

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**  
**N° D'ORDRE :**



**DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : GENIE ELECTRIQUE**  
**OPTION : MAINTENANCE DES**  
**EQUIPEMENTS INDUSTRIELS**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master**

**Par :**

**REBBAS Nacereddine**

**REBAHI Khelifa**

**Intitulé**

**Diagnostic d'un entraînement électrique**

**Proposé et dirigé par :**

**Dr.CHERIF Bilal Djamal Eddine**

**Soutenu devant le jury composé de :**

**Mr.DEFDAF Mabrouk**

**Président**

**Mr.CHERIF Bilal Djamal Eddine**

**Encadreur**

**Mr.BENYETTOU Lotfi**

**Examineur**

**Année universitaire : 2019/2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

***Dédicace***

***A nos parents,***

***A nos frères et nos sœurs.***

# ***Remerciements***

Nos vifs remerciements vont d'emblée à Dieu tout puissant qui nous a doté d'une grande volonté et d'un savoir adéquat pour mener à bien cet humble travail.

Nous adressons nos remerciements tout particulièrement :

À nos chers parents, notre fierté et bien sur la source de notre réussite car ils se sont sacrifiés pour nous fournir une atmosphère de travail disposant de toutes les meilleures conditions, sans eux rien n'aurait pu être facile, que dieux nous les garde et les protège afin que l'on puisse leurs rendre un peu du beaucoup qu'ils nous ont procuré.

La rédaction de ce mémoire a été l'un des défis académiques les plus importants que nous ayons jamais rencontré dans notre poursuite universitaire. Néanmoins, sans le soutien, les conseils, les commentaires et les encouragements des personnes suivantes, ce mémoire n'aurait jamais été achevé. C'est donc à eux que nous devons notre plus profonde reconnaissance.

Nous exprimons nos profondes gratitude à notre encadreur Mr CHERIF Bilal Djamal Eddine pour ses conseils, ses remarques et le temps qu'il nous a consacré.

Nous exprimons nos reconnaissances à Mr DEFDAF Mabrouk d'avoir fait l'honneur de présider le jury et aussi à Mr BENYETTOU Lotfi pour avoir accepté d'être membre de jury.

Enfin, nous tenons à remercier toute la promotion 2018-2019 Master 2 Maintenance Industrielle.

Ainsi que tous nos enseignants et les membres du département Génie Electrique de Université Mohamed Boudiaf, M'sila.

## Résumé :

Le but principal de ce travail est le diagnostic du défaut de moteur asynchrone à cage, grâce à la détection de défaut de roulement par l'analyse vibratoire. L'accent est mis sur la technique de traitement du signal pour détecter le défaut. Cette technique est basée sur la transformée Hilbert-Huang (HHT) pour détecter les harmoniques qui caractérisent le défaut (bague interne et bague externe), en utilisant la décomposition à plusieurs niveaux du signal de vibration pour obtenir les IMF's. À la fin une enveloppe spectrale est réalisée pour détecter les harmoniques de défaut.

**Mots clés :** Moteur asynchrone ; Roulement ; Défaut ; Détection ; Bague interne ; Bague externe ; HHT ; EMD.

## Abstract:

The main propose of this work is the diagnosis of the asynchronous squirrel cage motor fault, through the detection of the bearing fault using vibration analysis. The emphasis is on the technique of signal processing to detect the fault. This technique is based on the Hilbert-Huang transform (HHT) to detect the harmonics that characterize the fault (inner ring and outer ring), using the multi-level decomposition of the vibration signal to obtain the IMF's. At the end a spectral envelope is performed to detect the fault harmonics.

**Keywords:** Induction motor; Bearing; Fault; Detection; Inner race; Outer race; HHT; EMD.

## ملخص :

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تشخيص خطأ محرك قفص السنجاب غير المتزامن، من خلال الكشف عن خطأ المحمل عن طريق تحليل الاهتزاز. ينصب التركيز على تقنية معالجة الإشارات لاكتشاف الخطأ. تعتمد هذه التقنية على تحويل للكشف عن التوافقيات التي تميز الخطأ (الحلقة الداخلية والحلقة الخارجية) ، باستخدام التحلل Hilbert-Huang (HHT) في نهاية الطيف ، يتم إنشاء غلاف طيفي لاكتشاف التوافقيات MFIs متعددة المستويات لإشارة الاهتزاز للحصول على الخاطئة.

**الكلمات الرئيسية:** محرك غير متزامن. المتداول. إفتراضي؛ كشف؛ الحلقة الداخلية الطوق الخارجي؛ HHT. EMD.

# Table des matières

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| <b>Table des matières .....</b>               | <b>iii</b> |
| <b>Liste des Figures.....</b>                 | <b>iv</b>  |
| <b>Liste des Tableaux .....</b>               | <b>v</b>   |
| <b>Acronymes, Sigles et Abréviations.....</b> | <b>vi</b>  |
| <b>Introduction générale.....</b>             | <b>2</b>   |

## Chapitre I

|         |                                                                  |    |
|---------|------------------------------------------------------------------|----|
| I.1     | Introduction.....                                                | 5  |
| I.2     | Constitution de la machine asynchrone .....                      | 5  |
| I.2.1   | Le Stator.....                                                   | 6  |
| I.2.2   | Le Rotor.....                                                    | 7  |
| I.2.2.1 | Le rotor a bobiné.....                                           | 8  |
| I.2.2.2 | Le rotor à cage.....                                             | 8  |
| I.2.3   | Les organes mécaniques.....                                      | 9  |
| I.3     | Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone..... | 9  |
| I.4     | Les défaillances dans la machine asynchrone .....                | 12 |
| I.4.1   | Défaillances d'ordre mécanique.....                              | 12 |
| I.4.1.1 | Défaillances des roulements.....                                 | 12 |
| I.4.1.2 | Défaillances du flasque .....                                    | 12 |
| I.4.1.3 | Défaillances de l'arbre.....                                     | 12 |
| I.4.2   | Défaillances d'ordre électrique.....                             | 13 |
| I.4.2.1 | Défaillances au stator.....                                      | 13 |
| I.4.2.2 | Défaillances au rotor.....                                       | 14 |
| •       | Rupture de barres.....                                           | 14 |
| •       | Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.....             | 15 |
| •       | Excentricité statique et dynamique.....                          | 15 |
| I.5     | Conclusion.....                                                  | 16 |

## Chapitre II

|        |                                               |    |
|--------|-----------------------------------------------|----|
| II.1   | Introduction .....                            | 18 |
| II.2   | L'analyse vibratoire .....                    | 18 |
| II.2.1 | Objectifs.....                                | 18 |
| II.2.2 | Les avantages.....                            | 19 |
| II.2.3 | Les inconvénients .....                       | 19 |
| II.3   | Définition des vibrations .....               | 19 |
| II.4   | Définition théorique d'une vibration .....    | 19 |
| II.4.1 | Vibrations aléatoires .....                   | 20 |
| II.4.2 | Vibrations périodiques .....                  | 20 |
| II.4.3 | Vibrations d'un système "masse-ressort" ..... | 20 |
| II.4.4 | Vibration sinusoïdale.....                    | 20 |
| II.5   | Caractéristiques d'une vibration.....         | 22 |
| II.5.1 | Fréquence .....                               | 22 |
| II.5.2 | Amplitude.....                                | 22 |
| II.6   | Paramètres de l'analyse vibratoire.....       | 22 |
| II.6.1 | Les grandeurs de mesure.....                  | 22 |

|          |                                                 |    |
|----------|-------------------------------------------------|----|
| II.6.1.1 | Déplacement vibratoire.....                     | 22 |
| II.6.1.2 | Vitesse (v).....                                | 22 |
| II.6.1.3 | L'accélération.....                             | 23 |
| II.6.2   | Les unités et échelles.....                     | 23 |
| II.6.2.1 | Niveau d'accélération.....                      | 24 |
| II.6.2.2 | Niveau de vitesse.....                          | 24 |
| II.6.2.3 | Niveau de déplacement.....                      | 24 |
| II.6.3   | Domaines d'utilisations.....                    | 25 |
| II.6.4   | Choix des grandeurs de mesure .....             | 25 |
| II.7     | Les machines tournantes.....                    | 25 |
| II.7.1   | Vibrations des machines tournantes.....         | 26 |
| II.7.2   | Principaux Défauts d'une machine tournante..... | 26 |
| II.7.2.1 | Défauts de roulement.....                       | 26 |
| II.7.2.2 | Défaut Sur la bague extérieure.....             | 27 |
| II.7.2.3 | Défaut sur la bague intérieure.....             | 28 |
| II.7.2.4 | Défaut sur l'élément roulant.....               | 28 |
| II.7.2.5 | Défaut sur la cage.....                         | 28 |
| II.8     | Les capteurs de détection de vibration.....     | 29 |
| II.8.1   | Capteur de déplacement.....                     | 29 |
| II.8.2   | Capteur de vitesse .....                        | 29 |
| II.8.3   | Capteur d'accélération.....                     | 30 |
| II.9     | Modes de détection.....                         | 30 |
| II.9.1   | Valeur efficace.....                            | 31 |
| II.9.2   | Valeur crête Xc.....                            | 31 |
| II.9.3   | Valeur crête à crête Xcc.....                   | 31 |
| II.9.4   | Kurtosis.....                                   | 31 |
| II.10    | Conclusion.....                                 | 32 |

### Chapitre III

|                                         |                                                                                 |           |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.1                                   | Introduction .....                                                              | 34        |
| III.2                                   | La décomposition modale empirique d'un signal(EMD) .....                        | 34        |
| III.3                                   | Transformée de Hilbert.....                                                     | 34        |
| III.4                                   | Définition de l'Intrinsèque.....                                                | 35        |
| III.5                                   | l'algorithme de tamisage (SiftingProcess).....                                  | 35        |
| III.6                                   | Application de la transformée (THH) au diagnostic des défauts de roulement..... | 38        |
| III.6.1                                 | Analyse de signaux des défauts par la méthode Hilbert Huang.....                | 38        |
| III.6.2                                 | Analyse spectral d'Hilbert des IMFs.....                                        | 42        |
| III.7                                   | Conclusion.....                                                                 | 47        |
| <b>Conclusion générale .....</b>        |                                                                                 | <b>55</b> |
| <b>Références bibliographiques.....</b> |                                                                                 | <b>57</b> |

## Liste des Figures

|                        |                                                                                                       |    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1 :</b>    | Eléments de constitution d'une machine asynchrone. [4]                                                | 6  |
| <b>Figure I.2 :</b>    | Schématique en perspective du stator [5]                                                              | 7  |
| <b>Figure I.3 :</b>    | Schématique en perspective rotor                                                                      | 7  |
| <b>Figure I.4 :</b>    | Le rotor a bobiné                                                                                     | 8  |
| <b>Figure I.5 :</b>    | Vue schématique en perspective du rotor [5]                                                           | 9  |
| <b>Figure I.6 :</b>    | Proportion des défauts [7]                                                                            | 10 |
| <b>Figure I.7 :</b>    | Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [7]                         | 11 |
| <b>Figure I.8 :</b>    | Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [8]                                      | 11 |
| <b>Figure I.9 :</b>    | Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut                                                         | 14 |
| <b>Figure I.10 :</b>   | Représentation de l'excentricité                                                                      | 16 |
| <b>Figure II.1 :</b>   | Différentes méthodes d'analyse                                                                        | 18 |
| <b>Figure II.2 :</b>   | Vibrations périodiques                                                                                | 20 |
| <b>Figure II.3 :</b>   | Vibrations d'un système "masse-ressort".                                                              | 21 |
| <b>Figure II.4 :</b>   | Vibration sinusoïdale                                                                                 | 21 |
| <b>Figure II.5 :</b>   | Les paramètres caractéristiques                                                                       | 23 |
| <b>Figure II.6 :</b>   | Echelles linéaire et logarithmique                                                                    | 24 |
| <b>Figure II.7 :</b>   | Eléments d'une machine tournante                                                                      | 25 |
| <b>Figure II.8 :</b>   | Quelques défaillances affectant les roulements                                                        | 27 |
| <b>Figure II.9 :</b>   | Image vibratoires théorique d'un défaut de bague extérieure                                           | 27 |
| <b>Figure II.10 :</b>  | Image vibratoires théorique d'un défaut de bague intérieure                                           | 28 |
| <b>Figure II.11 :</b>  | Image vibratoires théorique d'un défaut de bille                                                      | 28 |
| <b>Figure II.12 :</b>  | Proximètre                                                                                            | 29 |
| <b>Figure II.13 :</b>  | Vélocimètre                                                                                           | 30 |
| <b>Figure II.14 :</b>  | Exemple d'un accéléromètre piézoélectrique                                                            | 30 |
| <b>Figure II.15 :</b>  | Signal temporel et distribution de l'amplitude                                                        | 31 |
| <b>Figure III.1 :</b>  | L'Organigramme de l'algorithme de l'EMD. [28]                                                         | 36 |
| <b>Figure III.2 :</b>  | Somme de deux sinus : a) Signal temporel, b) Son Spectre                                              | 37 |
| <b>Figure III.3 :</b>  | a) Signal de l'IMF1, b) Spectre de l'IMF1                                                             | 37 |
| <b>Figure III.4 :</b>  | a) signal l'IMF2, b) Spectre de l'IMF2                                                                | 38 |
| <b>Figure III.5 :</b>  | Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain à vide.                      | 38 |
| <b>Figure III.6 :</b>  | Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain en charge de 3HP.            | 39 |
| <b>Figure III.7 :</b>  | Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure à vide                                  | 39 |
| <b>Figure III.8 :</b>  | Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure en charge de 3HP                        | 40 |
| <b>Figure III.9 :</b>  | Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré à vide           | 40 |
| <b>Figure III.10 :</b> | Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré en charge de 3HP | 41 |
| <b>Figure III.11 :</b> | Décomposition en mode empirique du défaut de billes à vide                                            | 41 |
| <b>Figure III.12 :</b> | Décomposition en mode empirique du défaut de billes en charge de 3HP                                  | 41 |
| <b>Figure III.13 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide                     | 42 |

|                        |                                                                                                               |    |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.14 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide                             | 42 |
| <b>Figure III.15 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP                                | 42 |
| <b>Figure III.16 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP                                | 43 |
| <b>Figure III.17 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure à vide                 | 43 |
| <b>Figure III.18 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure à vide                 | 43 |
| <b>Figure III.19 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure pour charge de 3HP     | 44 |
| <b>Figure III.20 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure pour charge de 3HP     | 44 |
| <b>Figure III.21 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure à vide                 | 44 |
| <b>Figure III.22 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure à vide                 | 44 |
| <b>Figure III.23 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour une charge de 3HP | 45 |
| <b>Figure III.24 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour une charge de 3HP | 45 |
| <b>Figure III.25 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide                                | 45 |
| <b>Figure III.26 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide                                | 46 |
| <b>Figure III.27 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge de 3HP                   | 46 |
| <b>Figure III.28 :</b> | Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge de 3HP                   | 46 |

## Liste des Tableaux

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Table III.1</b> : Fréquences et amplitudes d'IMF1 et IMF2. .... | 47 |
|--------------------------------------------------------------------|----|

## Acronymes, Sigles et Abréviations

|                |                                                    |
|----------------|----------------------------------------------------|
| $f_{cs}$ :     | Fréquence circuit statorique                       |
| $f_s$ :        | Fréquence source                                   |
| $F_{défaut}$ : | Fréquence de défaut                                |
| $f_r$ :        | La fréquence de rotation de la bague interne       |
| $g$ :          | Glissement                                         |
| $n$ :          | Le nombre d'encoches rotoriques                    |
| <b>AFNOR</b> : | Association française de normalisation             |
| <b>RMS</b> :   | (RootMean Square, en anglais) L'amplitude efficace |
| $V(t)$ :       | Déplacement vibratoire                             |
| $L_a$ :        | Niveau d'accélération                              |
| $L_v$ :        | Niveau de vitesse                                  |
| $L_D$ :        | Niveau de déplacement                              |
| $De$ :         | Diamètre des billes.                               |
| $Dp$ :         | Le diamètre moyen du roulement                     |
| $\beta$ :      | L'angle de contact de la bille avec la cage.       |
| <b>THH</b> :   | La transformée de Hilbert Huang                    |
| <b>EMD</b> :   | Empirical Mode Decomposition                       |
| <b>NASA</b> :  | National Aeronautics and Space Administration      |
| <b>IMF</b> :   | Intrinsic Mode Functions                           |

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La machine électrique occupe une place très importante dans le milieu industriel, et devient un élément principal dans les différents domaines d'applications. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les pannes peuvent être d'origine diverses, les roulements à bille étant la partie mécanique la plus sujette aux défauts dus au vieillissement et à l'usure, les défauts roulement sont les plus fréquents. Les premières approches de détection de défauts consistaient à l'analyse des signaux vibratoires issus de la machine.

