure :  $f_{b_e} = 3.584.f_r$
- ✓ Fréquence de la bille :  $f_b = 4.7135.f_r$

Les résultats sont regroupés sur le tableau (3.1).

	29.95HZ(0Hp)	29.53HZ(1Hp)	29.16HZ(2Hp)	28.83HZ(3Hp)
Bague intérieure	162.18HZ	159.9HZ	157.9HZ	156.11HZ
Bague extérieure	107.01HZ	105.83HZ	104.50HZ	103.32HZ
Billes	140.74HZ	139.18HZ	137.44HZ	135.89HZ

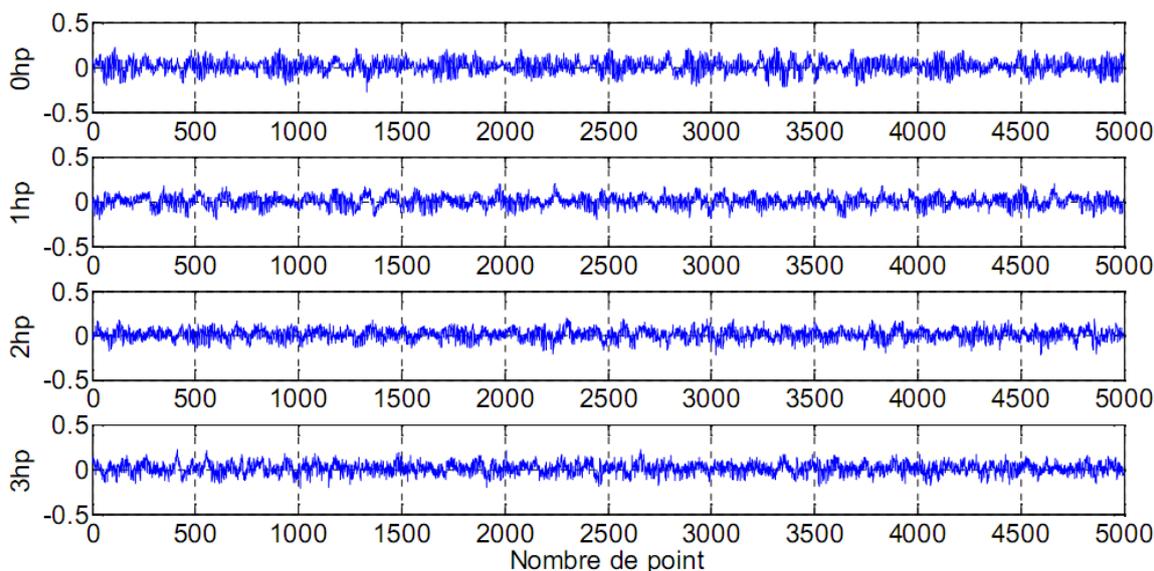
**Tableau 3.1.** Fréquences caractéristiques des défauts de roulement avec les différents couples résistants.

### III.2.2. Diagnostic des défauts à partir des signaux et spectres bruts

#### III.2.2.1 Mode de fonctionnement sans défauts (cas sain)

La figure (3.3) montre les signaux sains pour différents couples résistants, le kurtosis de tous les signaux montre des valeurs logiques et acceptables car elles varient entre 2.85 et 2.98 (voir annexe1), indiquant une distribution normale, donc une absence de défaut.

Les spectres des signaux sains sont montrés par la figure (3.4). Aucune informations particulières ne sont à signaler à l'exception des fréquences de rotation et de leurs harmoniques et les résonances du système.



**Figure 3.3.** Signaux du cas sans défauts pour différents couples résistants

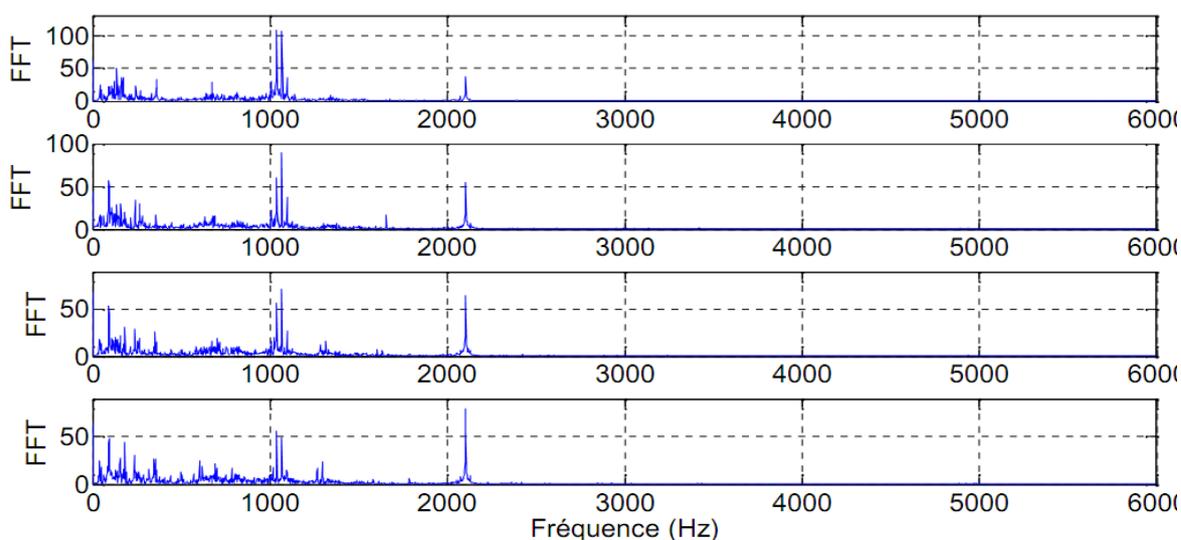


Figure 3.4. Spectres du cas sans défaut pour différents couples résistants

### III.2.2.2 Mode de fonctionnement avec défaut sur la bague extérieure (0.007")

La figure (3.5) montre les signaux mesurés dans le cas d'un défaut de 0.007" sur la bague extérieure et pour différents couples résistants. Nous constatons que pour les quatre couples résistants considérés, des impacts périodiques sont très visibles sur les signaux. Le kurtosis étant entre 7.4749 et 8.0035 confirme bien la nature impulsive de ces signaux (voir annexe2). La figure (3.6) montre les spectres de ces signaux. La remarque essentielle est l'existence de modulations très visibles dans les hautes fréquences (entre 2500 Hz et 4000 Hz). Ces modulations n'existaient pas sur les spectres du mode de fonctionnement sans défaut. Une analyse minutieuse de ces spectres montre que ces modulations sont espacées de la fréquence caractéristique du défaut et confirme bien l'existence d'un défaut sur la bague extérieure. Exemple pour le spectre correspondant à une charge de 0 hp, 3445 Hz - 3337 Hz donne à peu près 108 Hz ce qui correspond à la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague extérieure.

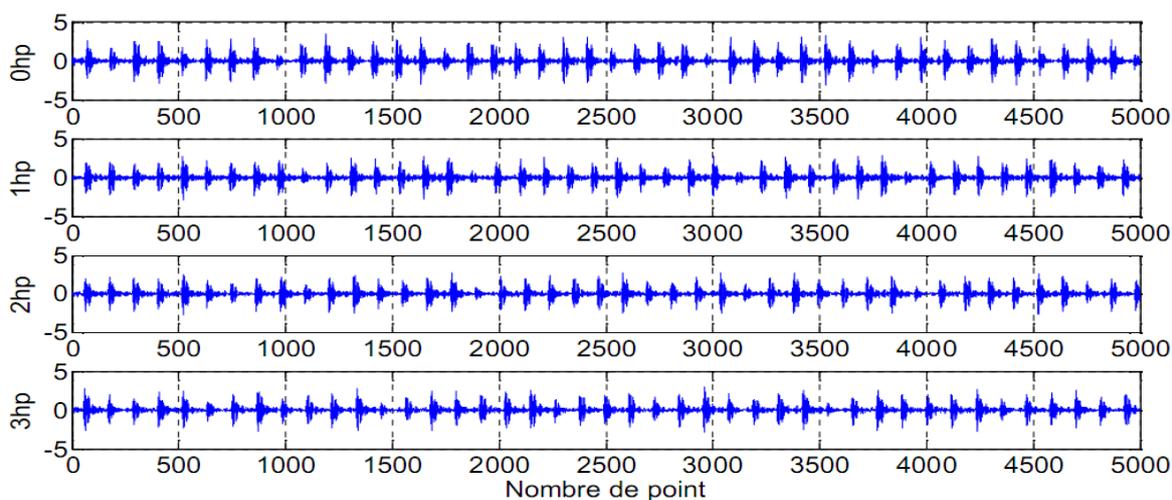


Figure 3.5. Signaux du mode de fonctionnement avec un défaut de 0.007" sur la bague extérieure pour différents couples résistants