L'analyse vibratoire occupe une place prépondérante dans le dépistage et le diagnostic de défauts des machines tournantes, et ce, de façon croissante en raison des performances toujours plus accrues en matière de traitement du signal. Les techniques classiques comme l'analyse de fourrier permettent aussi de mettre en relation les amplitudes et les fréquences des phénomènes vibratoire stationnaires, cependant, certains défauts mécaniques sont représentés par des signaux transitoires de caractère non stationnaires, caractérisés par des vibrations complexes, ces défauts ne peuvent être détectés dans les premières stades de leur apparition par l'utilisation de transformée de fourrier et les méthodes de filtrage classique, mais ils peuvent être détectés par l'application des méthodes de traitement de signal avancées, comme la Transformée Hilbert-Huang [1]. Les techniques de diagnostic des défauts de roulement peuvent être classées en trois approches: l'analyse temporelle basée sur des paramètres statistiques, l'analyse fréquentielle et l'analyse temps-fréquence tels que la transformée en ondelettes (TO) et la Transformée Hilbert-Huang.

La transformée de Hilbert Huang dans le but d'analyser un signal non stationnaire et non linéaire. Cette transformée est composée, comme son nom l'indique de deux transformées, la transformée de Huang suivie de la transformée de Hilbert.

Dans une procédure de diagnostic, après extraction des caractéristiques, un système de classification intelligent s'impose. Plusieurs systèmes de classification intelligents ont été développés et utilisés pour la surveillance et le diagnostic, tels que les classificateurs flous, les algorithmes génétiques, les machines à vecteurs de support (SVM) et les réseaux de neurones artificiels (RNA). [2]

Nous intéressons dans ce travail au diagnostic des défauts de roulement, en utilisant un système de classification intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels(RNA).

Les réseaux de neurones artificiels peuvent être exploités dans le diagnostic comme outil principal de classification et de surveillance. En effet, le problème de surveillance peut être considéré comme étant un problème de reconnaissance des formes et de classification où les classes correspondent aux différents modes de défaillance du système et des formes représentant le comportement du système. [3]

Le travail réalisé dans ce mémoire présente la détection des défauts des roulements (partie rotorique) dans la machine asynchrone. L'étude simultanée du modèle simulée et expérimentale de ces défauts, Les outils d'analyse et de diagnostic de défaut sont à basés sur l'utilisation du spectre par la méthode (THH), avec une petite application du réseau de neurone. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

**Le premier chapitre :** de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones. Après une brève introduction des constitutions de la machine. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts.

**Le deuxième chapitre :** concerne la présentation des généralités sur le roulement, la conception, les caractéristiques, les types de roulements et les différentes avaries et remèdes. Il est introduit à l'étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire. L'étude expérimentale des défauts du roulement par l'analyse des signaux vibratoires est présente dans ce chapitre.

**Le troisième chapitre :** introduit la méthode de Hilbert pour le calcul de l'amplitude et la fréquence instantanée, ainsi que la méthode de décomposition empirique pour le calcul des IMF's et l'application de la transformée de Hilbert-Huang (HHT) au diagnostic des défauts de roulement : défaut de la bague externe, défaut de la bague interne, défaut de billes.

## **Chapitre I. Etat de l'art**

## I.1 Introduction

On appelle machine asynchrone, une machine électrique à vitesse variable, à courant Alternatif, qui à 2 enroulements dont un seul :

- 1ère alimenté par un réseau électrique de pulsation  $\omega$ .
- 2ème (le secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques. généralement ce type de machines est plus utilisé en moteur asynchrone (en triphasé). [1]

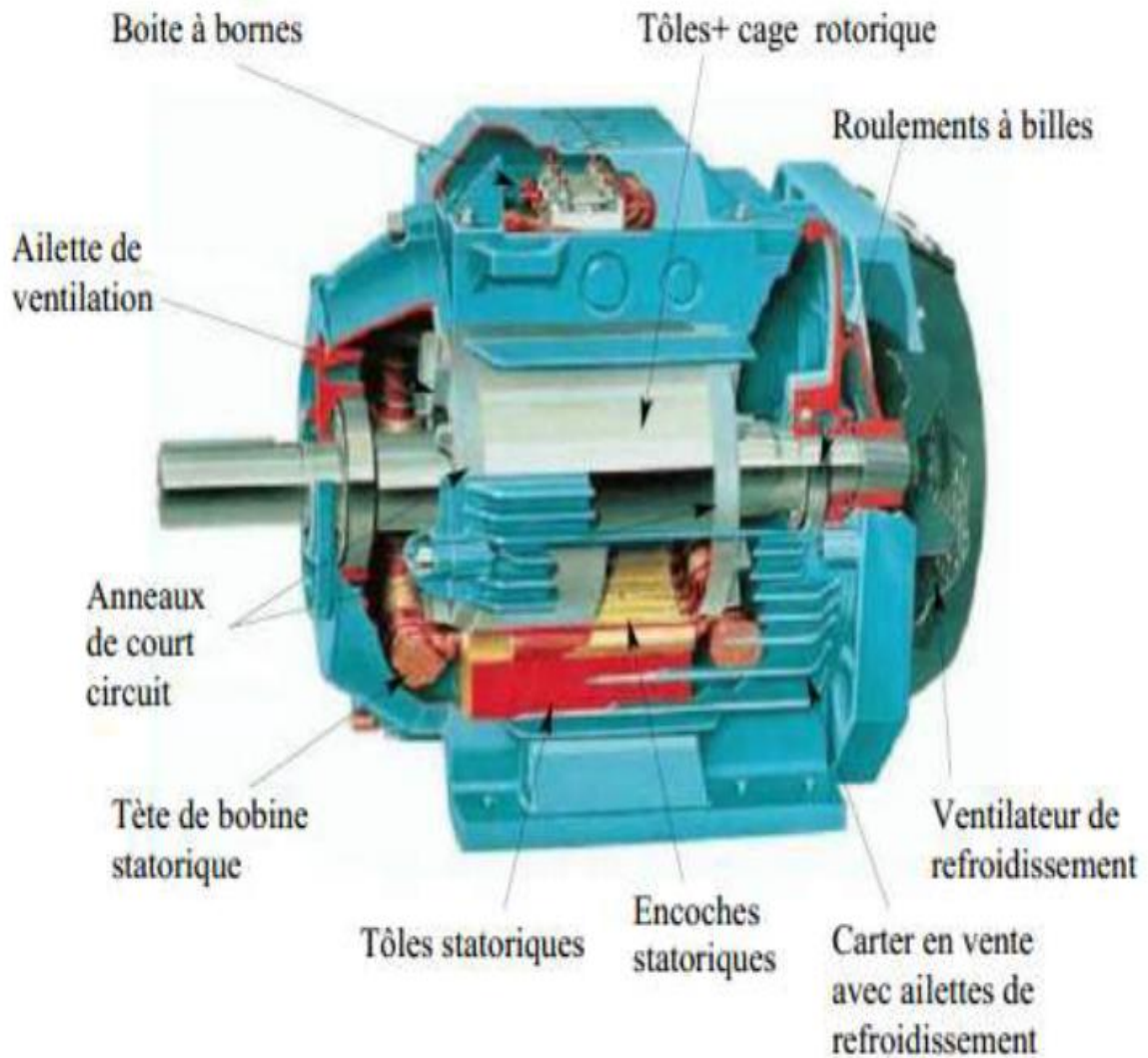
Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible cout, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité [2].

Toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications [3].

Dans ce chapitre les différentes parties et organe de la machine asynchrone sont présentées et on présente ses différentes caractéristiques, et étude des différents défauts affectant la machine asynchrone.

## I.2 Constitution de la machine asynchrone

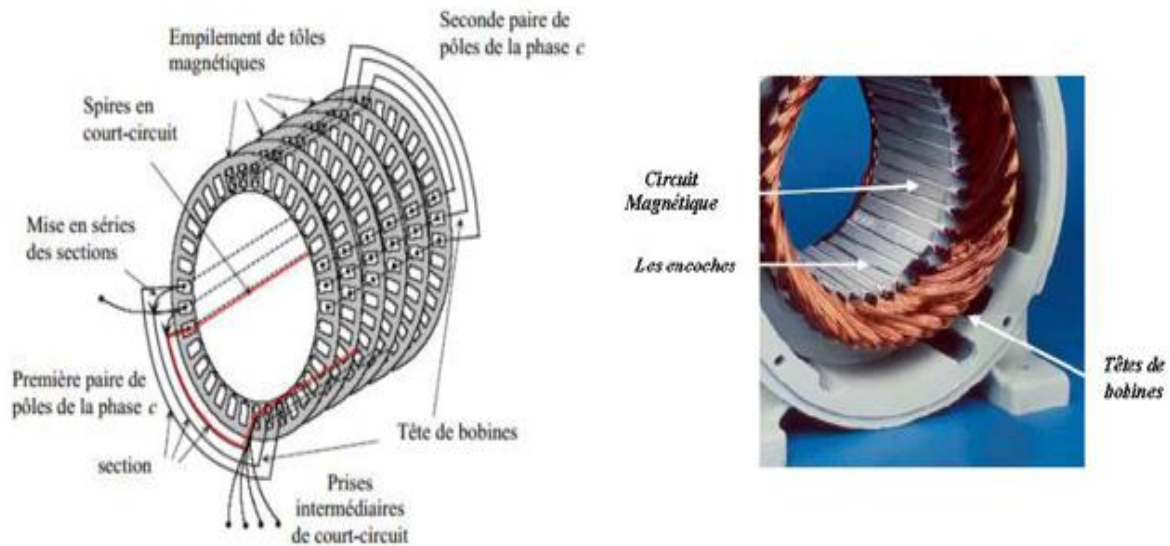
La machine asynchrone il est aussi appelé le moteur asynchrone il est constitué généralement sur un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est mobile monté sur un axe de rotation sur lequel les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes, le figure (1.1) présente les composant de la machine asynchrone [4].



**Figure I.1 :** *Eléments de constitution d'une machine asynchrone [4].*

### I.2.1 Le Stator

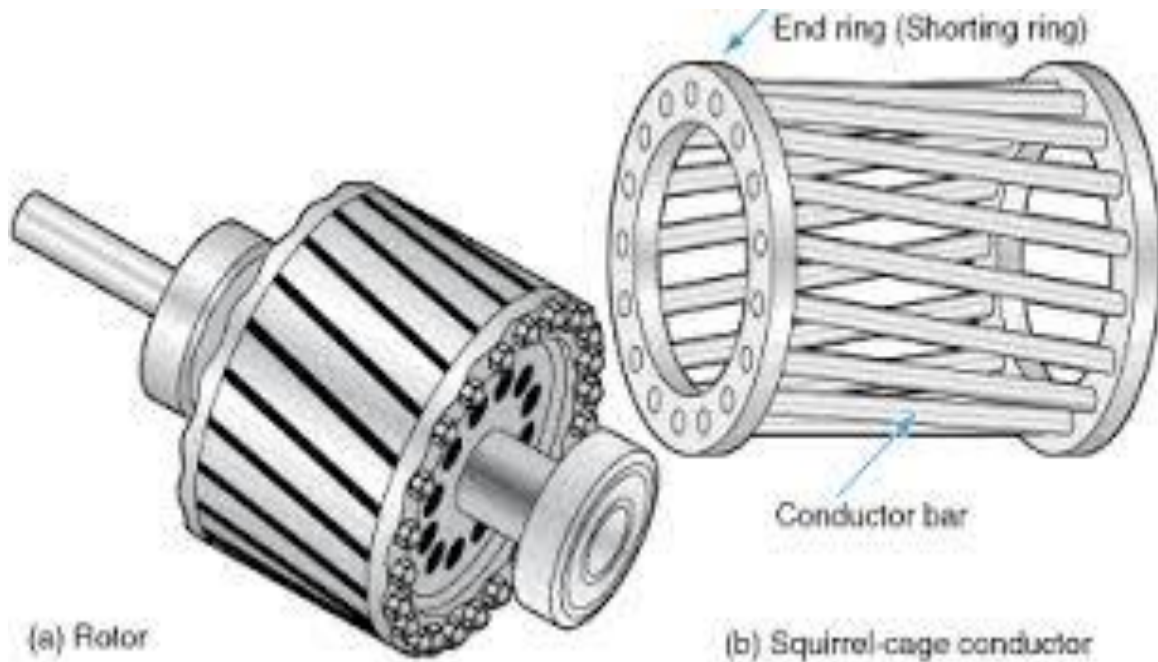
Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor, dans les cas le stator reste, les éléments principale de stator constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 1.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [4].



**Figure I.2 : schématique en perspective du stator [5].**

### I.2.2 Le rotor

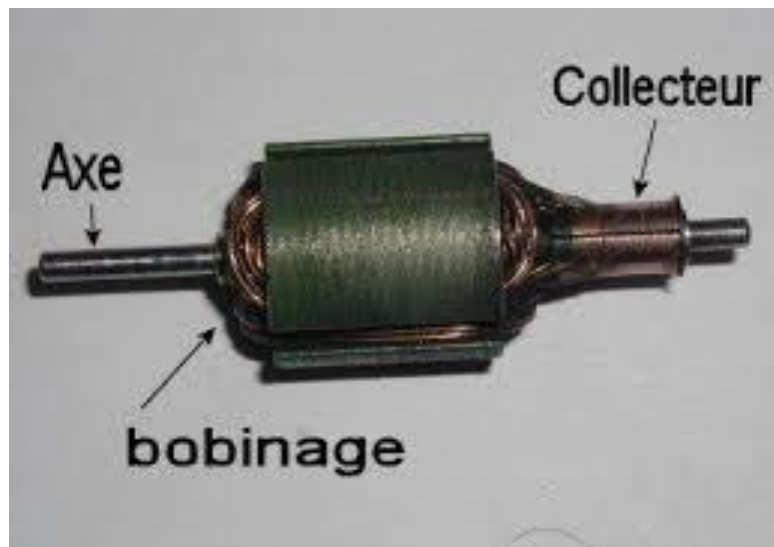
Dans le rotor le circuit magnétique est constituées d'un assemblage de tôles, Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de Plusieurs sections montées sur un noyau. Donc le rotor constitue de deux types de rotor : le rotor a bobiné ou à cage d'écureuil. Le (figure 1.3) représente le rotor.



**Figure I.3 : schématique en perspective rotor.**

### I.2.2.1. Le rotor a bobiné

Les enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle, ces enroulements localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixe, le (Figure 1.4) représente le rotor a bobiné.

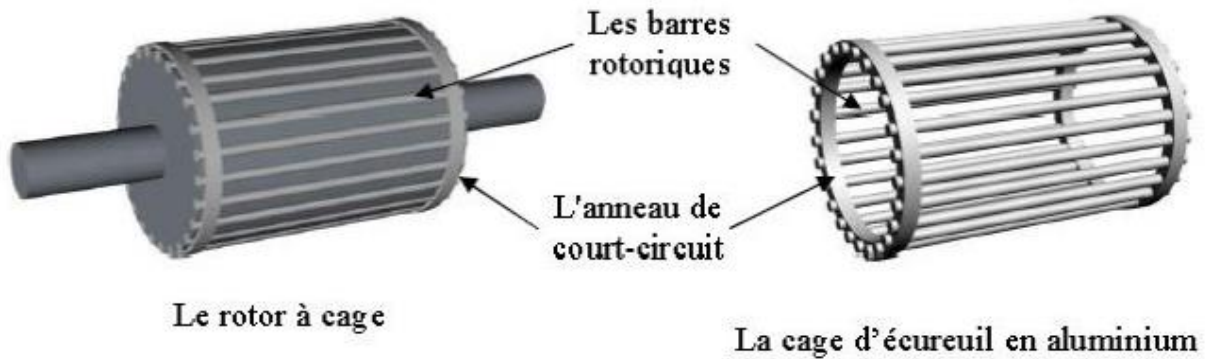


**Figure I.4 :** le rotor a bobiné.

### I.2.2.2. le rotor à cage

Dans le rotor à cage, Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance ou en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure 1.5). Et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [4].