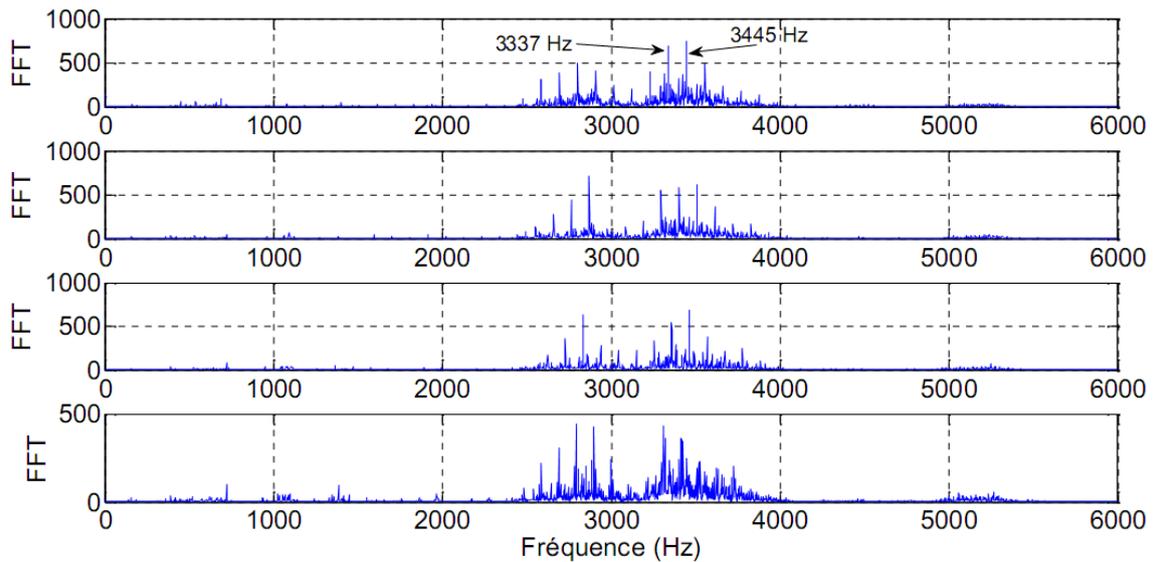


Figure 3.6. Spectres du mode de fonctionnement avec un défaut de 0.007" sur la bague extérieure pour différents couples résistant

### III.2.2.3 Mode de fonctionnement avec défaut sur la bague intérieure (0.014")

La figure (« 3.7) montre les signaux mesures dans le cas d'un défaut de 0.014" sur la bague intérieure et pour différents couples résistants. Nous constatons que pour les quatre couples résistants considérés, des impacts périodiques sont très visibles sur les signaux. Le kurtosis étant entre 16.5979 et 27.6835 confirme bien la nature impulsive de ces signaux (voir annexe3). La figure (3.8) montre les spectres de ces signaux. La remarque essentielle est la même que pour le cas du défaut sur la bague extérieure, a savoir l'existence de modulations très visibles dans les hautes fréquences (entre 2500 Hz et 4000 Hz). L'extraction de la fréquence caractéristique est dans ce cas beaucoup plus difficile que le cas précédent mais on peut toutefois le faire. Exemple 3532 Hz – 3371 Hz donne 161 Hz.

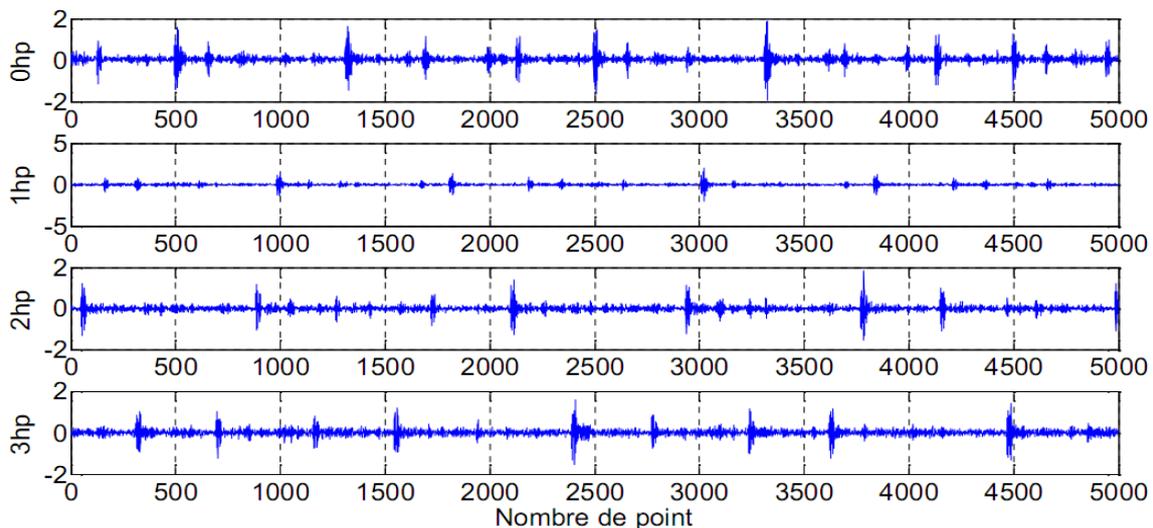
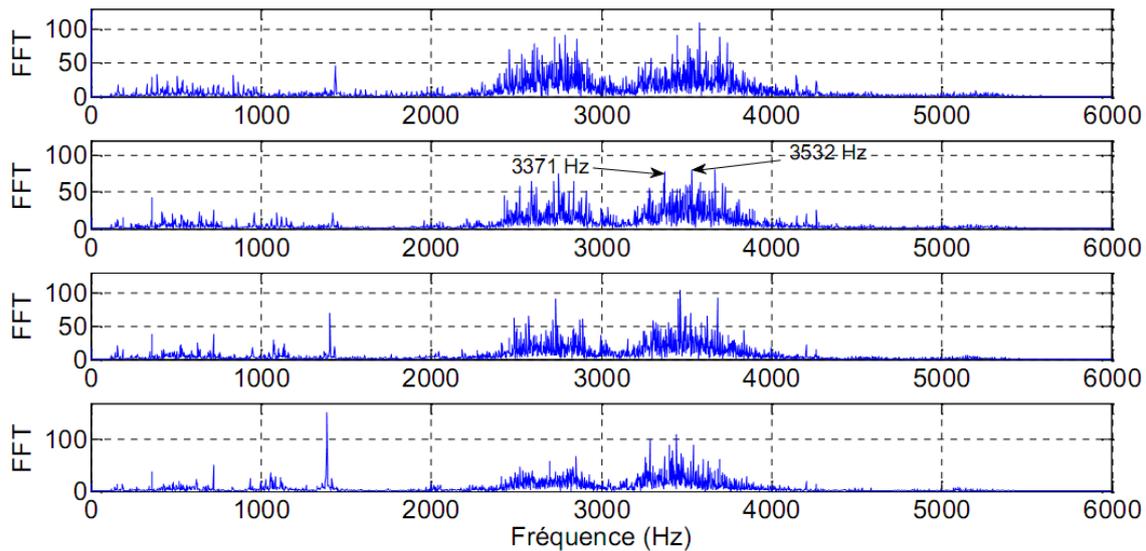


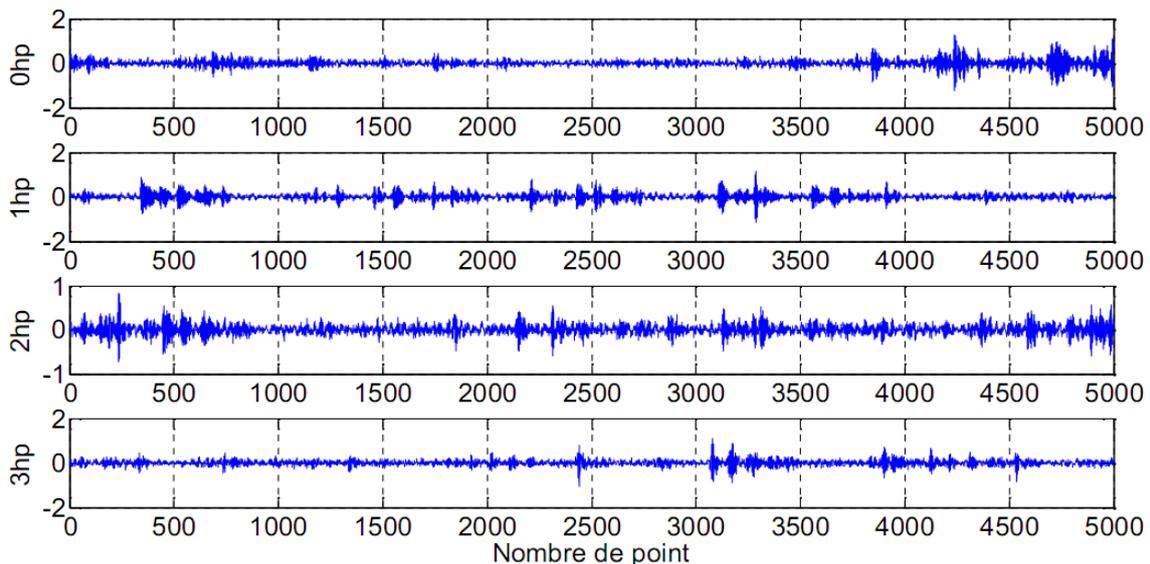
Figure 3.7. Signaux dans le cas d'un mode de fonctionnement avec défaut de 0.014" sur la bague intérieure pour différents couples résistants