**Figure I.5 :** Vue schématique en perspective du rotor [5].

### I.2.3. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, le rôle de cette carcasse est plus important pour enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixe un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moule ou forge. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des reluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

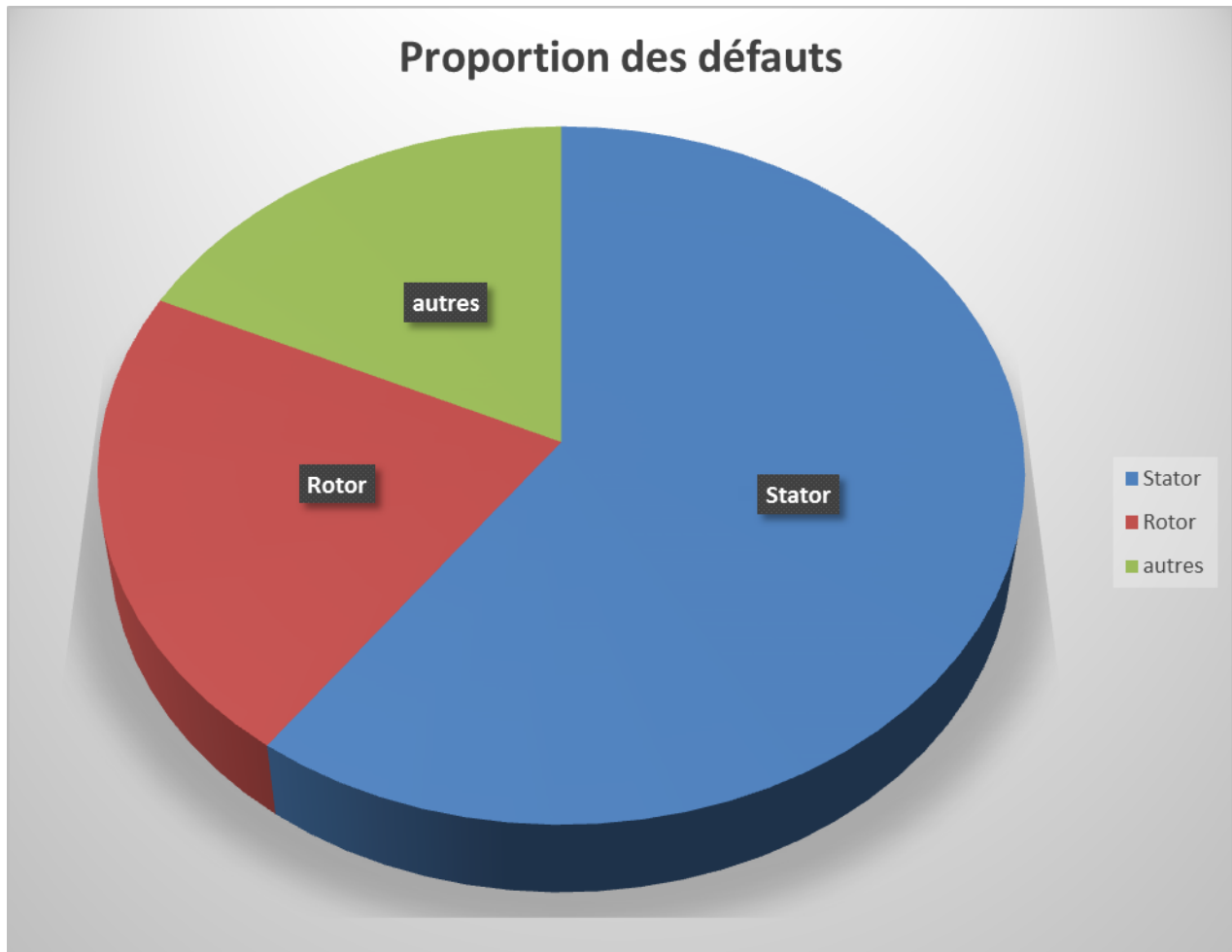
## I. 3 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Le différent origines de défaillances dans la machine asynchrone peuvent être : électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [6] :

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.

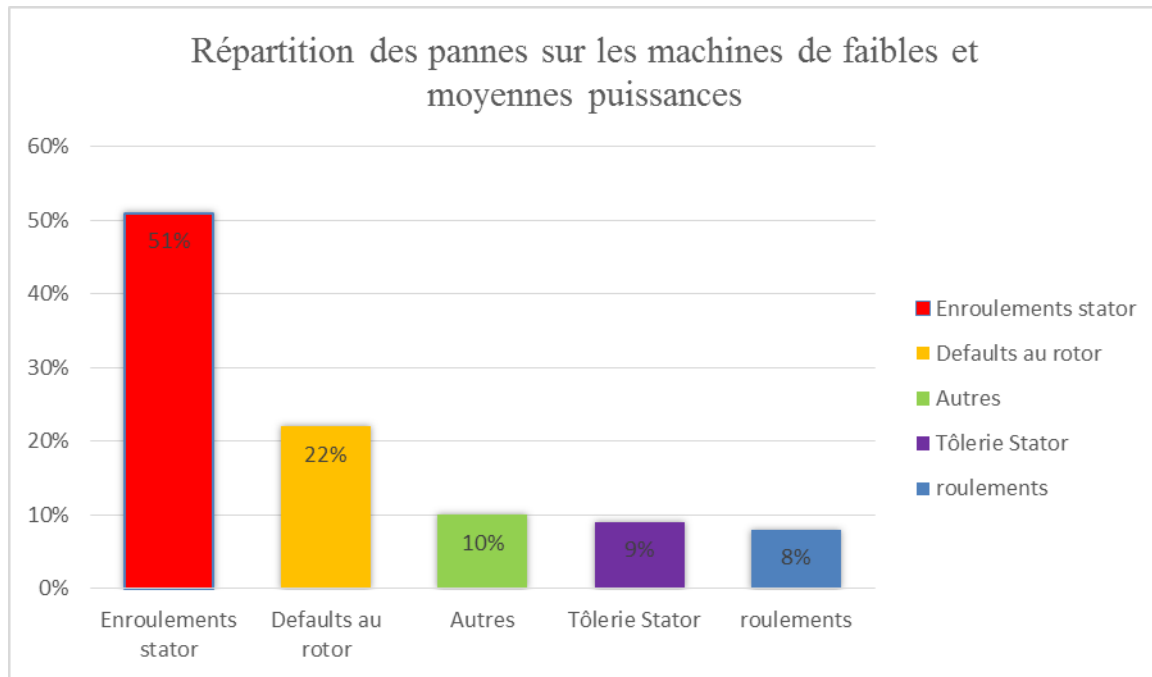
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [7] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) a montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et le reste (18% dans les autres régions de la machine telles que les roulements, les borniers,...etc. a donné les résultats suivants (figure 1.6) :



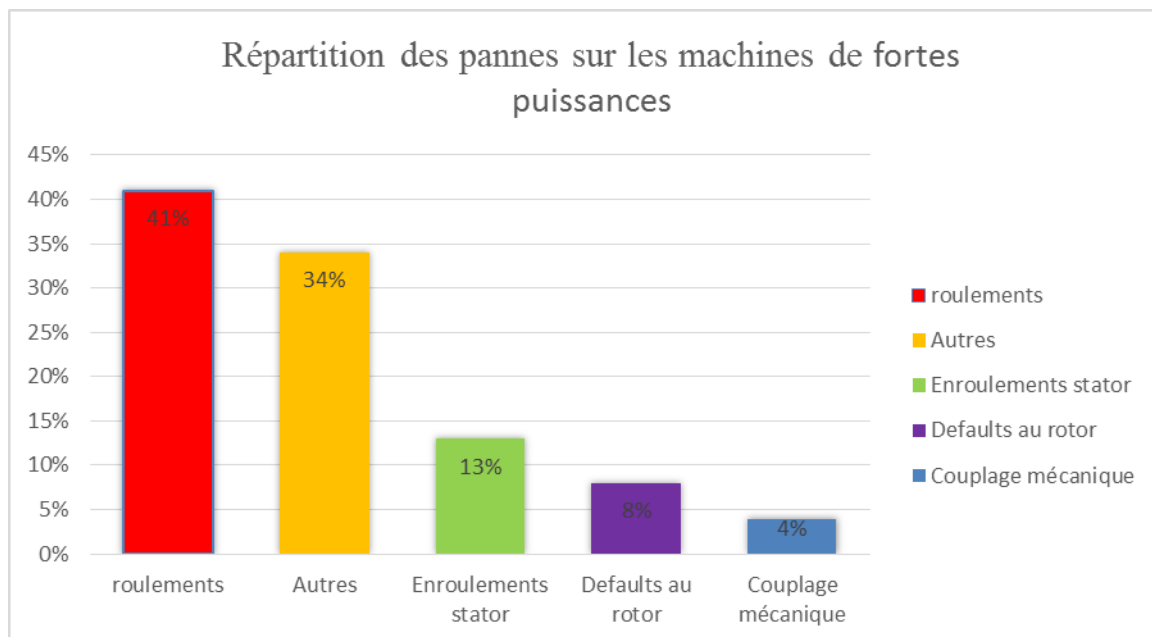
**Figure I.6 :** *Proportion des défauts* [7].

Les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est donnée sur la figure suivante (figure 1.7) :



**Figure I.7 :** Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [7].

Une autre étude statistique [8] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1MW) a montré que pour cette gamme de puissance, les pannes les plus fréquentes se situent sur les roulements. Le stator et le rotor sont le siège de 12% et 8% des pannes respectivement (Figure 1.8).les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.



**Figure I.8 :** Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [8].

## **I. 4 Les défaillances dans la machine asynchrone**

Bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine électrique ou mécanique. Cette défaillance ce problème se produit en raison de plusieurs facteurs tels qu'un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut, tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certain foi, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée comme (milieux corrosifs et/ou chimique hostiles) [9].

### **I.4.1. Défaillances d'ordre mécanique**

Généralement les défaillances d'ordre mécanique, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone, ces défauts peuvent apparaître au niveau des Roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur [10].

#### **I.4.1.1. Défaillances des roulements**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causes par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statiques permet de détecter ce type de défaillances.

#### **I.4.1.2. Défaillances du flasque**

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

#### **I.4.1.3. Défaillances de l'arbre**

L'arbre de la machine peut laisser paraître une usure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette usure peut mener à une fracture

nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone.

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbe ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

#### **I.4.2. Défaillances d'ordre électrique**

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statiques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [10].

##### **I.4.2.1. Défaillances au stator**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Nous pouvons citer aussi le court-circuit apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Le court-circuit entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [11] :

$$f_{cs} = f_s \left[ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (1.3)$$

Avec  $n=1,2,3\dots$  et  $k=1,3,5$ .

Défauts de circuit magnétique Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

##### **I.4.2.2. Défaillances au rotor**

Les défaillances au stator représentent environ de  $40 \div 60\%$  des défauts des machines à induction. Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être

définis comme suit :

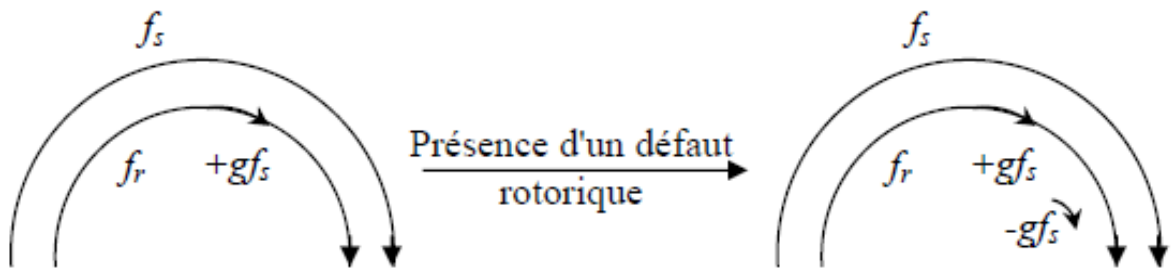
- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique et dynamique.

#### I.4.2.2.1. Rupture de barres

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

Comme le montre Filippetti [12] ; suite à une rupture de barre, les circuits rotoriques créent en plus du champ rotorique direct, un champ magnétique inverse de pulsation  $-gfs$  et qui est dû au déséquilibre des enroulements rotoriques (figure1.9). Cela a pour effet d'induire des forces électromotrices dans les circuits statoriques de fréquences  $(1-2g)fs$ , et donc des composantes de courant à ces fréquences selon la relation :

$$F_{\text{défaut}} = f_r - gfs = (1 - g)f_s - gfs = (1 - 2g)f_s \quad (1.4)$$



**Figure I.9 :** schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut.

Une composante oscillatoire du couple électromagnétique à la fréquence  $2gfs$  est aussi produite par l'interaction du champ direct et inverse. Les forces électromotrices dues au défaut sont alors de fréquences  $(1 \pm 2g)fs$ . Les champs créés par les courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses de fréquences  $s \pm 3gf$ . Ainsi, au stator, des courants de fréquences  $(s \pm 4g)f$  sont générées selon le même processus. Par conséquent, des composantes de fréquences  $(s \pm 2kg)f$ , où  $k$  est un entier positif, se retrouvent dans les courants

absorbés par la machine [13].

#### I.4.2.2.2. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de **barres** [10].

#### I.4.2.2.3. Excentricité statique et dynamique

On distingue deux cas d'excentricité (figure 1.10) :

- **Excentricité statique** : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- **Excentricité dynamiques** : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelée :

***Excentricité mixte.***

- **L'excentricité mixte** : Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités.

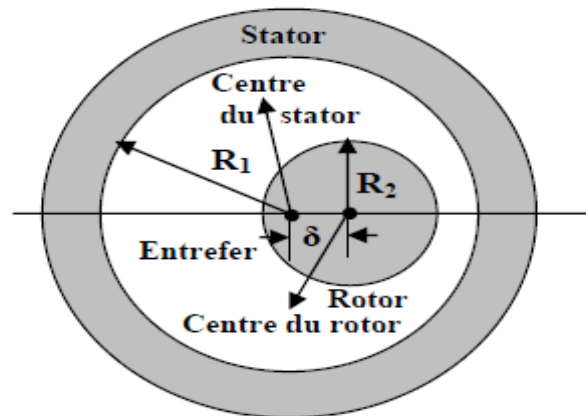
Les causes peuvent être ; le positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, l'usure des paliers ou la torsion de l'arbre. L'excentricité dans les machines à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant

$$f_{excen} = f_s = (kn \pm n_e) \frac{1-g}{p} \pm n_w \quad (1.5)$$

$n$  : le nombre d'encoches rotoriques

$n_e=0$ , dans le cas d'une excentricité statique et  $n_e=1$ , dans le cas d'une excentricité dynamique.

$k=1,2,3,...$  Et  $n_w=1,3,5,7...$  (l'ordre de l'harmonique de la F.m.m du stator).



**Figure I.10 :** représentation de l'excentricité.

## I.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre les différents défauts affectant les machines asynchrones et leurs méthodes diagnostiques. On a aussi fait l'objet de la présentation de la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique qui fait l'objet de notre travail ; pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Son principe est basé sur l'emploi des grandeurs électriques faciles à manipuler. Pour montrer l'effet des défauts sur le moteur, il est nécessaire d'avoir un modèle mathématique régissant le fonctionnement du moteur lors du défaut afin de simuler son comportement. Ceci fera l'objet du deuxième chapitre suivant.

## **Chapitre II. Etat de l'art de l'analyse vibratoire**

## II.1 Introduction

La surveillance d'un équipement de machine généralement utilisation de plusieurs différentes techniques analyses (analyse vibration, analyse huile, analyse thermographie ...etc.) en la surveillance de machine tournent. Dans cette analyses on utilise analyse vibratoire (75%) qui permet de détecter la plupart des défauts et aussi elle représente l'une des plus grandes méthodes d'analyse, comme la technique la plus globale pour la surveillance des machines tournantes d'utilisation de différentes méthodes dans le monde.

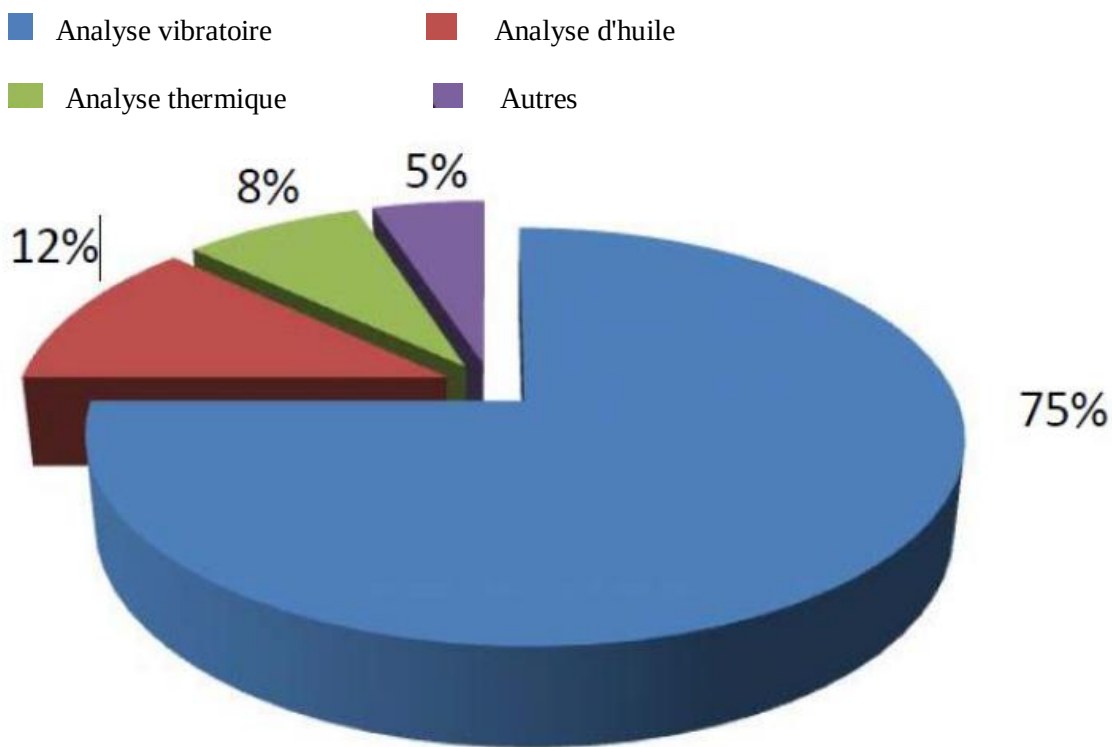


Figure II.1 : Différentes méthodes d'analyse.