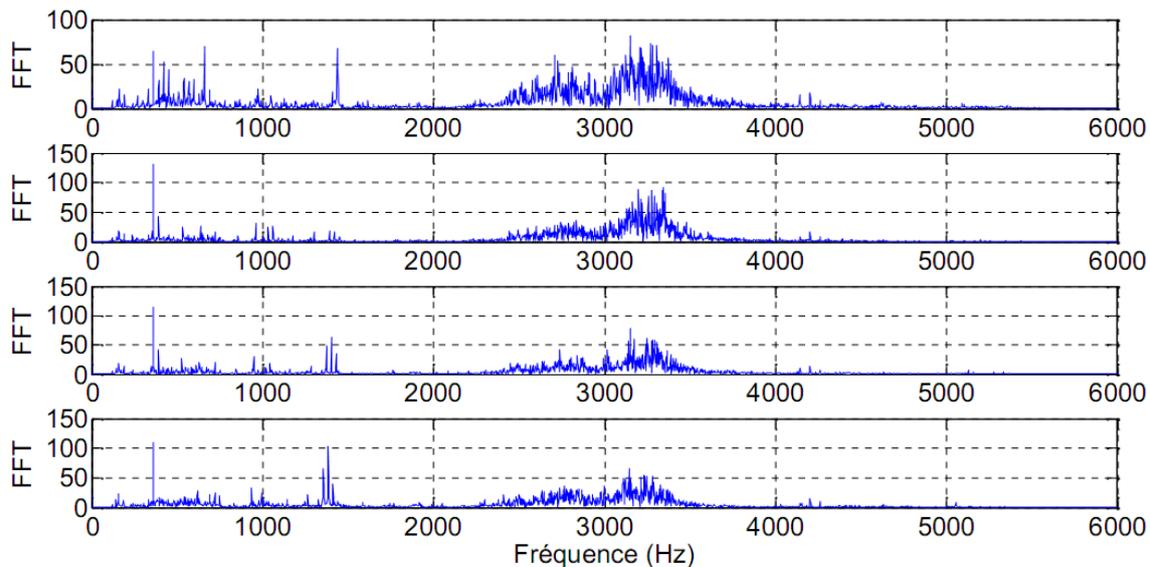
**Figure 3.8.** Spectres dans le cas d'un mode de fonctionnement avec défaut de 0.014" sur la bague intérieure pour différents couples résistants

### III.2.2.4 Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bille (0.021")

Les mêmes constatations précédentes sont à signaler pour le cas d'un défaut sur la bille, sauf que dans ce cas les impacts sont moins clairs sur les signaux (figure 3.9). Le kurtosis étant entre 3.0506 et 27.6835 confirme bien la nature impulsive de ces signaux (voir annexe4). et l'extraction de la fréquence caractéristique est quasiment impossible à détecter aussi sur les spectres de la figure (3.10).



**Figure 3.9.** Signaux dans le cas d'un mode de fonctionnement avec défaut de 0.021" sur la bille pour différents couples résistants



**Figure 3.10.** Spectres dans le cas d'un mode de fonctionnement avec défaut de 0.021" sur la bille pour différents couples résistants

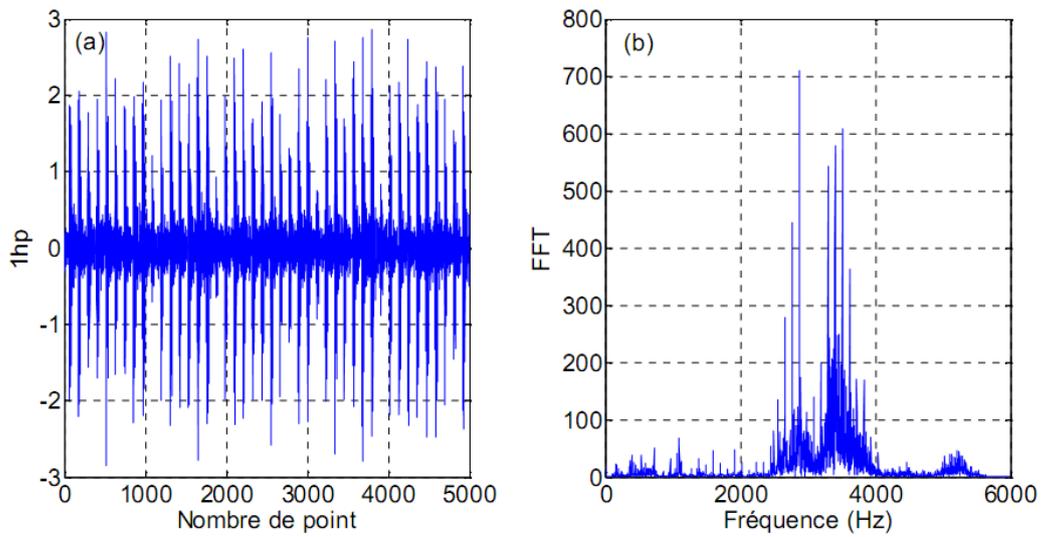
### III.2.3. Diagnostic des défauts du banc d'essais par application de l'EMD

#### III.2.3.1. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bague extérieure (0.007")

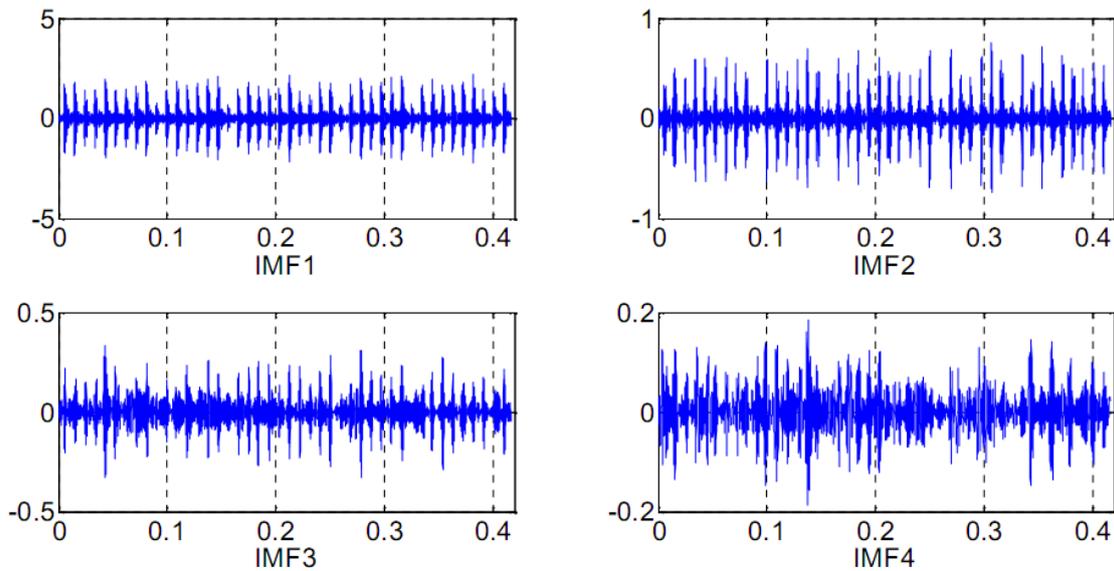
On va analyser un signal d'un défaut sur la bague extérieure de 0.007" et un couple résistant de 1 HP. La figure (3.11) montre le signal et son spectre. Le signal montre bien des impacts périodiques dus au défaut. Le spectre lui aussi montre des modulations dont nous avons parlé dans la section (2.2.2). Le signal est décomposé par l'EMD en plusieurs IMFs, la figure (3.12) montre les quatre premiers. L'histogramme de la figure (3.13) montre que l'IMF2 a le plus grand kurtosis (7.8896). Cet IMF a été donc sélectionné et un spectre d'enveloppe a été calculé par la transformée de Hilbert. Ce spectre met en évidence clairement la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague extérieure (105.6 Hz) et plusieurs de ses harmoniques (figure 3.14).

#### Remarque :

- Un autre programme est conçu sous l'environnement Matlab pour le calcul et la visualisation du spectre d'enveloppe d'un signal, et aussi pour le calcul du spectre du signal et la visualisation (Annexe 5).
- Un programme est conçu sous l'environnement Matlab pour la décomposition d'un signal en mode empirique (Annexe 6 et 7).



**Figure 3.11.** (a) Signal mesuré et (b) Son spectre, pour un défaut de 0.007'' sur la bague extérieure et un couple résistant de 1hp



**Figure 3.12.** Les quatre premiers IMFs du signal d'un défaut sur la bague extérieure(0.007'')

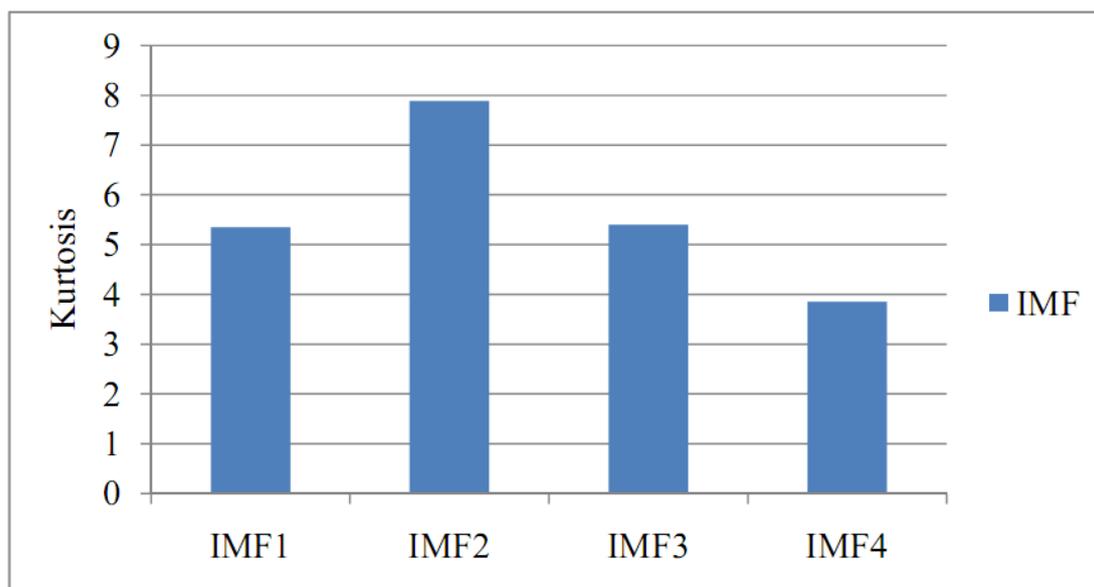


Figure 3.13. Kurtosis des IMFs du signal du défaut sur la bague extérieure (0.007")

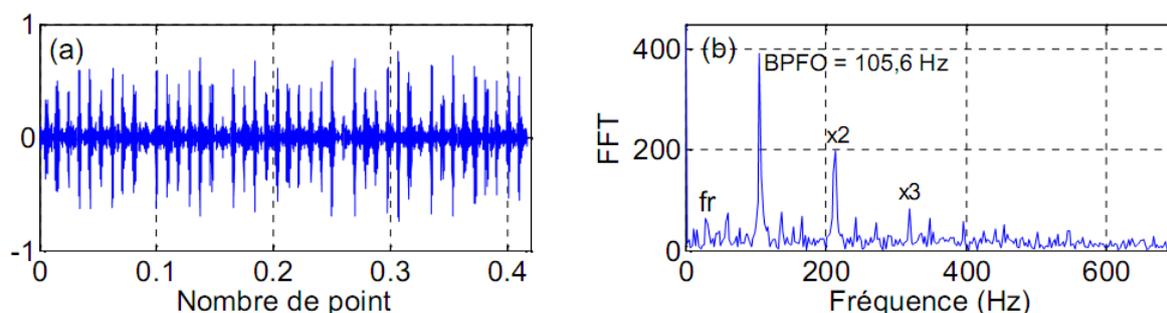
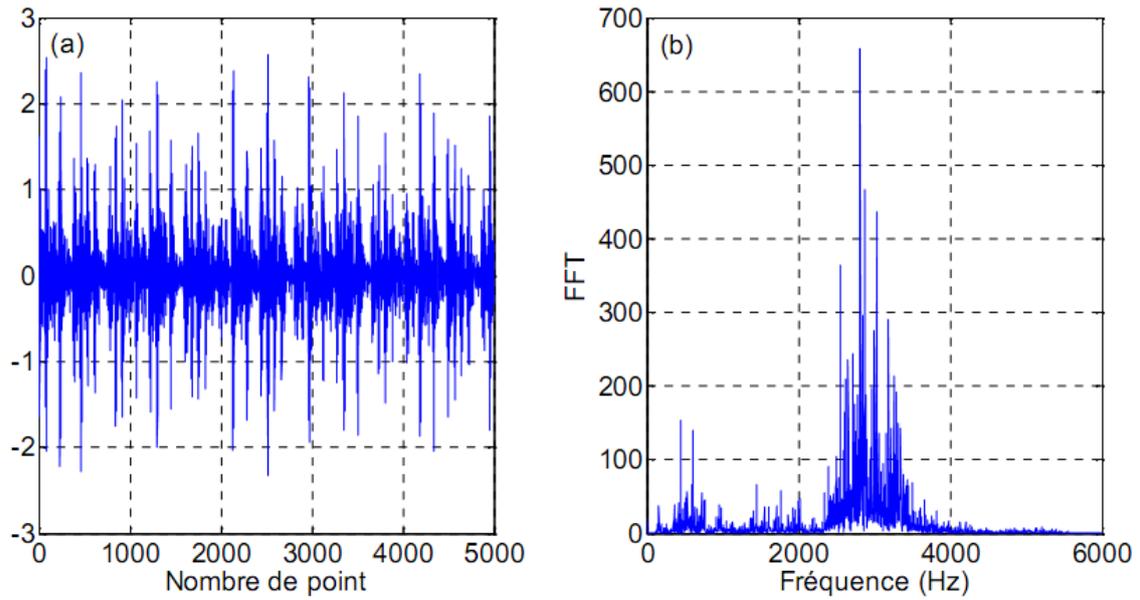


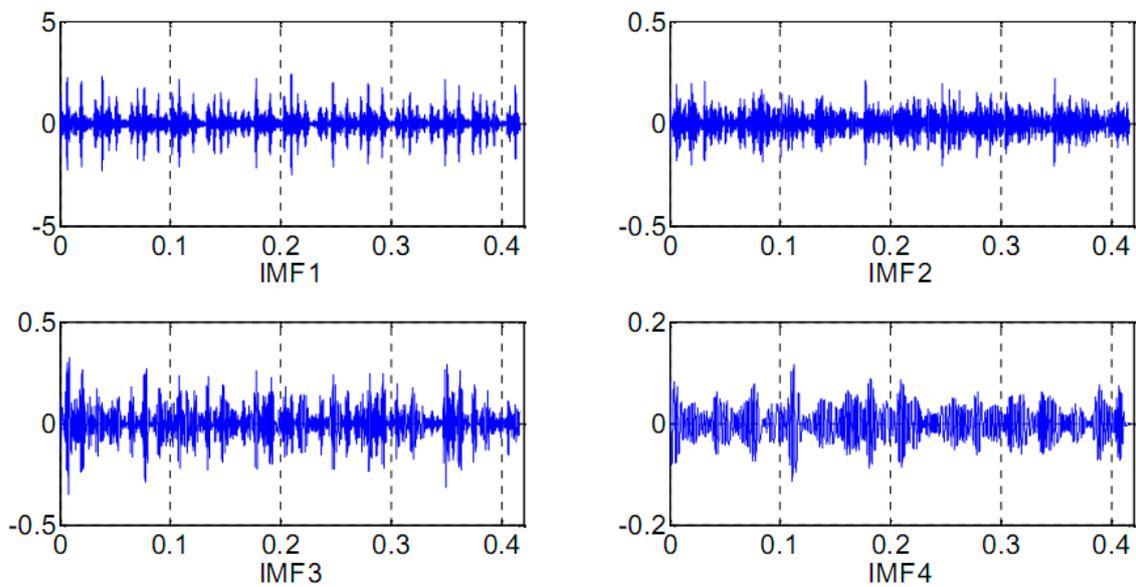
Figure 3.14. (a) IMF2 et (b) Son spectre d'enveloppe du signal du défaut sur la bague extérieure (0.007")

### III.2.3.2. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bague intérieure (0.021")

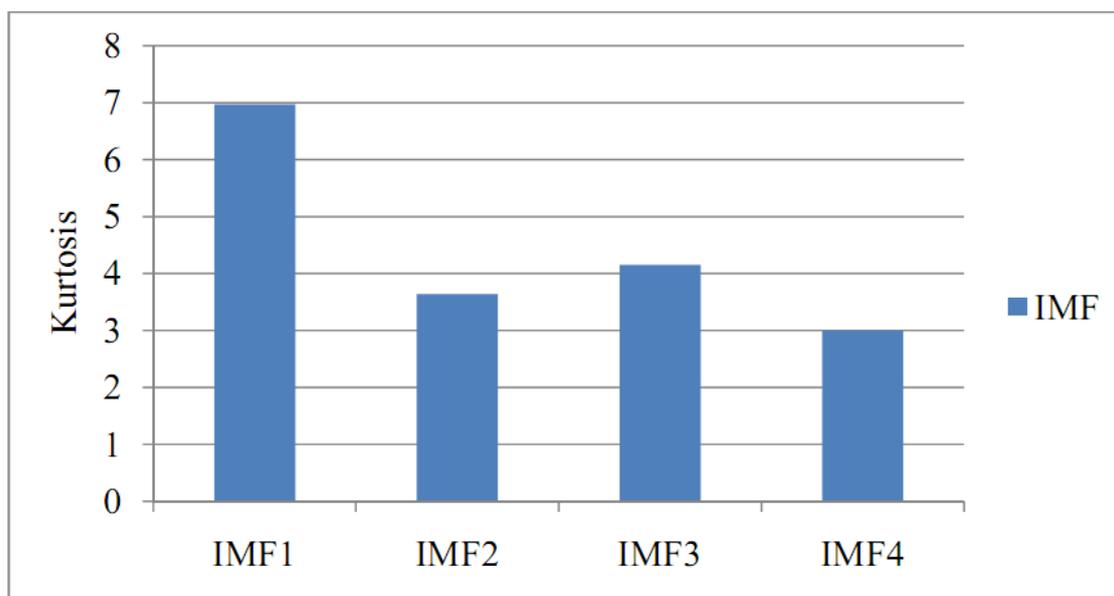
Dans ce cas on considère un signal mesuré dans le cas d'un défaut de 0.021" sur la bague intérieure et pour un couple résistant de 2 hp. L'application de la même démarche d'auparavant (section 3.2.1) permet d'aboutir enfin, grâce au spectre d'enveloppe de l'IMF sélectionné, à la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague intérieure et plusieurs de ses harmoniques. La figure (3.15) montre le signal et son spectre. Le signal montre bien des impacts périodiques dus au défaut. Le spectre lui aussi montre des modulations dont nous avons parlé dans la section (2.2.2). Le signal est décomposé par l'EMD en plusieurs IMFs, la figure (3.16) montre les quatre premiers. L'histogramme de la figure (3.17) montre que l'IMF2 a le plus grand kurtosis. Cet IMF a été donc sélectionné et un spectre d'enveloppe a été calculé par la transformée de Hilbert. Ce spectre met en évidence clairement la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bague intérieure (157.9Hz) et plusieurs de ses harmoniques (figure 3.18).