## II.2 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée pour l'analyse de composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes [1].

### II.2.I Objectifs

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs [2] :

- la détection des défauts

- analyse détaillée des défauts

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel
- soit dans le domaine fréquentiel
- soit dans les deux à la fois

### II.2.2 Les avantages

Les avantages de l'analyse vibratoire est [1] :

- Détection de défauts à un stade précoce.
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi.
- Autorise une surveillance continue.
- permet de surveiller, l'équipement à distance.

### II.2.3 Les inconvénients

- Spectres parfois difficile interpréter
- installations relativement coûteuses dans le cas de la surveillance continue [1].

## II.3 Définitions des vibrations

La norme [AFNOR E90.350], une vibration peut être définie par la « variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence, Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va et vient, autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont : NF E 90-001, NF E 90 002.

L'Origine des vibrations elles sont dues aux effets dynamiques des jeux, des contacts de frottement ainsi qu'au déséquilibre des pièces en rotation ; elles sont inévitables.

Les vibrations d'une machine tournante se transmettent du rotor à la structure à travers les paliers. Elles seront donc mesurées au niveau des paliers.

## II.4 Définition théorique d'une vibration

La théorie de la tension est connue de quatre façons [1] :

### II.4.1 Vibrations périodiques

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une ou de deux vibrations (pure fondamentale et pures harmoniques). Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques.

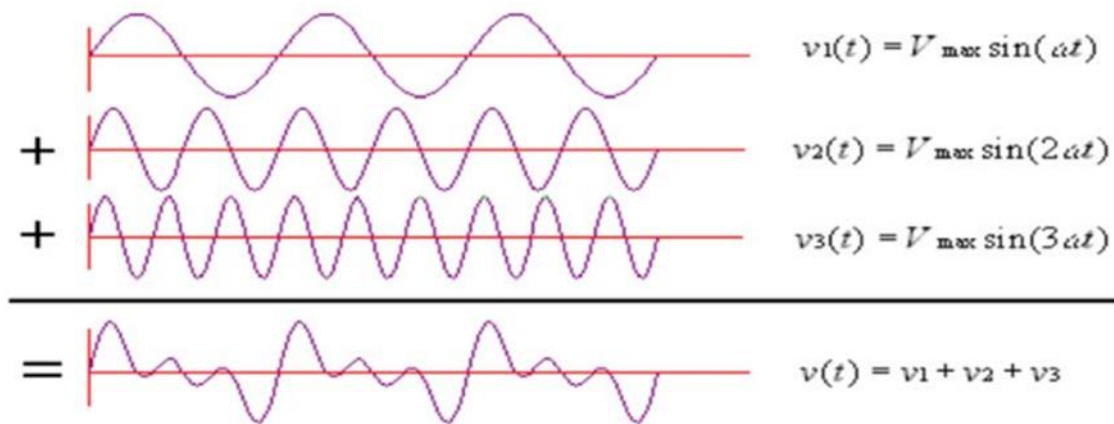


Figure II.2: Vibrations périodiques.

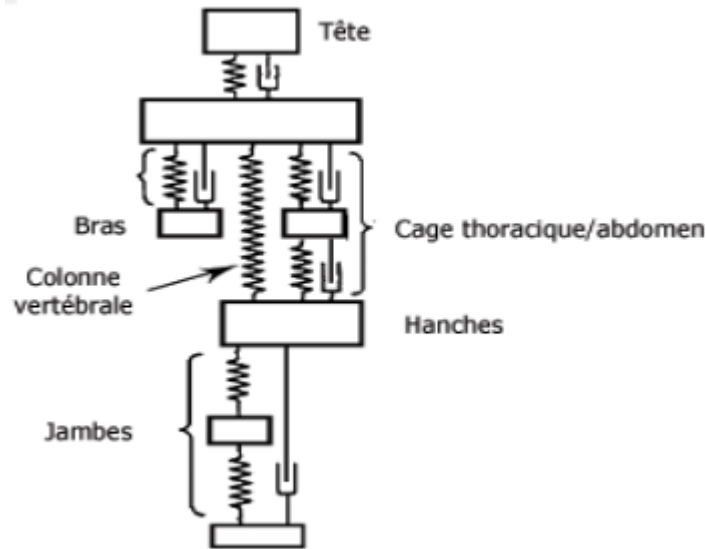
### II.4.2 Vibrations aléatoires

La structure de forme d'onde Dans les vibrations n'a pas toujours une aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les vibrations aléatoires.

### II.4.3 Vibrations d'un système "masse-ressort"

Tout système mécanique, incluant les machines industrielles les plus complexes, peut être représenté par un ou plusieurs systèmes composés d'un Plusieurs composants (ressort, d'un amortisseur et d'une masse. Le corps humain), souvent qualifié de "belle mécanique", est décomposé à la figure suivante en plusieurs sous-systèmes "masse-ressort-amortisseur" représentant la tête, les épaules, la cage thoracique, etc.

Système mécanique complexe :

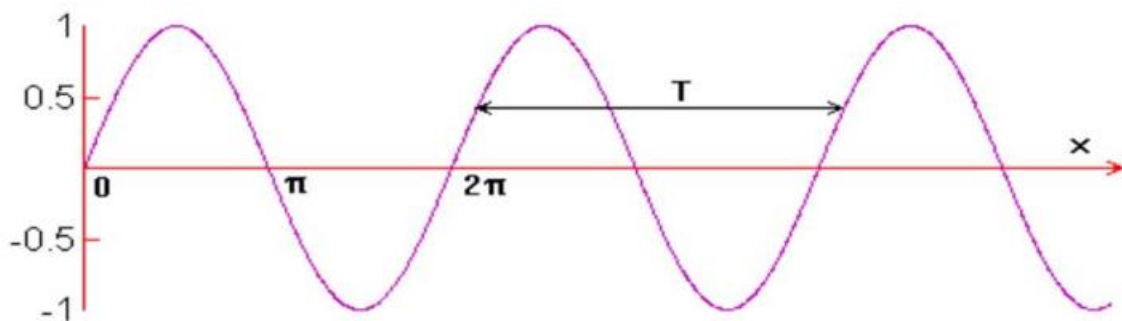


**Figure II.3 :** Vibrations d'un système "masse-ressort".

La vibration appliquée à l'homme sort du cadre de ce guide. Par contre, comprendre le phénomène vibratoire associé au système "masse-ressort" constitue une excellente entrée en matière. Pourquoi ? Parce que celui-ci représente le système mécanique le plus simple qui existe. Vous allez apprendre à le décrire en termes d'amplitude, de fréquence et de phase.

#### II.4.4 Vibration sinusoïdale

La sinusoïde définie comme la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période  $T$  correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller-retour. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple [3].



**Figure II.4:** Vibration sinusoïdale.

## II.5 Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence et son amplitude [4].

### II.5.1 Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

1 hertz = 1 cycle/seconde. Une vibration qui se produira 10 fois par seconde aura donc une fréquence "f" de 10 hertz.

Si la fréquence "f" d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de  $1/50^{\text{ème}}$  de seconde. La fréquence "f" est l'inverse de la période T :  $f = 1/T$ .

### II.5.2 Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :

- L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelé amplitude crête ( $A_c$ ) ou niveau crête ;
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) (*peak to peak, en anglais*) ou niveau crête-crête ;
- L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ), aussi appelée RMS (*Root Mean Square, en anglais*) ou niveau efficace.

## II.6 Paramètres de l'analyse vibratoire

### II.6.1 Les grandeurs de mesure

La vibration peut être étudiée selon trois grandeurs, il s'agit du déplacement, la vitesse et l'accélération [5].

#### II.6.1.1 Déplacement vibratoire

Dans le cas d'une vibration périodique dont la forme d'onde est du type

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Et prenant pour variable caractéristique le déplacement x par rapport à la position d'équilibre, la forme d'onde devient

$$X(t) = X_{max} \sin(\omega t) \text{ Ou encore } X(t) = X_{max} \sin(2\pi f t) \quad (2.2)$$

Le déplacement s'exprime en m, ou plus couramment en mm, ou en  $\mu\text{m}$ .

#### II.6.1.2 Vitesse (v)

La caractéristique de l'accroissement de position par unité de temps se décrit par la dérivée du déplacement  $V = \frac{dx}{dt}$  ce qui donne la fonction de vitesse suivante :

$$V(t) = \omega X_{max} \cos(\omega t) = V_{max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2.3)$$

Cette équation montre que la vitesse est en avance de phase de  $90^\circ$  sur le déplacement. La vitesse s'exprime en m/s ou mm/s.

### II.6.1.3 L'accélération

L'accélération vibratoire c'est l'accroissement de vitesse par unité de temps se décrit par la dérivée de la vitesse ou la double dérivée du déplacement

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.4)$$

Ce qui donne la fonction d'accélération suivante :

$$V(t) = -\omega^2 X_{max} \sin(\omega t) = A_{max} \sin(\omega t + \pi) \quad (2.5)$$

Cette équation montre que l'accélération est en avance de phase de  $180^\circ$  sur le déplacement et donc de  $90^\circ$  sur la vitesse, L'accélération s'exprime en  $m/s^2$  ou en g ( $1g=9.81 m/s^2$ )

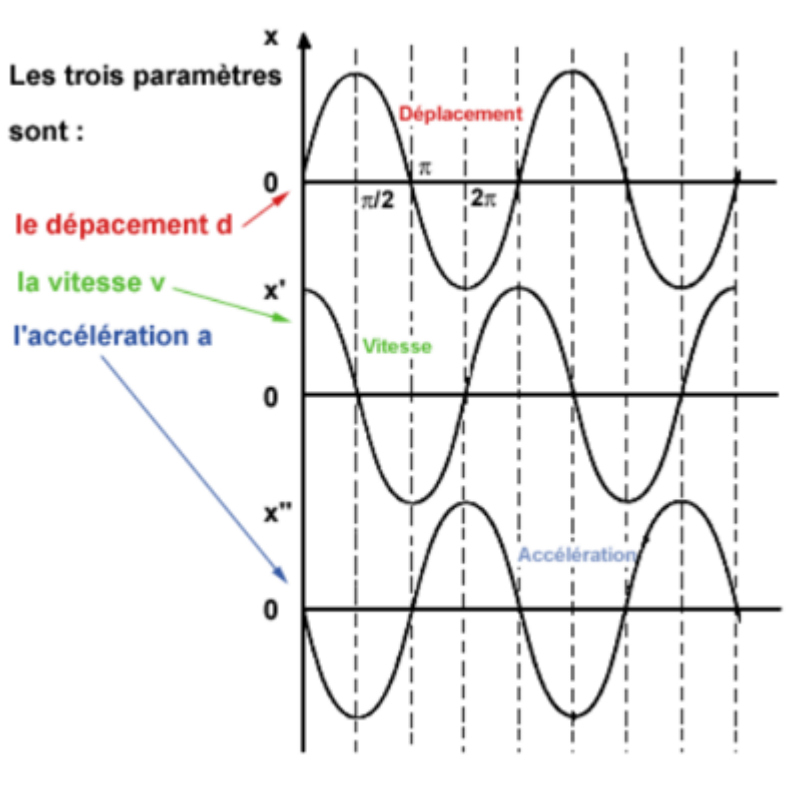


Figure II.5 : Les paramètres caractéristiques.

### II.6.2 Les unités et échelles

Pour chacun des paramètres de mesure, on adopte les unités suivantes :

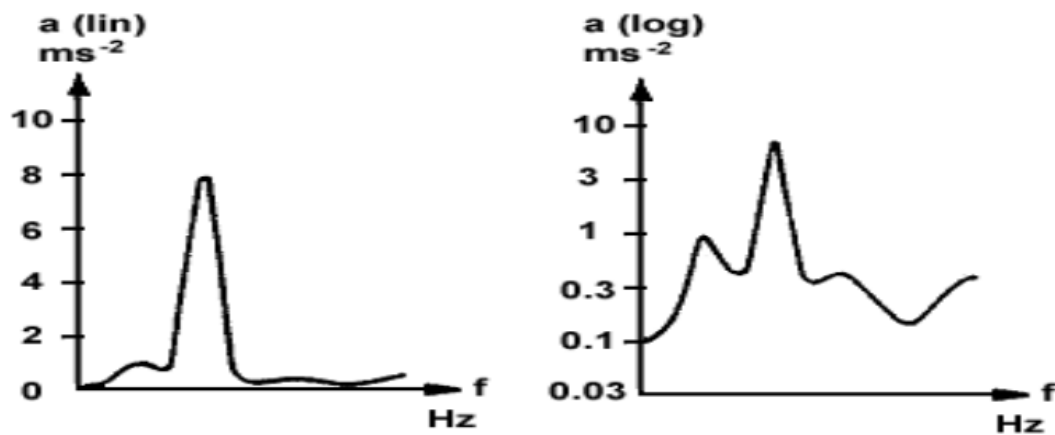
- Déplacement [m] = 0.001 mm
- Vitesse[m/s] =0.001 mm/s
- Accélération [m/s<sup>2</sup>] = 0.102 g

Avec g qui représente l'accélération due à la pesanteur soit  $9.81 m/s^2$

On distingue deux types d'échelles (Figure 2.6)

- Echelle linéaire

- Echelle logarithmique : obtenu par transformation de l'échelle linéaire par la fonction logarithme.



**Figure II.6 :** Echelles linéaire et logarithmique.

En effet, bien souvent, les amplitudes relatives des raies sont importantes. Quand elles sont supérieures à 20, les représentations linéaires manquent de précision [1], surtout aux faibles valeurs, il est alors commode d'introduire le décibel (dB).

C'est ainsi qu'on définit [1] :

#### II.6.2.1 Niveau d'accélération

Le niveau d'accélération en logarithme se définit par

$$L_a = 10 \log_{10} \frac{A}{A_{ref}} \quad (2.6)$$

Où  $A_{ref}$  est une accélération de référence qui vaut  $1 \mu\text{m} / \text{s}^2 = 10^{-6} \text{m} / \text{s}^2$

#### II.6.2.2 Niveau de vitesse

Le niveau de vitesse en logarithme se définit par

$$L_v = 10 \log_{10} \frac{V}{V_{ref}} \quad (2.7)$$

Où  $V_{ref}$  est une vitesse de référence qui vaut  $1 \text{ nm} / \text{s} = 10^{-9} \text{m} / \text{s}$

#### II.6.2.3 Niveau de déplacement

Le niveau de déplacement en logarithme se définit par

$$L_D = 10 \log_{10} \frac{D}{D_{ref}} \quad (2.8)$$

Où  $D_{ref}$  est un déplacement de référence qui vaut  $1 \text{ pm} = 10^{-6} \mu\text{m}$

### II.6.3 Domaines d'utilisations

Le paramètre à mesurer dépendra de la fréquence à étudier, c'est ainsi qu'on a

Pour le déplacement : fréquence < 100 Hz

Pour la vitesse : 100 Hz < fréquence < 1000 Hz

Pour l'accélération : 1000 Hz < fréquence

#### II.6.4 Choix des grandeurs de mesure

On choisira préférentiellement :

-La grandeur déplacement pour détecter des phénomènes à basse fréquence  $F \leq 100 \text{ Hz}$ .