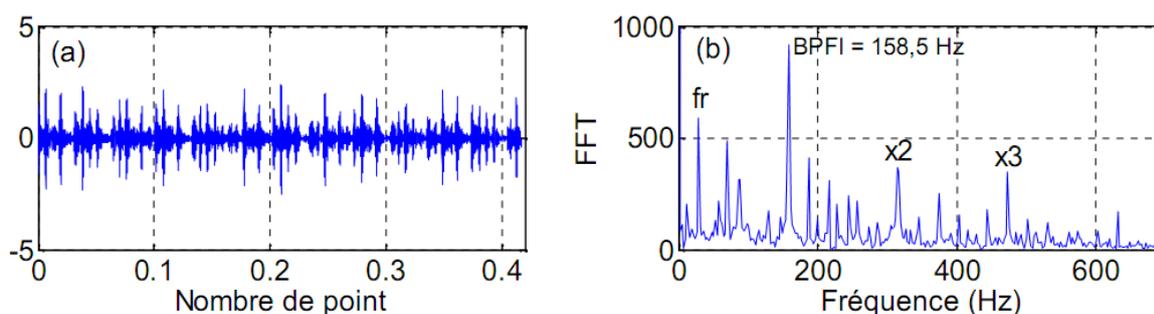
**Figure 3.15.** (a) Signal mesuré et (b) Son spectre, pour un défaut de 0.021" sur la bague intérieure pour un couple résistant de 2hp



**Figure 3.16.** Les quatre premiers IMFs du signal d'un défaut de 0.021" sur la bague intérieure pour un couple résistant de 2hp



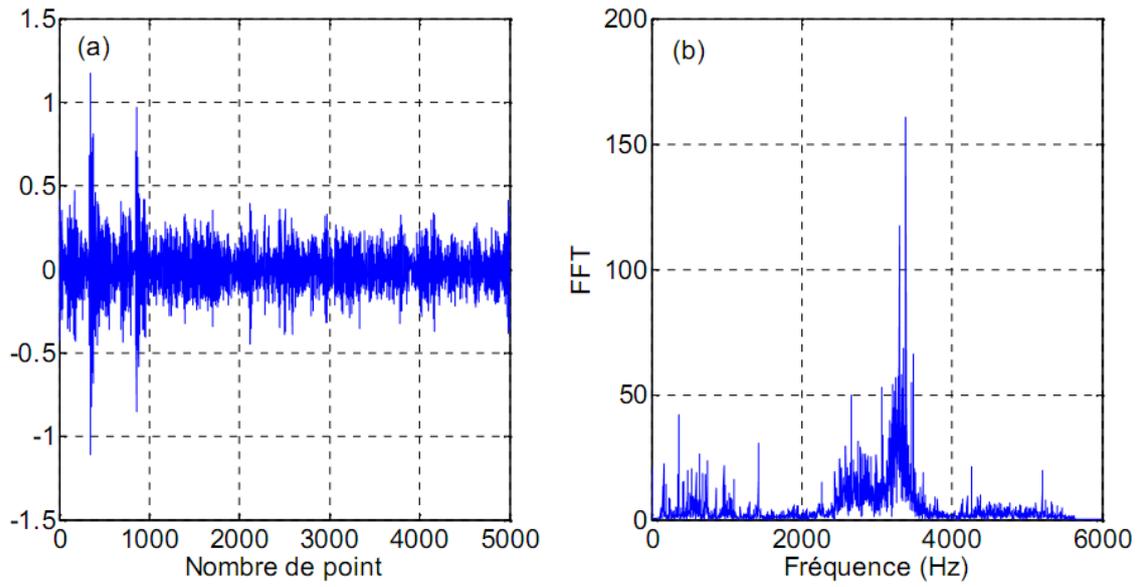
**Figure 3.17.** Kurtosis des IMFs du signal d'un défaut de 0.021" sur la bague intérieure pour un couple résistant de 2hp



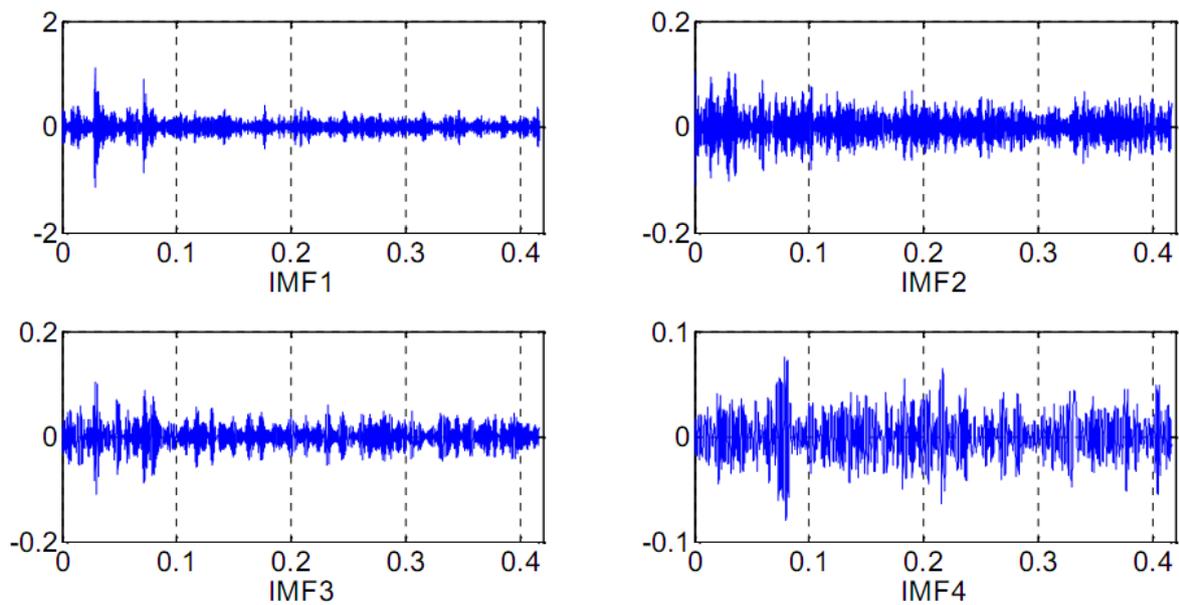
**Figure 3.18.** (a) IMF1 du signal d'un défaut de 0.021" sur la bague intérieure pour un couple résistant de 2hp et (b) Son spectre d'enveloppe.

### III.2.3.3. Mode de fonctionnement avec un défaut sur la bille (0.021")

Le dernier mode étudié concerne un défaut sur la bille. La figure (3.19) montre le signal mesuré et son spectre pour un couple résistant de 1hp et un diamètre du défaut de 0.021". La figure (3.20) montre le résultat de l'EMD de ce signal en quatre IMFs. L'IMF1 est celui où on enregistre un kurtosis maximal (9.76) comme indiqué dans la figure (3.21). Un spectre d'enveloppe est donc calculé à partir de ce signal (figure 3.22). Le spectre d'enveloppe met clairement en évidence la fréquence caractéristique d'un défaut sur la bille et plusieurs de ses harmoniques (141.7 Hz).



**Figure 3.19.** (a) Signal mesuré et (b) Son spectre, pour un défaut de 0.021" sur la bille et un couple résistant de 1hp



**Figure 3.20.** IMFs du signal d'un défaut de 0.021" sur la bille et un couple résistant de 1hp

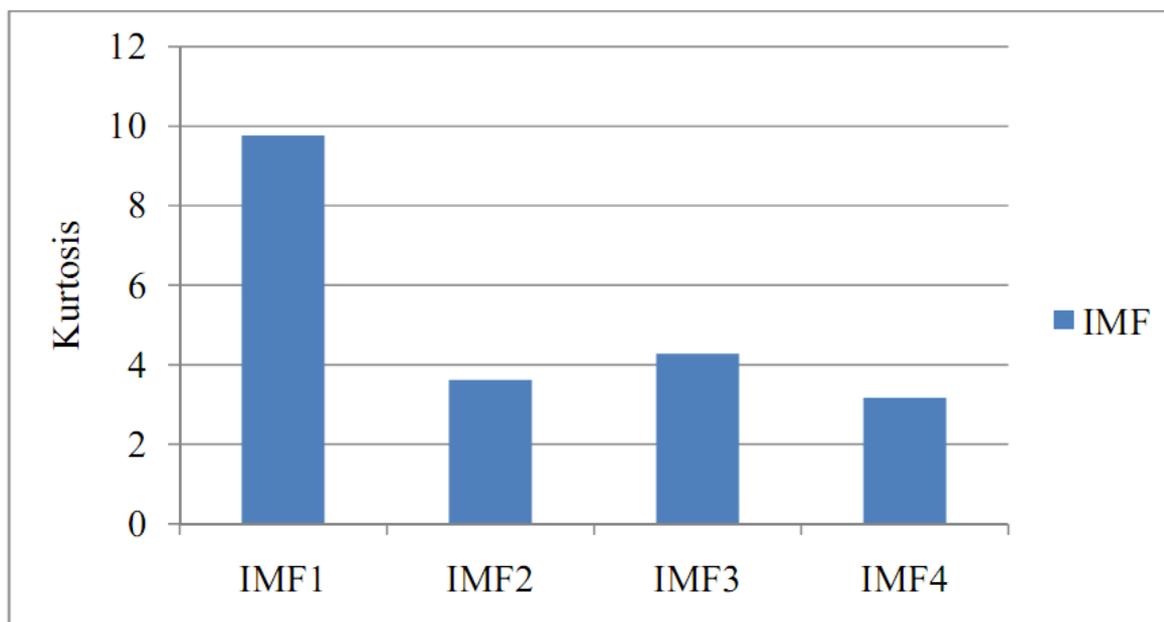


Figure 3.21. Kurtosis des IMFs d'un signal avec défaut de 0.021" sur la bille et un couple résistant de 1hp

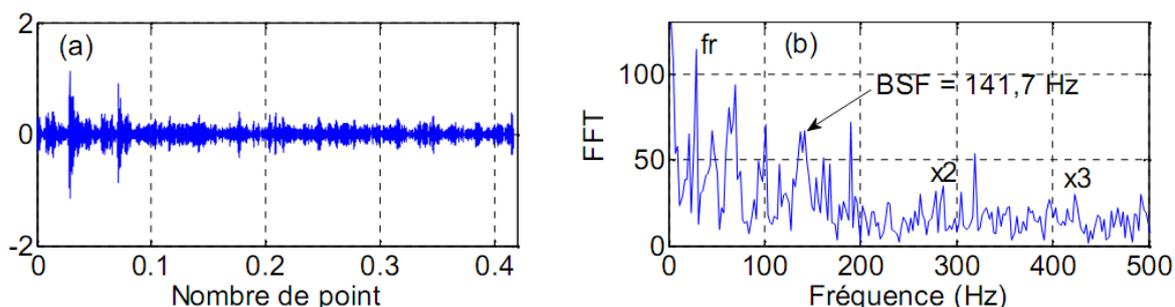
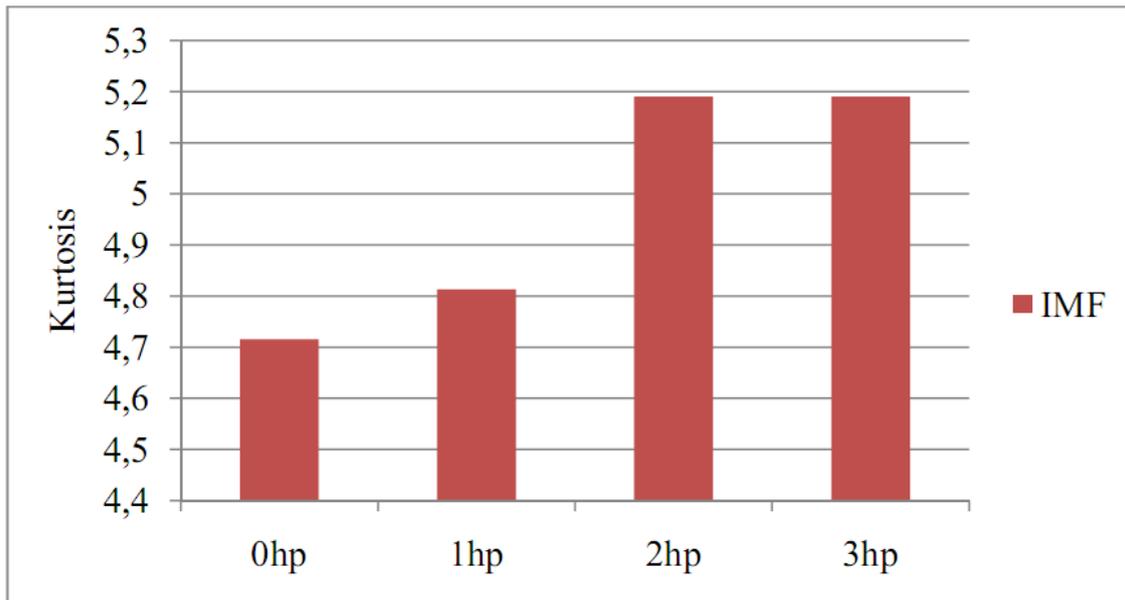


Figure 3.22. (a) IMF1 d'un défaut de 0.021" sur la bille et un couple résistant de 1hp et (b) Son spectre d'enveloppe

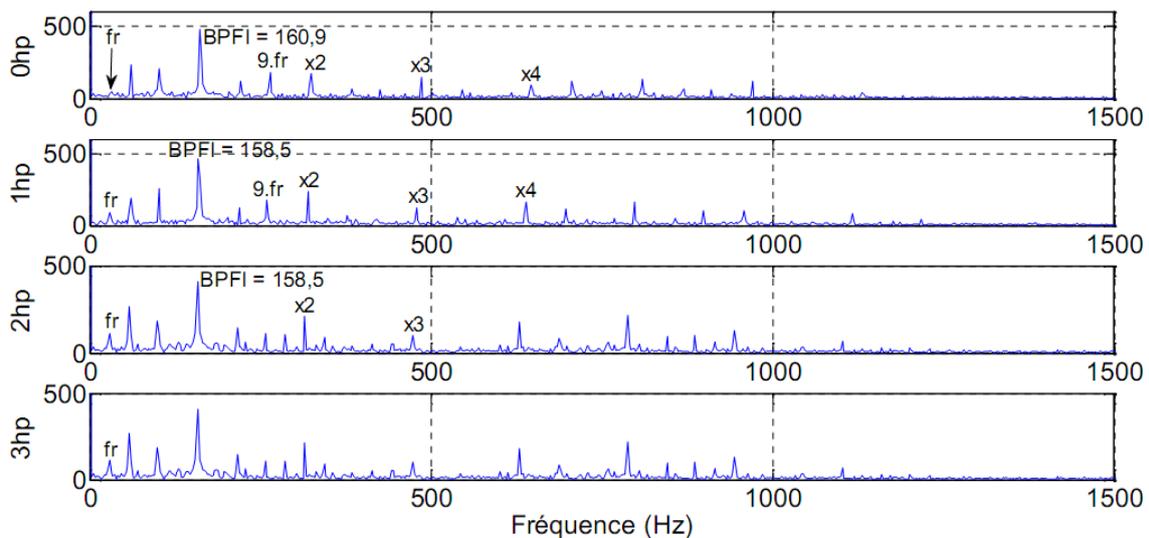
### III.2.4. Etude de l'effet de la charge et de la taille du défaut

#### III.2.4.1. Effets de la charge

L'objectif de cette section est de voir si la charge appliquée sur le roulement a une influence sur la détection. La figure (3.23) montre la variation du kurtosis de l'IMF optimal pour les quatre charges considérées et ceci dans le cas d'un défaut de 0.007" sur la bague intérieure. On constate clairement que le kurtosis augmente avec l'augmentation de la charge, donc la détection est beaucoup plus évidente lorsque le roulement est chargé. La figure (3.24) montre les spectres d'enveloppe des IMFs sélectionnés. En domaine fréquentiel il est difficile de voir l'influence de la charge puisque pour les différents couples résistants la fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques sont claires sur les spectres d'enveloppe.



**Figure 3.23.** Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la charge (couple résistant) pour un défaut de 0.007" sur la bague intérieure

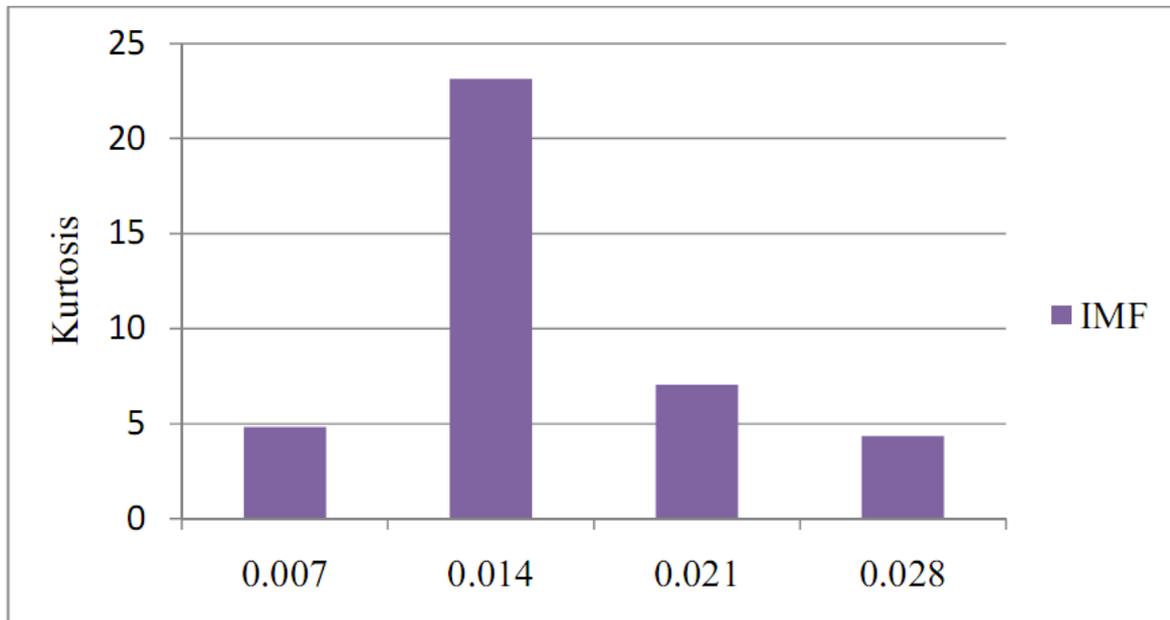


**Figure 3.24.** Spectres d'enveloppe des IMFs sélectionnés en fonction de la charge (couple résistant) pour un défaut de 0.007" sur la bague intérieure