-La grandeur vitesse pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence  $F \leq 1000 \text{ Hz}$

-La grandeur accélération pour détecter des phénomènes se situant à haute fréquence

$0 \leq F \leq 20000 \text{ Hz}$

### II.7 Les machines tournantes

Les machines tournantes jouent un rôle souvent stratégique dans un procédé de fabrication. A l'image d'une presse dans une papeterie ou d'une turbine dans une centrale électrique, elles font partie de ces équipements que l'on ne peut pas se permettre d'immobiliser à tout moment, Pour prévenir les défaillances [6].

Les machines tournantes sont des systèmes dans lesquels peut se distinguer un trio composants : un rotor, une structure et des liaisons.

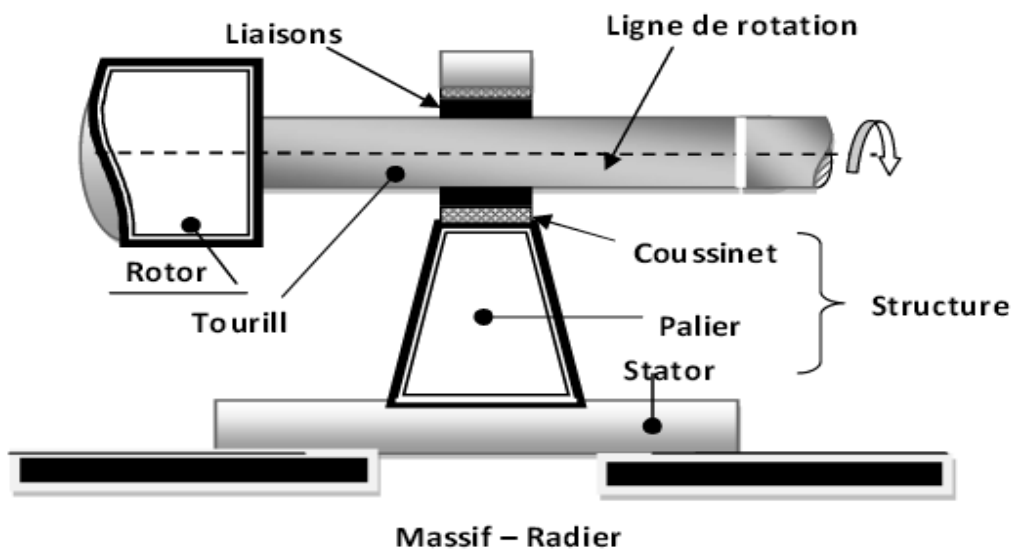


Figure II.7 : Eléments d'une machine tournante.

#### II.7.1 Vibrations des machines tournantes

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissante, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les

arbres se désalignent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers [7].

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée, c'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [7].

## **II.7.2 Principaux Défaits d'une machine tournante**

### **II.7.2.1 Défaits de roulement**

La durée de vie d'un roulement est une donnée statistique caractérisant le nombre de tours qu'il peut être effectué en étant soumis à une contrainte spécifique. Lorsqu'un défaut localisé apparaît en un point d'un des éléments du roulement, cela entraîne une vibration à la fréquence caractéristique associée à l'élément en défaut. En effet, si un défaut se situe sur le chemin de roulement d'une des bagues ou sur une bille, il se produit un choc mécanique à chaque fois que le défaut est confondu avec un point de contact bille/bague. Ces chocs répétés se traduisent alors par des vibrations [8].



**Figure II.8 :** Quelques défaillances affectant les roulements.

Les fréquences analytiques (théoriques) et caractéristiques qui se trouvent dans le contenu spectral d'un signal de vibration sont

$$D_p = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.9)$$

### II.7.2.2 Défaut Sur la bague extérieure

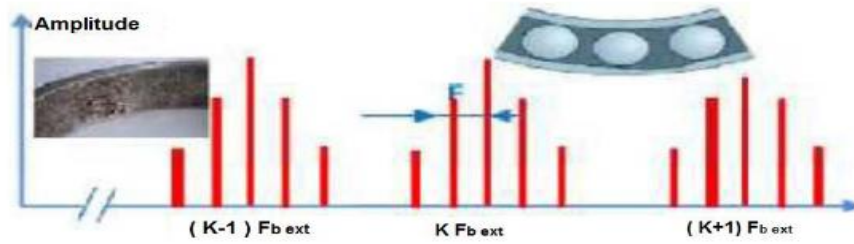
Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image Vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut.

À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante [figure 2.9] .Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation [9].

$$F_{bext}(Hz) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \cos \beta \right) \quad (2.10)$$

$n$  = nombre de billes

$f_r$  = fréquence de rotation

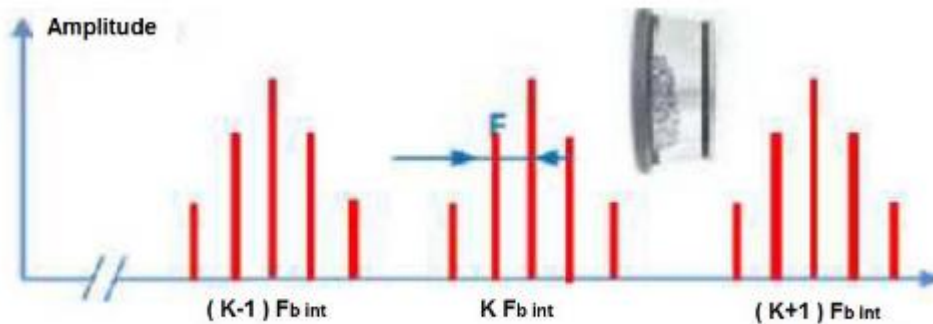


**Figure II.9 :** Image vibratoire théorique d'un défaut de bague extérieure.

### II.7.2.3 Défaut sur la bague intérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (figure 2.10) Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation [9].

$$F_{bint}(Hz) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_s}{D_p} \cos \beta \right) \quad (2.11)$$



**Figure II.10 :** Image vibratoire théorique d'un défaut de bague intérieure.

#### II.7.2.4 Défaut sur l'élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage. Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation [9].

$$F_{billes}(Hz) = \frac{Dp}{2Ds} f_r \left[ 1 - \left( \frac{Ds}{Dp} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

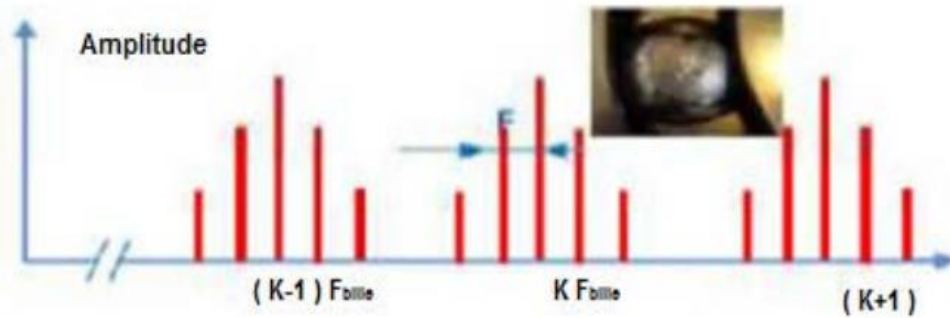


Figure II.11 : Image vibratoire théorique d'un défaut de bille.

#### II.7.2.5 Défaut sur la cage

Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence  $f_c$  et ses harmoniques [5]. Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation

$$F_{cages} = F_{outer}(Hz) = \frac{1}{2} f_r \left( 1 - \frac{Ds}{Dp} \cos \beta \right) \quad (2.13)$$

Avec :

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

$De$  : diamètre des billes.

$Dp$  : le diamètre moyen du roulement.

$\beta$  : l'angle de contact de la bille avec la cage.

$f_r$  : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe).

### II.8 Les capteurs de détection de vibration

Les capteurs le plus utilisé pur détection de vibration est le capteur de déplacement, capteur de vitesse et le capteur d'accélération il y a an autre diffèrent types de capteurs pour détection la vibration.

#### II.8.1 Capteur de déplacement

Le capteur le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur proximètre c'est un capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure (2.12), est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur [10].

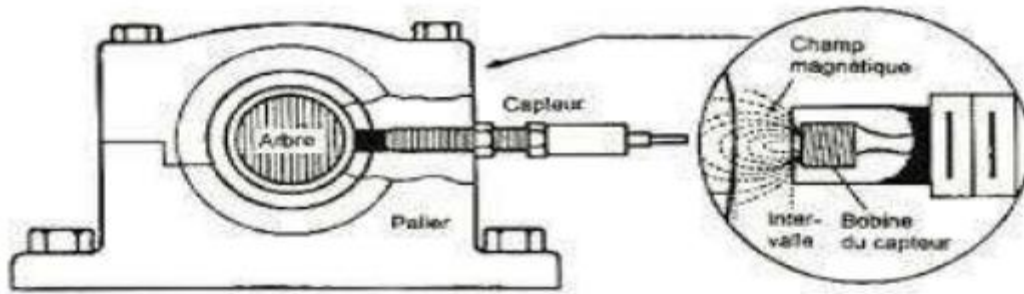


Figure II.12 : Proximètre.

### II.8.2 Capteur de vitesse

Les capteurs de vitesse ou vélocimétries sont constitués d'une sonde à contact dite sonde mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur [6].

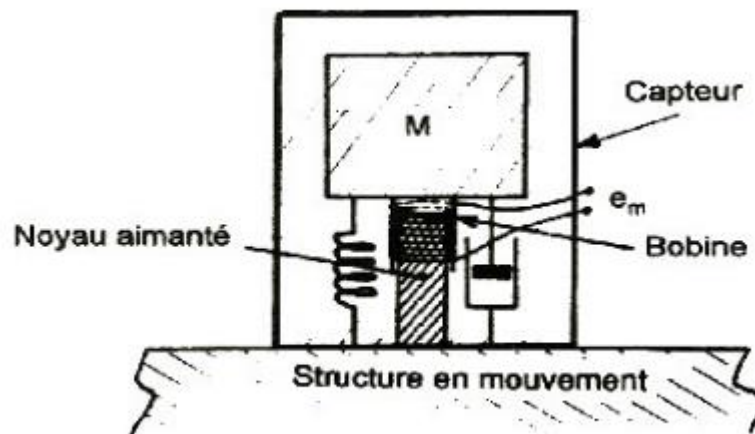
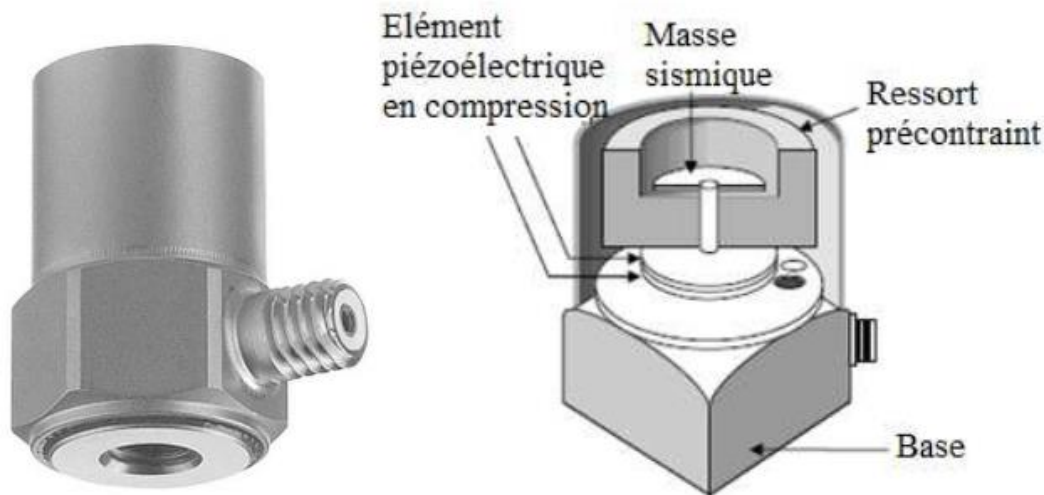


Figure II.13 : Vélocimétrie.

### II.8.3 Capteur d'accélération

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie [1].



**Figure II.14 :** Exemple d'un accéléromètre piézoélectrique.

## II.9 Modes de détection

En mesure vibratoire on utilise couramment les modes de détection suivants [1] :

- Valeur efficace (RMS).
- Valeur crête.
- Valeur crête à crête.
- Kurtosis.

### II.9.1 Valeur efficace

Pour une vibration périodique, la valeur efficace est la moyenne quadratique des valeurs efficaces de chacune des vibrations harmoniques la constituant :

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} (X_{1eff}^2 + X_{2eff}^2 + \dots + X_{neff}^2)} \quad (2.14)$$

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(T) dt P(X)} \quad (2.15)$$

### II.9.2 Valeur crête $X_c$

La valeur crête d'une vibration est la valeur maximale prise par la valeur  $x(t)$  dans l'un des sens positif ou négatif.

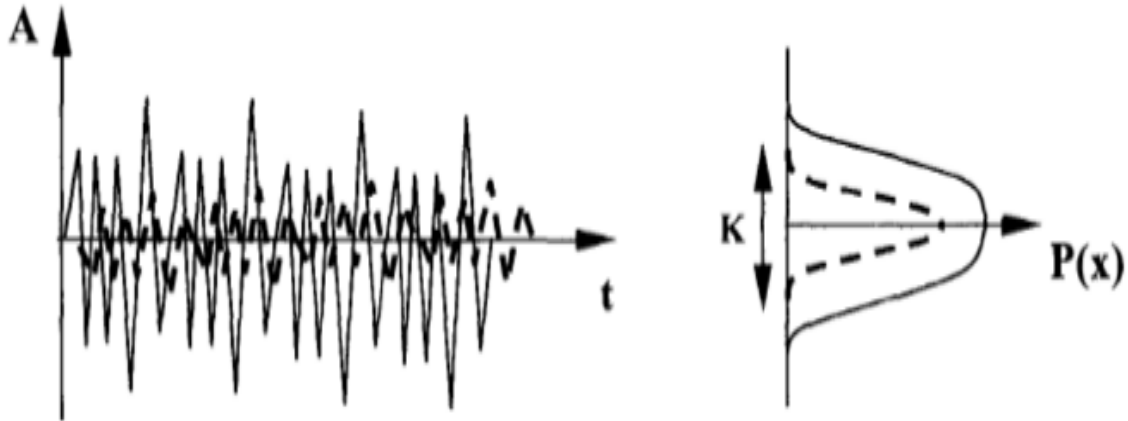
### II.9.3 Valeur crête à crête $X_{cc}$

La valeur crête à crête d'une vibration est la somme des deux valeurs crêtes pour les sens positif et négatif.

### II.9.4 kurtosis

C'est un indicateur statistique permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal. c'est un paramètre sans dimension qui caractérise l'aplatissement de la densité de probabilité du signal.

$$K = \int_{-x}^{+x} \frac{(x+\bar{x})^4}{\sigma^4} p(x) \quad (2.16)$$



**Figure II.15 :** *Signal temporel et distribution de l'amplitude.*

## II.10 Conclusion

L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques.

Les systèmes de capture et de transmission des vibrations influent sur la qualité de la méthode de diagnostic vibratoire.

Au stade de diagnostic, l'analyse vibratoire constitue une des meilleures méthodes en particulier pour l'étude des pannes mécaniques sur les machines tournantes.

Ce chapitre présente une étude théorique sur l'analyse vibratoire et les Défauts les plus connus pour des machines électriques tournantes.

# **Chapitre III. La transformée de Hilbert**

## **Huang**

### III.1 Introduction

La transformée de Hilbert Huang (THH) est une méthode d'analyse temps-fréquence. Cette méthode consiste à décomposer, de façon adaptative, le signal en une somme de composantes oscillantes qui possède une seule fréquence à chaque échantillon, pour ensuite calculer la fréquence et l'amplitude instantanée de chacune de ces composantes en utilisant la transformée de Hilbert. [1]

Au cours de ce chapitre, on cite les deux étapes de la transformée de Hilbert Huang : La transformée de Hilbert et la décomposition modale empirique(EMD) de Huang. Ensuite on les applique pour le diagnostic des défauts des roulements.

### III.2 La décomposition modèle empirique d'un signal (EMD)

Cette technique (EMD ou "Empirical Mode Decomposition") est une méthode d'analyse de signal qui a été introduite par Norden Huang, ingénieur de la NASA, appliquée au départ en 1998, pour décomposer tout signal en une série de composantes oscillantes extraites directement de celui-ci de manière adaptative [2]. Ces composantes (ou IMF pour "Intrinsic Mode Functions") s'interprètent comme des formes d'ondes non stationnaires. (Modulées en amplitude et en fréquence) pouvant être éventuellement associées à des oscillations non linéaires.

Idéalement, ces IMFs sont des fonctions oscillantes, de moyenne nulle, et de plus, celles-ci reflètent les fréquences présentes localement dans le signal, depuis les plus hautes fréquences vers les plus basses. Le résidu est un terme basse-fréquence qui donne la tendance globale du signal.

La décomposition en mode empirique est une méthode d'itération au cours de laquelle chaque estimation de mode est retranchée du signal analysé et où l'estimation du mode suivant est conduit à partir du signal résidu [3].

### III.3 Transformée de Hilbert

Tout signal sinusoïdal réel  $A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)$  peut être transformé en un signal complexe  $A \cdot e^{j(\omega t + \phi)}$  en générant une composante en quadrature de phase :  $A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$ , servant de partie imaginaire :

$$A \cdot e^{j(\omega t + \phi)} = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi) + jA \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \quad (3.1)$$

Pour les signaux plus compliqués, qui sont exprimables par une somme de plusieurs sinusoïdes, nous pouvons utiliser un filtre qui déphase chaque composante d'un quart de période, cette méthode est appelée la transformée de Hilbert [1].

Ces deux étapes, EMD et transformée de Hilbert, permettent d'obtenir trois dimensions (temps, fréquence et amplitude) représentation du signal.

### III.4 Définition de l'Intrinsèque

Dans l'ensemble des données, le nombre d'extrema et le nombre de passages à zéro doivent égaux ou Mode Fonction (IMF)

Une IMF, pour Intrinsèque Mode Fonction ou mode empirique, est une fonction telle que :

$$IMF: \begin{cases} R \rightarrow R \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Chaque IMF doit satisfaire les contraintes suivantes :

- ✓ Diffèrent au maximum de un.
- ✓ A chaque instant t, la valeur moyenne de l'enveloppe définie par les maxima locaux et de l'enveloppe définie par la section locale minima est proche de zéro [4].

### III.5 L'algorithme de tamisage (SiftingProcess)

L'organigramme de l'algorithme de l'EMD est illustré dans la figure (Figure 3.1). Cet algorithme comporte deux boucles imbriquées. La boucle principale qui correspond au concept même. Elle s'arrête lorsqu'il n'est plus possible d'extraire de résidu. Cela permet de définir le niveau  $N$  de profondeur de la décomposition. D'après la deuxième condition de la définition de l'IMF, les deux enveloppes  $Env_{min}$  et  $Env_{max}$  doivent être symétriques par rapport à zéro. D'où la nécessité d'ajouter une boucle supplémentaire qui correspond à une opération appelée processus de tamisage (ou sifting). L'arrêt de cette boucle est lié à un critère qu'il convient de définir précisément [5].

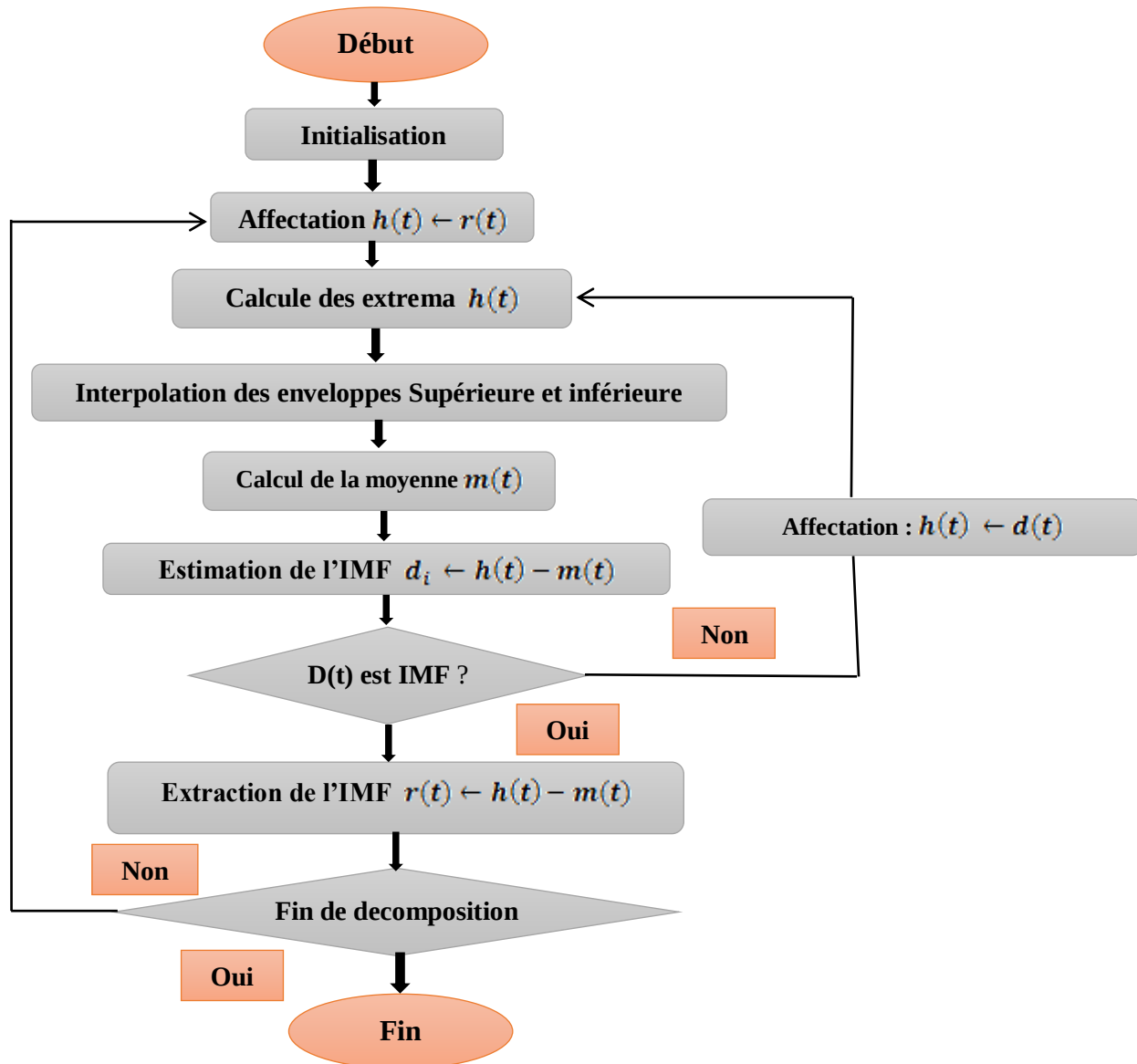


Figure III.1 :L'Organigramme de l'algorithme de l'EMD [28].

#### ✓ Décomposition avec EMD d'un signal simple

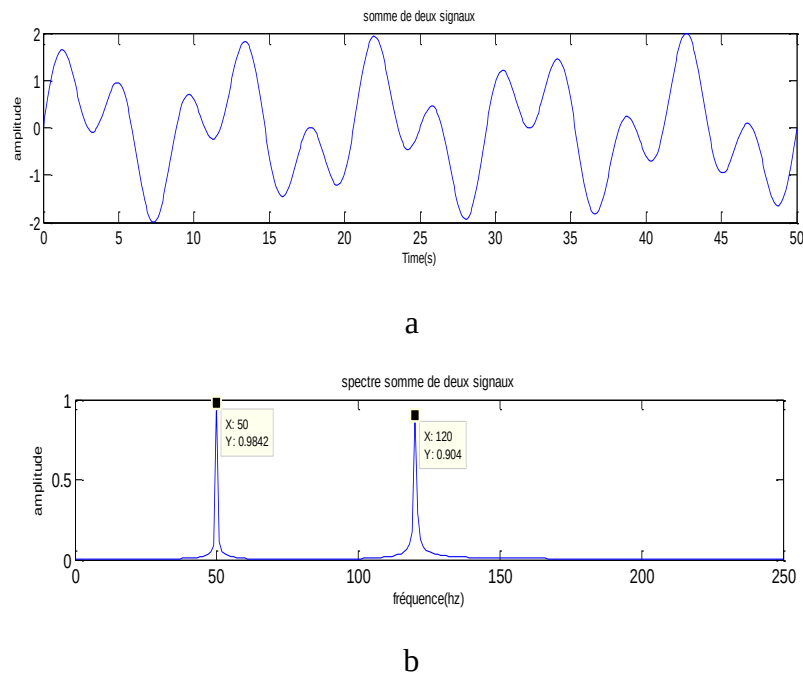
Pour la méthode EMD appliquée à un signal simple de deux signaux sans bruit, l'exemple suivant montre la décomposition de ce signal, ensuite le dé-bruitage [6].

Soit le signal  $x(t)$  :

$$X(t) = \sin(w_1 t) + \sin(w_2 t) \quad (3.3)$$

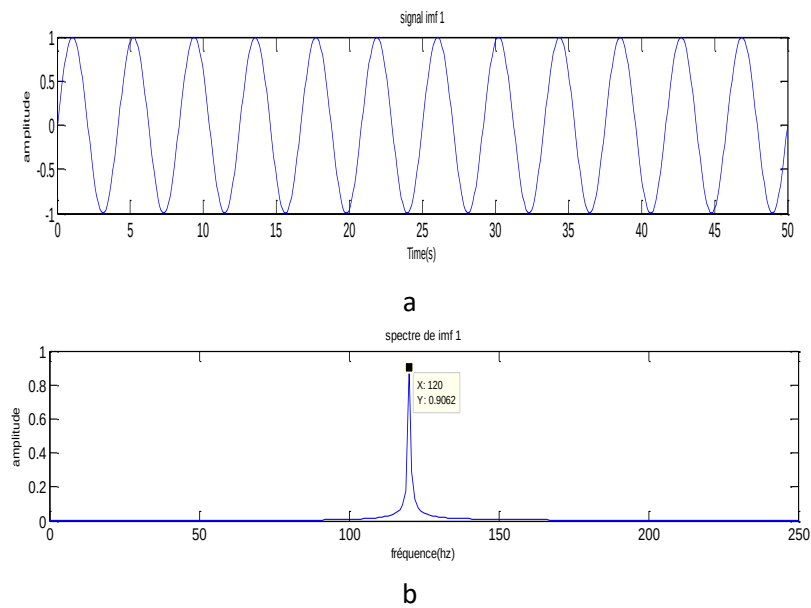
Avec  $w_1 = 2\pi 50$  rad/s, et  $w_2 = 2\pi 120$  rad/s et  $f_1 = 50$  Hz,  $f_2 = 120$  Hz.

Le signal temporel est donné par la figure (3.02.a), et son spectre par la figure (3.2.b).



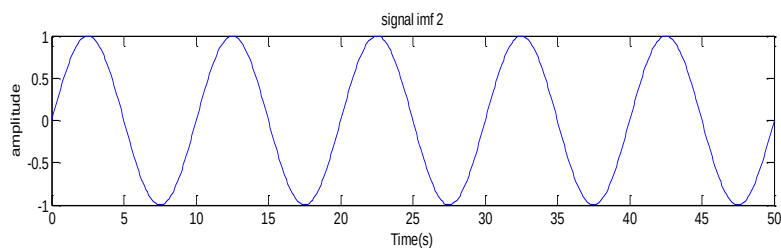
**Figure III.02 :** Somme de deux sinus : a) Signal temporel, b) Son Spectre.

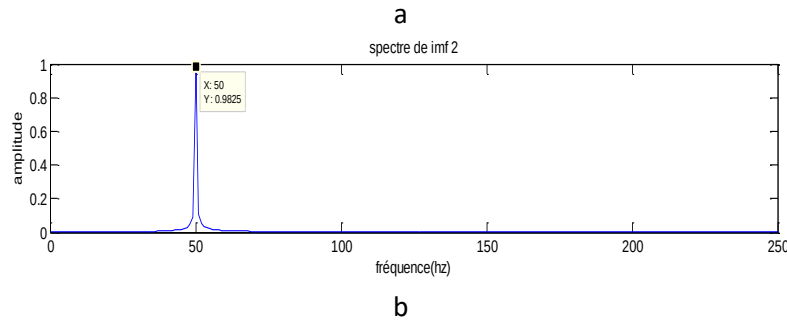
En appliquant la méthode de l'EMD, pour les deux signaux précédents, le signal d'IMF1 est donné par la figure (3.3.a), et son spectre par la figure (3.3.b).



**Figure III.3 :** a) Signal de IMF1, b) Spectre de l'IMF1.

Le signal d'IMF2 et son spectre sont illustrés par la figure (3.04)





**Figure III.4 :** a) signal IMF2, b) Spectre de l'IMF2.

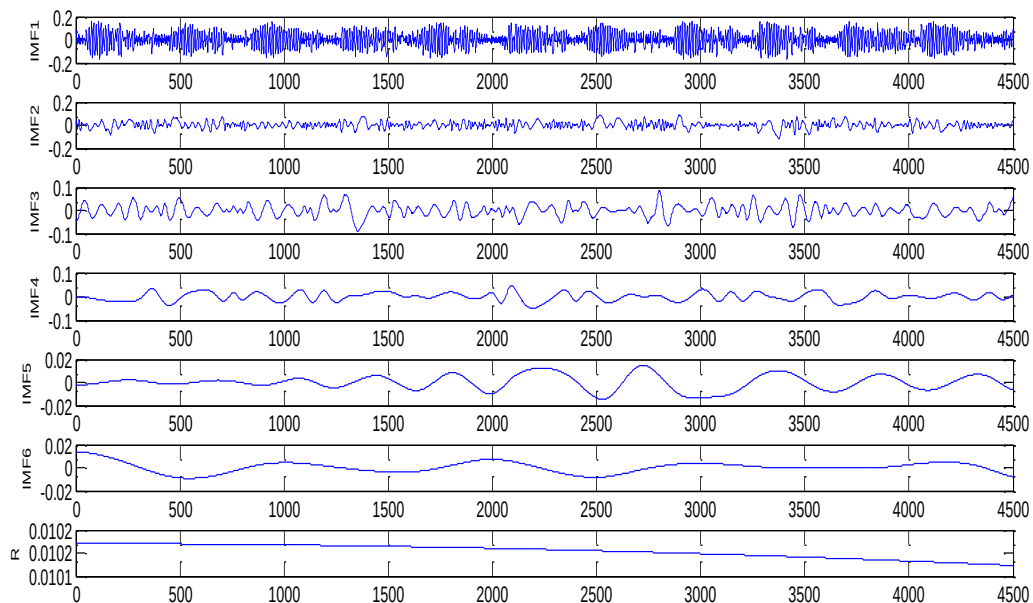
D'après cet exemple, on voit que la décomposition EMD commence par le signal qui a la fréquence élevée en allant vers le signal de basse fréquence.

## III.6 Application de la transformée (THH) au diagnostic des défauts de roulement

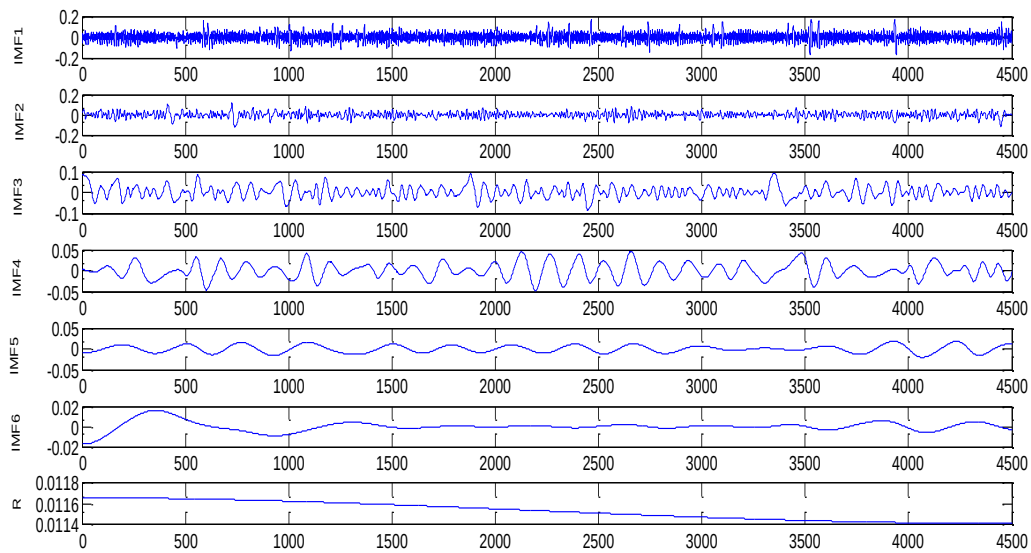
### III.6.1 Analyse de signaux des défauts par la méthode Hilbert Huang

Les figures ci-dessous montrent les premières IMFs de la décomposition des quatre signaux qui correspondent respectivement aux quatre états de défaut de roulement : sain, défaut de la bague intérieure, défaut de la bague extérieure et le défaut de billes, pour un diamètre de défaut égale à 0.007", et pour différentes charges (0HP ,3HP) [1].