### III.2.4.2. Effets de la taille du défaut

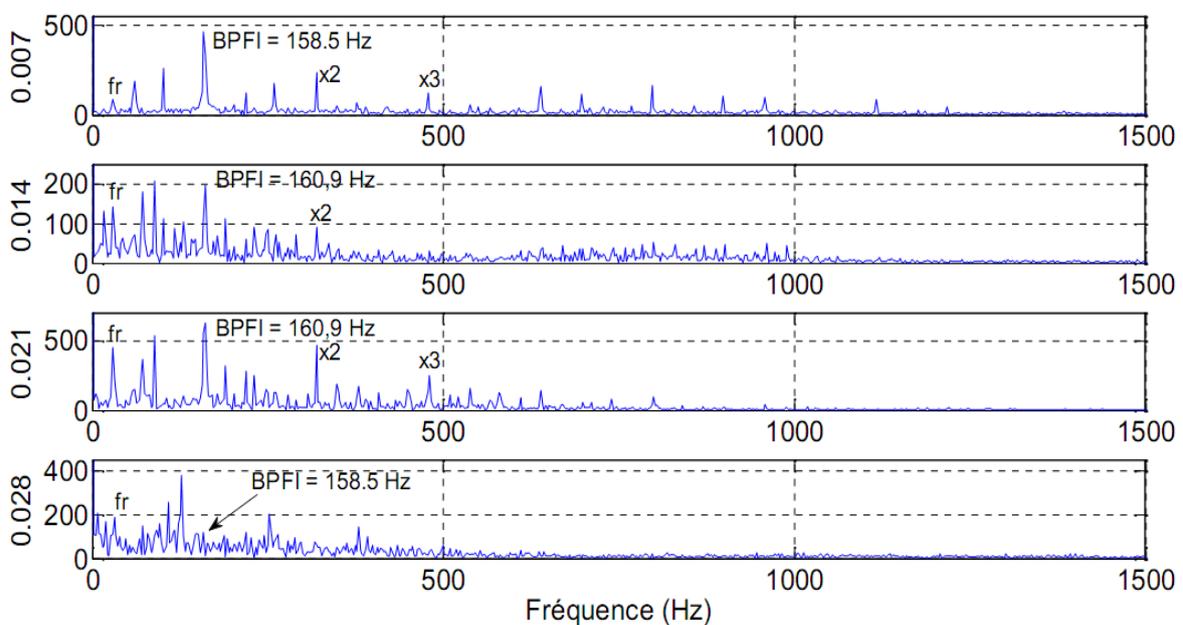
La figure (3.25) montre le kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille du défaut et ceci dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec un couple résistant de 1 hp. On constate que le kurtosis augmente de 4.81 pour un défaut de 0.007" jusqu'à 23.14 pour un défaut de 0.014" ce qui est parfaitement logique. Le kurtosis décroît ensuite à 7.03 pour un défaut de 0.021" et décroît plus à 4.35 pour un défaut de 0.028". Cette tendance est en parfaite concordance avec la littérature puisque le kurtosis augmente avec l'augmentation de la taille du

défaut jusqu'à ce que la taille devient excessivement grande ou le kurtosis chute et ceci constitue l'inconvénient majeur du kurtosis.



**Figure 3.25.** Kurtosis des IMFs sélectionnés en fonction de la taille de défaut pour un défaut sur la bague intérieure et un couple résistant de 1hp

La figure (3.26) montre les spectres d'enveloppe des IMFs précédents. On constate la fréquence caractéristique du défaut sur la bague intérieure, par contre cette fréquence est quasiment absente sur le spectre d'enveloppe correspondant à une taille de 0.028" ce qui confirme les conclusions précédentes issues de la variation du kurtosis.



**Figure 3.26.** Spectres d'enveloppe des IMFs en fonction de la taille du défaut

### III.3. Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'application de l'EMD pour la détection des défauts de roulements à partir de signaux mesurés sur le banc d'essais de « Bearing Data Center ». Les résultats montrent la validité et l'efficacité de la méthode proposée à détecter les différents types de défaut disponibles sur la base de données, à savoir défaut sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille.

L'étude de l'effet de la charge montre que le kurtosis augmente avec l'augmentation du couple résistant, c'est-à-dire que la détection du défaut est plus évidente en temporel pour des charges élevées, bien qu'en domaine fréquentiel cette différence n'était pas visible.

Concernant la taille du défaut les résultats montrent la tendance classique du kurtosis qui augmente avec l'augmentation de la taille du défaut mais qui décroît une fois cette taille devient excessive. Cette remarque a été validée en domaine fréquentiel.

***CONCLUSION GENERALE***

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au diagnostic des défauts liés aux roulements. Les roulements sont l'un des éléments de base de presque toutes les machines tournantes. L'importance des roulements ne peut être sous-estimée, car ce sont les composants des machines tournantes les plus susceptibles de tomber en panne et nécessitent une détection et un diagnostic précoces de ces pannes.

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'application d'une technique récente de traitement de signal appelée « Décomposition en Mode Empirique(DME)» ou «Empirical Mode Decomposition (EMD)» en Anglais pour la détection des défauts de roulements. Le travail a été entièrement réalisé sur des signaux expérimentaux mesurés sur des roulements sains et défectueux dans différentes configurations. Plusieurs paramètres ont été pris en considération notamment, la vitesse de rotation du roulement, la charge (couple résistant) et la taille du défaut. Les signaux traités ont été mesurés sur le banc d'essais « Bearing Data Center ».

L'application de la Décomposition en Mode Empirique sur un nombre considérable de signaux a permis de mettre en évidence les performances de cette méthode en domaine temporel et fréquentiel. En temporel le gain apporté par la méthode proposée est quantifié par le kurtosis, tandis qu'en domaine fréquentiel la fréquence caractéristique du défaut est mise en évidence par le spectre d'enveloppe. Donc l'approche proposée combine l'EMD, le kurtosis et la transformée de Hilbert. L'étude de l'influence des paramètres variés a permis de cerner les conditions optimales d'utilisation de la méthode proposée afin de permettre la détection la plus fiable et la plus précoce possible.

Enfin nous pouvons dire que dans tous les signaux traités, la méthode proposée a donné des résultats très intéressants dans le sens où les défauts considérés sont à chaque fois détectés avec une bonne résolution. Ce travail pourrait, à notre avis, constituer une référence pour des travaux futurs visant l'application de la méthode proposée pour la détection d'autres défauts spécifiques de machines tournantes, en plus de ceux courants, comme ceux des engrenages par exemple.

**Références Bibliographiques**

- [1] Arquès Philippe, « **Diagnostic prédictif de l'état des machines** », Edition Masson, Paris 1996.
- [2] Document SKF, **Catalogue technique**. France, 1981.
- [3] Document AFNOR, **Norme AFNOR X 60-010**. Paris, 1990.
- [4] Q. Meng, L. Qu, **rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing**, pp 155-166, 1991.
- [5] A. DJEBALA. **Application de la Transformée Par Ondelettes à L'Etude et L'Analyse Vibratoire des Systèmes Mécaniques**. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [6] B. Trajin. **Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones**, Thèse de l'université de TOULOUSE, 2009.
- [7] Breneur Claire « **Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenage et de roulements** », Thèse de l'INSA de Lyon, Décembre 2002.
- [8] Ericsson Stefan, Niklas Gripa, Elin Johanssona, Lars-Erik Perssona, Ronny Sjobergb, Jan-Olov Strömbergc : (**Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines**). *Mechanical Systems and Signal Processing* 19 (2005) 509–535
- [9] Kiral Zeki, Hira Karagulle : (**Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force**). *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1967–1991
- [10] Boulenger A., Pachaud C : « **Aide-mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations** ». Edition Dunod, Paris 2009.
- [11] ZIANI Ridha : « **Etude des performances de la classification par les Supports à Vaste Marge (SVM) : application au diagnostic vibratoire** ». Thèse magister. UFAS. 2007.
- [12] Jérôme Antonie, R.B. Randall : « **The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines** ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 308–331
- [13] Fedala. S « **Le diagnostic vibratoire automatisé : comparaison des méthodes d'extraction et de sélection du vecteur forme** », Thèse de Magister IOMP, Université Ferhat Abbas Sétif Algérie, Novembre 2006.