#### ➤ Etat sain des roulements

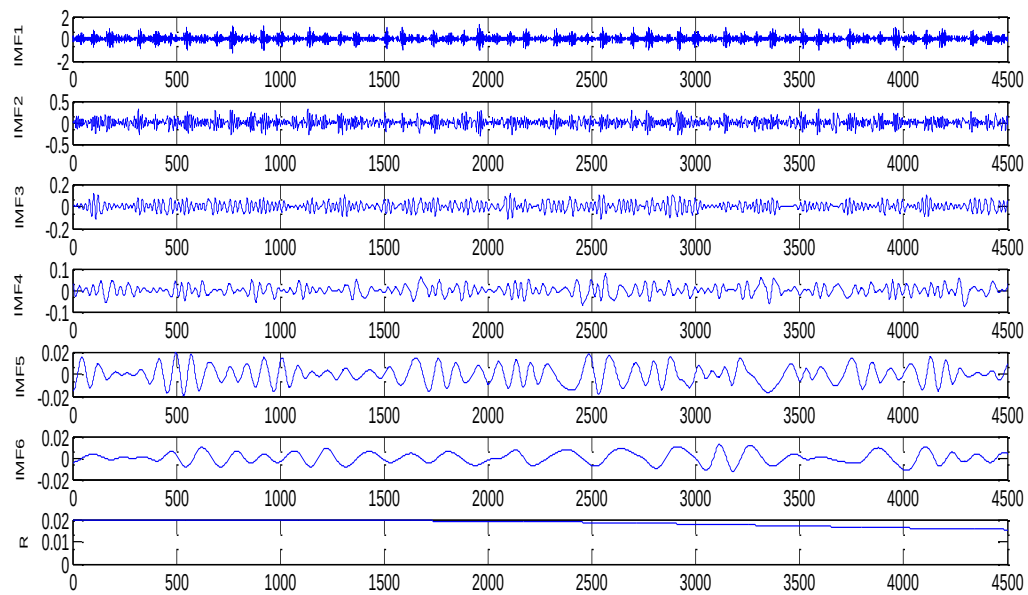


**Figure III.5 :** Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain à vide.

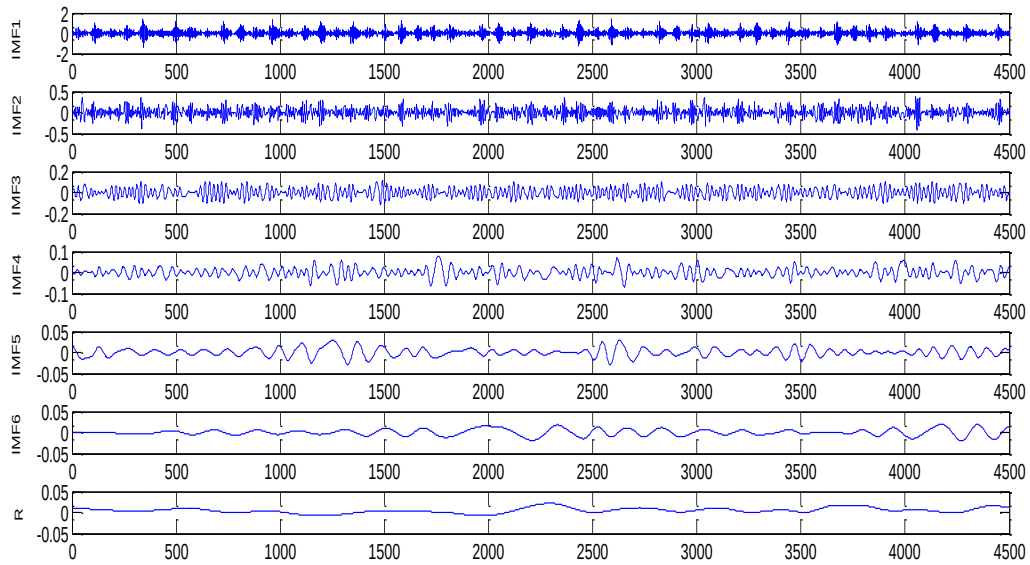


**Figure III.6 :** Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain en charge de 3HP.

### ➤ Défaut de bague intérieure

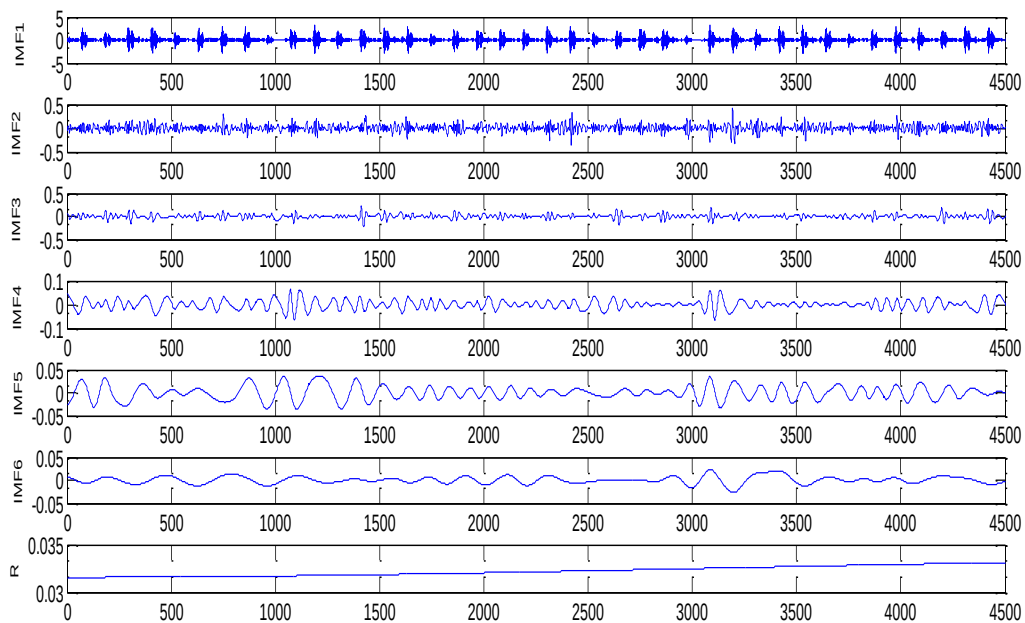


**Figure III.7 :** Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure à vide.

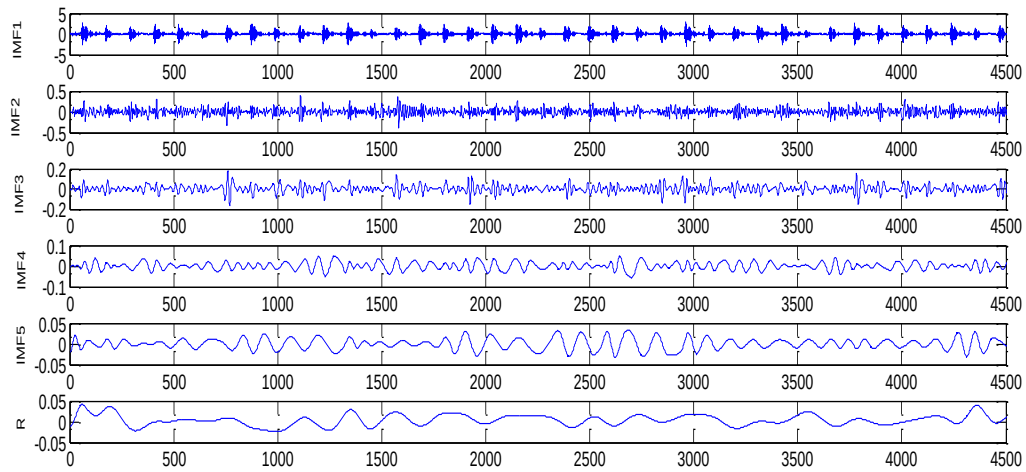


**Figure III.8 :** Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure en charge de 3HP.

➤ **Défaut de bague extérieure à accéléromètre centré**

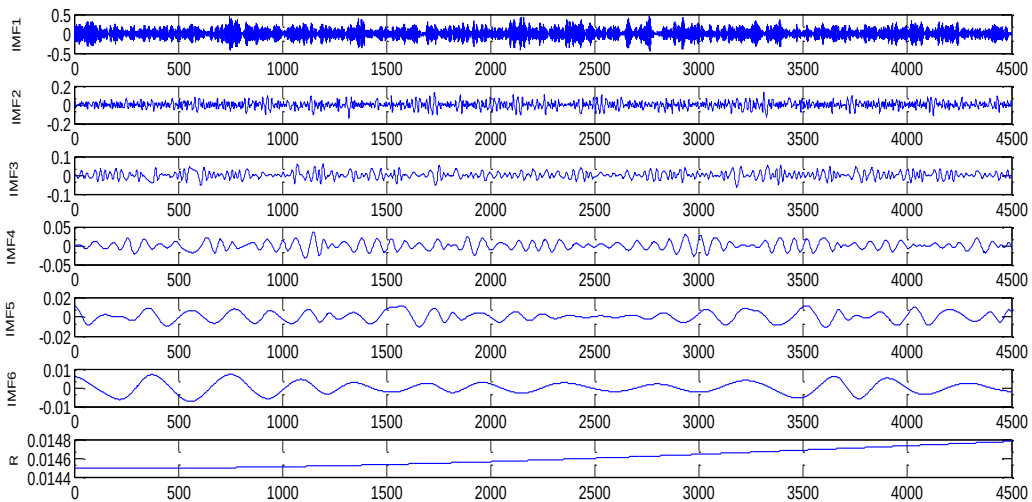


**Figure III.9 :** Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré à vide.

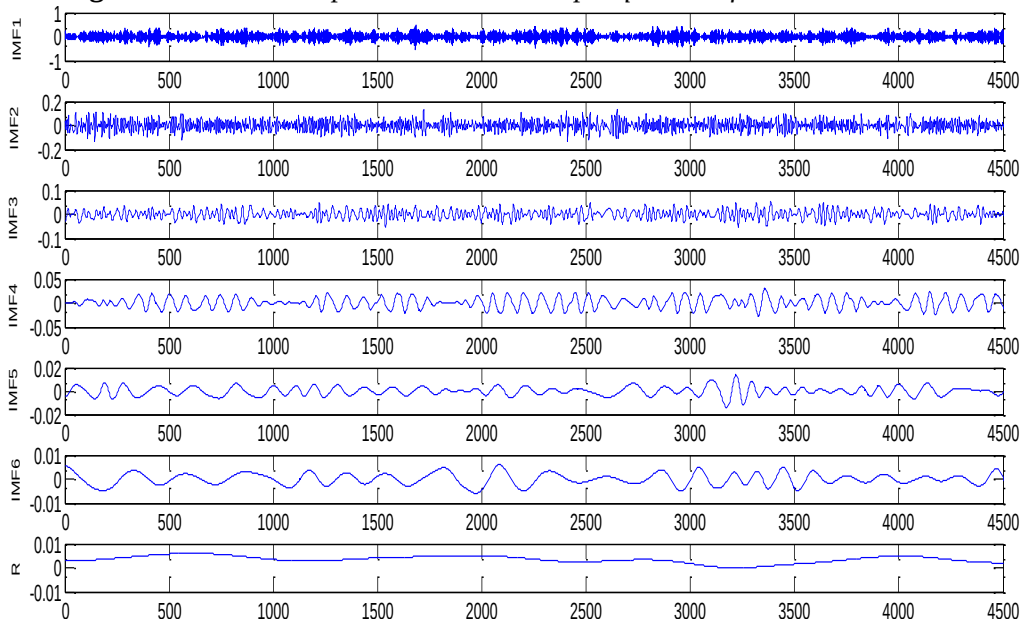


**Figure III.10 :** Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré en charge de 3HP.

➤ Défaut de billes



**Figure III.11 :** Décomposition en mode empirique du défaut de billes à vide.

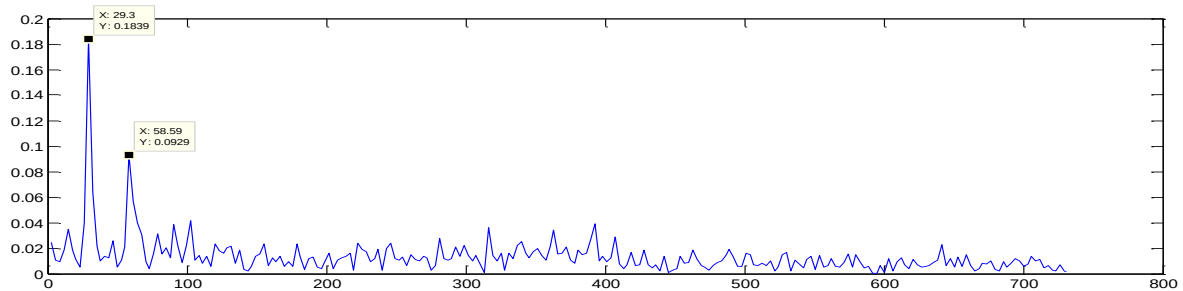


**Figure III.12 :** Décomposition en mode empirique du défaut de billes en charge de 3HP.

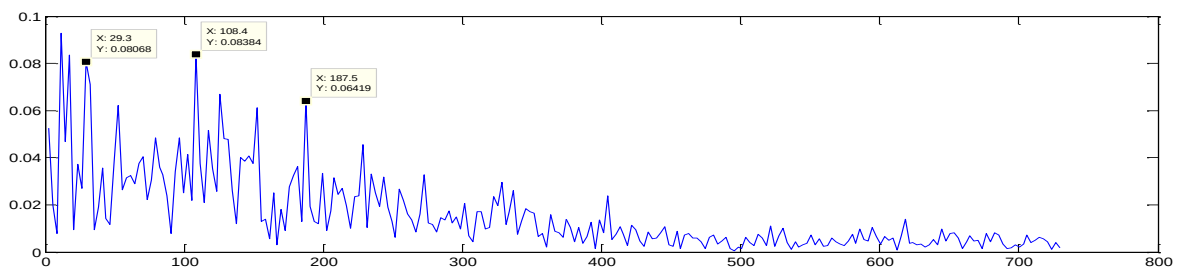
### III.6.2 Analyse spectral d'Hilbert des IMFs

#### ➤ Analyse spectral d'Hilbert à l'état sain

✓ A vide



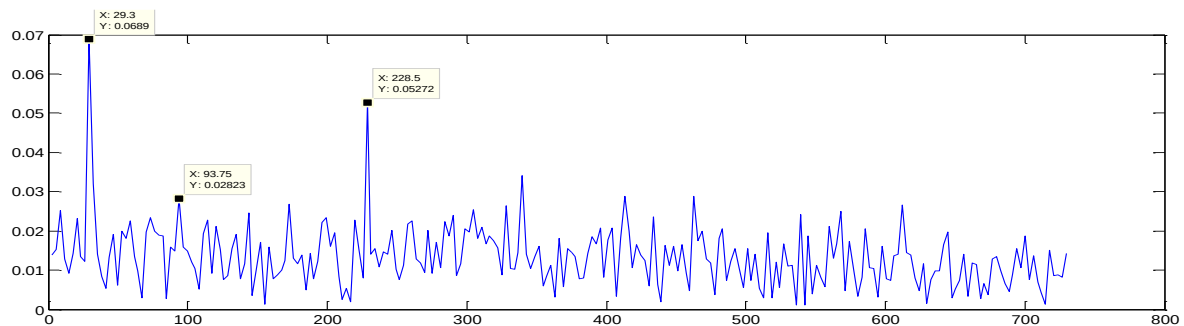
**Figure III.13 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide.



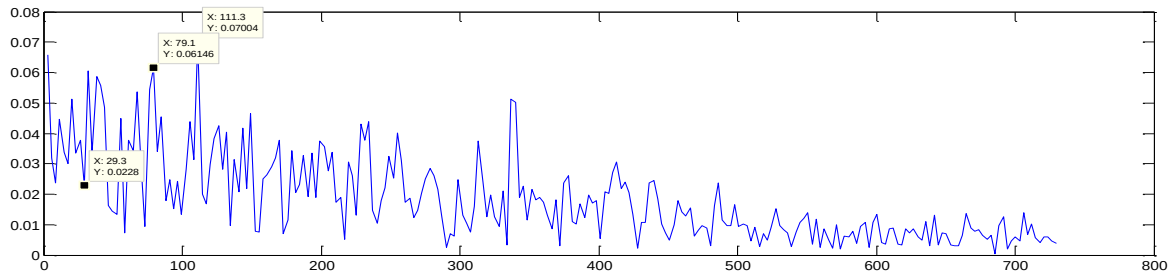
**Figure III.14 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide.

Les figures (3.13, 3.14) montre le spectre d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas sain (vide et charge), pour des deux premières IMFs du signal du roulement sans défaut, sur les spectres nous pouvons lire facilement la fréquence de rotation et ses harmoniques. Nous remarquons l'absence totale de la fréquence de défaut (pas de défaut).