- [14] Djouada Mohamed : « **Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA) – algorithmes génétiques (AG) : application au diagnostic vibratoire** ». Thèse magister.UFAS. 2008
- [15] El badaoui Mohamed, « **Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l’analyse cepstrale** ». Thèse de l’Université Jean Monnet. 1999.
- [16] 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.
- [17] A. PAREY, M. EL BADAOUI, F. GUILLET, N. TANDON. **Dynamic Modelling of Spur Gear Pair and Application of Empirical Mode Decomposition Based Statistical Analysis for Early Détection of Localized Tooth Defect**. Journal of Sound and Vibration 294 (2006) 547-561.
- [18] H. Liag, Q.H. Lin, J.D.Z. Chen. **Application of the empirical mode decomposition to analysis of Esophageal Manometric Data in gastroesophageal reflux disease**, IEEE vol 52, NO 10, 2005.
- [19] L. Hong-guang, M. Guang. **Harmonic component extraction from a chaotic signal based on empirical mode decomposition method**, Applied Mathematics and Mechanics, 27(2):221-225, 2006.
- [20] 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.
- [21] J. Dybala, R. Zimroz, **Rolling Bearing Diagnosing Method Based on Empirical Mode Decomposition (EMD) of Machine Vibration Signal**. Applied Acoustics 77 (2014) 195-203.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] D. Qiuhua, Y. Shunian. **Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings**, Mechanical Systems and Signal Processing, 21 (2007)2634–2644.
- [25] 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.

- [26] Q.GAO, C. DUAN, H.FAN, Q. MENG. **Rotating Machine Fault Diagnosis Using Empirical Mode Decomposition (EMD)**. Mechanical Systems and Signal Processing 22 (2008) 1072-1081.
- [27] M. Kedadouche, T. Tahan, A. Tahan. **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.
- [28] L. Yaguo, L. Jing, H. Zhengjia, J. Ming. **A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery**, Mechanical Systems and Signal Processing, 35 (2013) 108-126.
- [29] I. Touafek. **Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT)**, These de magister, Université de FERHAT ABBAS-SETIF.

**Annexe 1** : Valeurs des kurtosis des différents IMFs pour le cas sans défaut.

	<b>Signal</b>	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
sd_0hp	<b>2.8522</b>	3.1400	3.3094	8.9914	4.7716	3.3980
sd_1hp	<b>2.8842</b>	3.9256	2.7440	3.3911	3.8125	2.9926
sd_2hp	<b>2.9874</b>	3.1031	2.5868	3.1420	2.8942	2.3707
sd_3hp	<b>2.9019</b>	1.8918	2.7800	4.1503	2.9204	2.7273

**Annexe 2** : Valeurs des kurtosis des différents IMFs pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure.

	<b>Signal</b>	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
be_0hp_7	<b>7.6831</b>	5.1079	7.7417	5.9083	3.3825	3.2618
be_0hp_14	<b>2.9847</b>	2.3156	2.9674	2.9514	2.7207	2.9900
be_0hp_21	<b>22.6914</b>	16.7069	21.4651	6.4710	8.7755	5.3450
be_1hp_7	<b>7.4749</b>	5.3523	7.8896	5.4022	3.8543	4.3247
be_1hp_14	<b>2.8929</b>	2.2961	3.1995	2.8608	3.5408	2.6613
be_1hp_21	<b>15.0620</b>	14.9761	11.9281	7.5045	14.2125	7.8935
be_2hp_7	<b>7.6935</b>	4.7538	6.1810	5.8533	3.1659	3.7368
be_2hp_14	<b>3.1189</b>	2.5743	3.3280	2.8106	2.9591	2.7063
be_2hp_21	<b>20.7827</b>	18.6763	17.2257	7.9556	10.9423	6.7383
be_3hp_7	<b>8.0035</b>	4.9355	6.6148	5.3363	3.1444	3.0127
be_3hp_14	<b>3.1604</b>	2.5944	3.1263	2.6349	3.3271	2.5144
be_3hp_21	<b>20.6697</b>	17.5481	15.6955	7.7774	8.9107	7.8933

**Annexe 3** : Valeurs des kurtosis des différents IMFs pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure.

	<b>Signal</b>	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
bi_0hp_7	<b>5.4352</b>	4.7154	4.4498	3.4218	3.2664	2.7888
bi_0hp_14	<b>20.5398</b>	17.6593	19.2582	7.5134	5.6030	3.2153
bi_0hp_21	<b>6.9419</b>	6.8767	4.2232	3.4710	6.0915	3.7973
bi_0hp_28	<b>3.4493</b>	3.0725	3.3058	3.0440	3.0374	2.6591
bi_1hp_7	<b>5.5061</b>	4.8130	4.6565	3.3997	3.3821	2.7812
bi_1hp_14	<b>27.6835</b>	23.1401	11.8730	4.3944	3.3356	3.7574
bi_1hp_21	<b>7.0940</b>	7.0353	4.3270	4.0434	4.2385	2.9758
bi_1hp_28	<b>3.1529</b>	2.8542	3.7235	2.7081	4.3552	2.7137
bi_2hp_7	<b>5.6165</b>	5.1906	4.7491	3.1763	3.0505	3.5092
bi_2hp_14	<b>22.2682</b>	19.6527	9.3827	3.8432	3.4795	2.7138
bi_2hp_21	<b>6.9789</b>	6.9744	3.6403	4.1539	3.0050	3.4019

bi_2hp_28	<b>3.2219</b>	2.9681	2.9127	2.4756	3.1812	3.4425
bi_3hp_7	<b>5.6165</b>	5.1906	4.7491	3.1763	3.0505	3.5092
bi_3hp_14	<b>16.5979</b>	17.0554	3.1228	5.4455	4.9026	5.2398
bi_3hp_21	<b>8.2836</b>	8.3859	4.1113	3.5796	2.9867	2.7740
bi_3hp_28	<b>3.3342</b>	2.8994	4.1391	2.3684	3.5152	2.6806

**Annexe 4** : Valeurs des kurtosis des différents IMFs pour le cas d'un défaut sur la bille.

	<b>Signal</b>	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5
db_0hp_7	<b>2.9667</b>	2.8975	4.8112	2.6368	3.4511	2.5608
db_0hp_14	<b>10.3272</b>	12.2663	3.7624	3.0285	3.7329	2.8584
db_0hp_21	<b>3.4152</b>	3.2351	2.6267	3.1698	3.3964	2.9700
db_0hp_28	<b>4.2084</b>	4.1506	3.2937	3.7370	3.9951	4.0016
db_1hp_7	<b>2.8525</b>	2.6656	3.2181	2.8221	3.0102	2.4956
db_1hp_14	<b>7.3409</b>	8.0237	3.4819	4.0687	2.3417	2.7928
db_1hp_21	<b>9.7681</b>	9.7632	3.6143	4.2765	3.1766	2.2103
db_1hp_28	<b>3.4256</b>	3.3762	3.7263	3.3852	4.8868	4.2046
db_2hp_7	<b>2.7111</b>	2.5273	2.7923	3.0092	2.7796	2.4885
db_2hp_14	<b>6.1411</b>	7.6714	2.6560	3.4252	2.3413	2.5914
db_2hp_21	<b>3.2657</b>	3.0074	2.8509	2.7738	2.5898	2.5945
db_2hp_28	<b>3.5074</b>	3.4556	3.8029	3.8244	3.9505	3.3385
db_3hp_7	<b>2.8433</b>	2.6396	2.6659	2.7201	2.6269	2.4266
db_3hp_14	<b>9.4204</b>	12.9566	2.5593	3.7739	2.7924	3.1911
db_3hp_21	<b>3.0506</b>	2.9801	2.4107	2.5397	2.9946	2.4006
db_3hp_28	<b>3.8319</b>	3.7826	3.6804	3.9925	4.8754	5.1624

## ملخص

العمل المقدم في هذه الأطروحة هو جزء من الصيانة القائمة على الحالة للآلات الدوارة عن طريق تحليل الاهتزاز. يتعلق بتطبيق تحليل الوضع التجريبي (EMD) للكشف عن أخطاء المحامل.

يتم اختبار أداء الطريقة المقترحة، التي تجمع بين EMD والتفرطح وتحويل هيلبرت في مقعد اختبار " تحمل مركز البيانات

أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها صحة الطريقة المقترحة في التكوينات المختلفة ونوع العيوب الداخلية. تم أيضًا أخذ العديد من المعلمات في الاعتبار من أجل تحسين شروط استخدام الطريقة المقترحة، وهي سرعة الدوران، وتكرار أخذ العينات.

## 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 la Décomposition en Mode Empirique (EMD) pour la détection des défauts de roulements

Les performances de la méthode proposée, combinant l'EMD, le kurtosis et la transformée de Hilbert, sont testées dans le bancs d'essais « Bearing Data Center ».

Les résultats obtenus ont prouvé la validité de la méthode proposée dans différentes configurations. Plusieurs paramètres ont également été pris en considération afin d'optimiser les conditions d'utilisation de la méthode proposée, à savoir la vitesse de rotation, la fréquence d'échantillonnage.

**Mots-clés :** Décomposition en Mode Empirique (EMD), kurtosis, IMFs, Spectre d'enveloppe, Transformée de Hilbert.

## Abstract

The work presented in this thesis is part of the condition-based maintenance of rotating machines by vibration analysis. It concerns the application of Empirical Mode Decomposition (EMD) for the detection of bearing faults.

The performances of the proposed method, combining EMD, kurtosis and the Hilbert transform, are tested in the "Bearing Data Center" test bench.

The results obtained proved the validity of the proposed method in different configurations. Several parameters were also taken into consideration in order to optimize the conditions of use of the proposed method, namely the rotation speed, the sampling frequency.

**Keywords:** Empirical Mode Decomposition (EMD), kurtosis, IMFs, Envelope spectrum, Hilbert transform.