Les figures (3.15, 3.16) montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas sain pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. La figure (3.15) (IMF1) qui permet de lire distinctement la fréquence de rotation 29.3Hz avec une absence totale de la fréquence de défaut (pas de défaut).



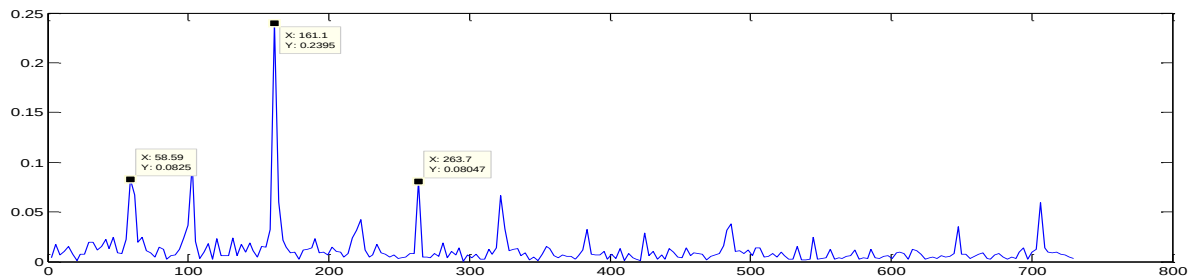
**Figure III.15 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP.



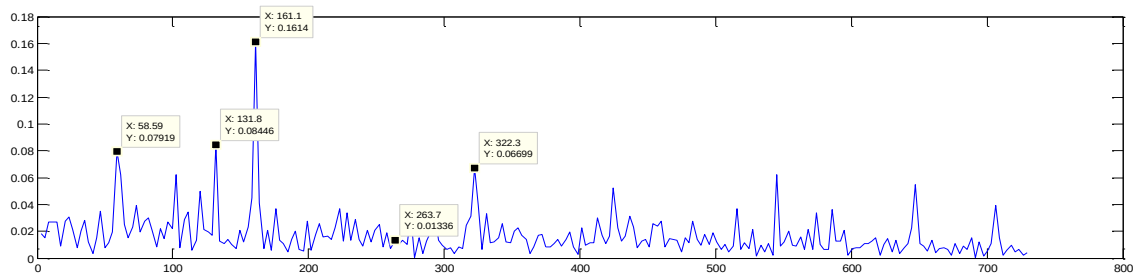
**Figure III.16 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP.

### ➤ Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bague intérieure

Les figures(3.17, 3.18) présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague intérieure, les deux IMFs présentent la fréquence première harmonique de rotation 29.3 Hz .la fréquence de défaut de la bague intérieure qui est égale 161.1 Hz qui est l'harmonique caractéristique ce type de défaut.

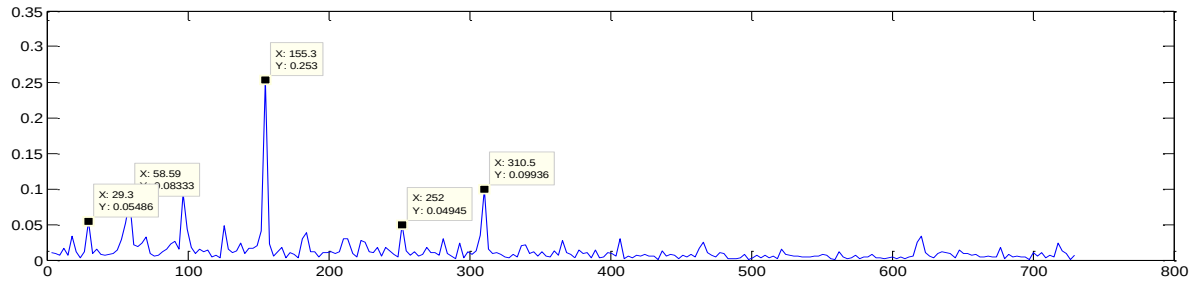


**Figure III.17 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure à vide.

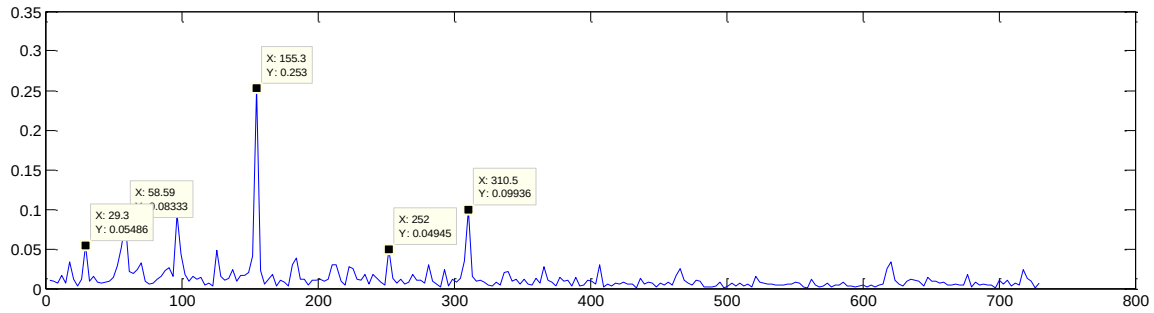


**Figure III.18 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure à vide.

Les figures (3.19, 3.20) montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague intérieure pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. on constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz et une fréquence caractéristique ce type de défaut 155.3Hz.

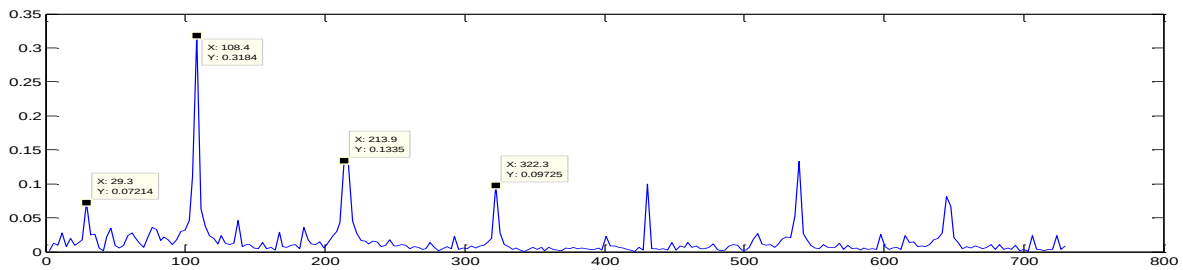


**Figure III.19 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure pour charge de 3HP.

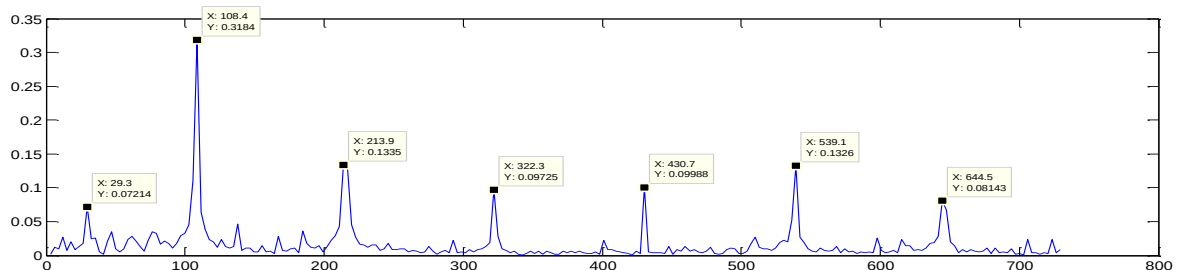


**Figure III.20 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure pour charge de 3HP.

➤ **Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré**



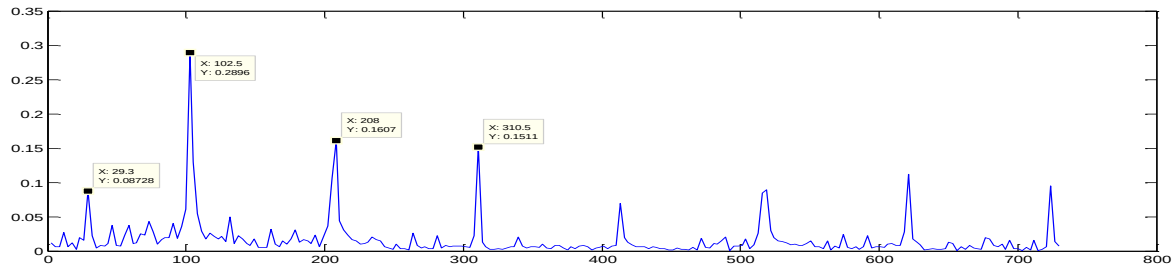
**Figure III.21 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure à vide.



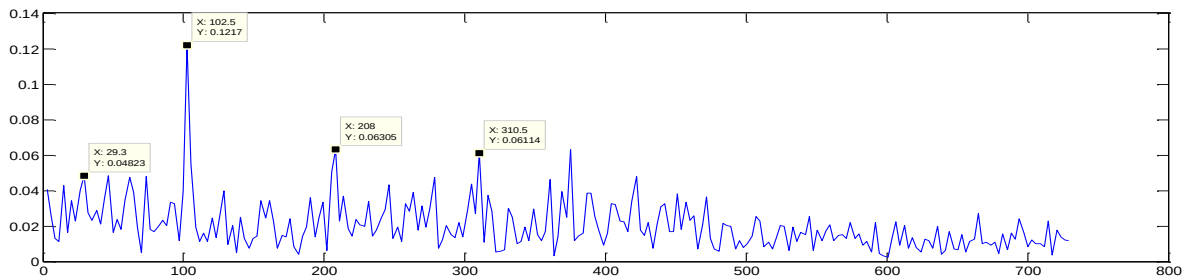
**Figure III.22 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure à vide.

Les figures (3.21, 3.22) présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague extérieure, les deux IMFs présentent la fréquence de rotation 29.3Hz, la

fréquence de défaut de la bague extérieure qui est égale à 108.4 Hz et ses harmoniques.



**Figure III.23 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure pour une charge de 3HP.

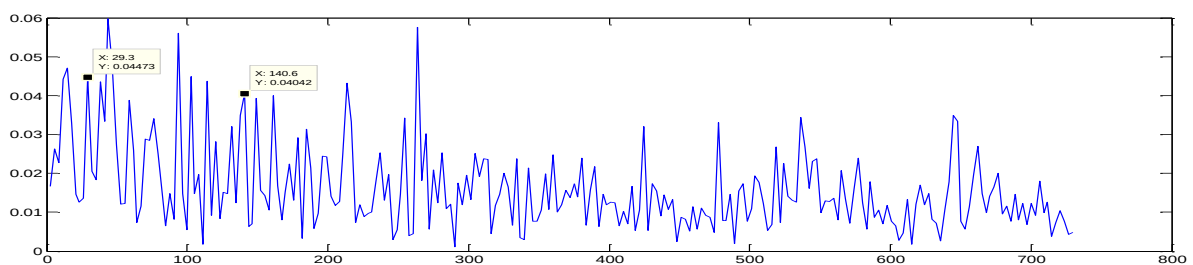


**Figure III.24 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure pour une charge de 3HP.

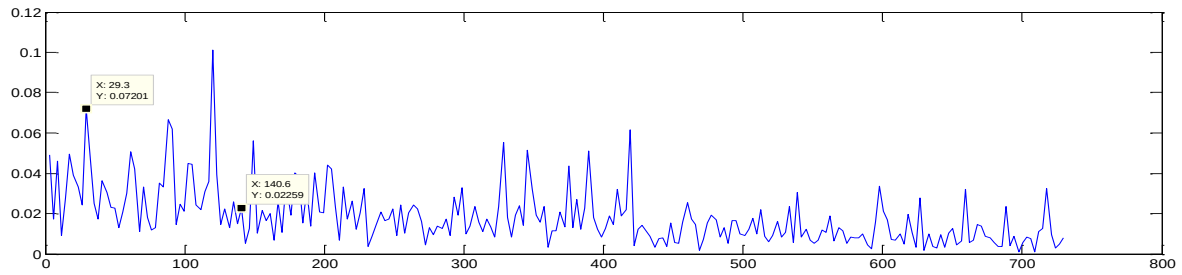
Les figures (3.23, 3.24) montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague extérieure pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. On constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz et une fréquence de défaut 102.5Hz. et un nombre d'harmonique plus que IMF1.

### ➤ Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bille

Les figures (3.25, 3.26) présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bille, les deux IMFs présentent la fréquence de rotation 29.3Hz, et la première IMF1 permet de lire distinctement la fréquence de défaut 140.6Hz.

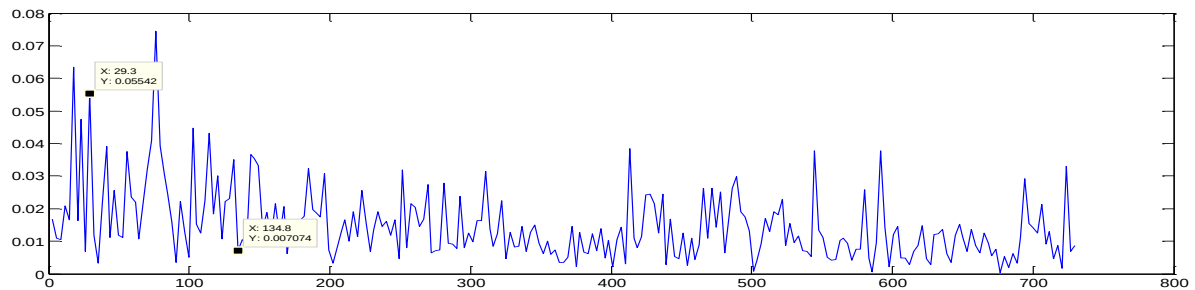


**Figure III.25 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de bille Avide.

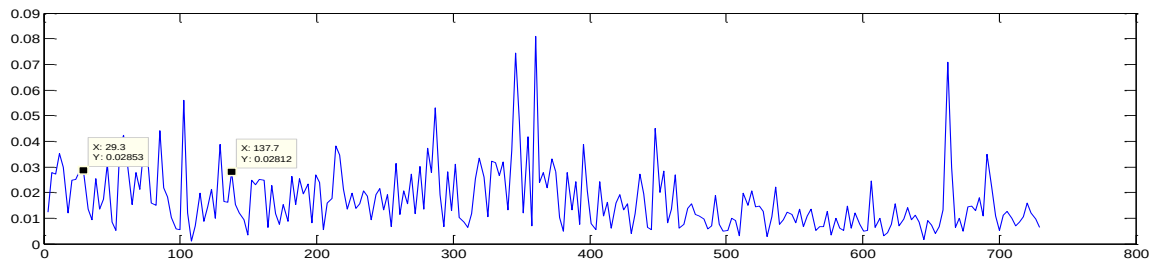


**Figure III.26 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de bille Avide.

Les figures (3.27, 3.28) montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bille pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. On constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz. L'apparition de la fréquence de défaut dans le spectre IMF2 plus claire qu'IMF1.



**Figure III.27 :** Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de bille pour charge de 3HP.



**Figure III.28 :** Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de bille pour charge de 3HP.

A partir des spectres de Hilbert obtenus précédemment avec différents fonctionnement de la machine (fonctionnement sain et fonctionnement avec différents défauts), nous avons pu relever les amplitudes et les fréquences des harmoniques existants dans les spectres des signaux. Les valeurs obtenues sont portées dans tableau suivant :

| Etat de défaut             | Charge du moteur | Fréquence Caractéristique (Hz) | Fréquence de défaut (Hz) | Amplitude (dB) IMF1 | Amplitude (dB) IMF2 |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| sain                       | 0HP              | 29.95                          | *                        | *                   | *                   |
|                            | 3HP              | 28.83                          | *                        | *                   | *                   |
| Défaut de bague intérieure | 0HP              | 29.95                          | 162.18                   | 0.2395              | 0.1614              |
|                            | 3HP              | 28.83                          | 156.11                   | 0.256               | 0.253               |
| Défaut de bague extérieure | 0HP              | 29.95                          | 107.01                   | 0.3184              | 0.3184              |
|                            | 3HP              | 28.83                          | 103.32                   | 0.2896              | 0.1217              |
| Défaut de bille            | 0HP              | 29.95                          | 140.74                   | 0.04042             | 0.02259             |
|                            | 3HP              | 28.83                          | 135.89                   | 0.007074            | 0.02812             |

**Tableau III.1 :** *Fréquences et amplitudes d'IMF1 et IMF2.*

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d'analyse d'un signal non linéaire et non stationnaire qui est la transformée de Hilbert-Huang (H.H.T). Cette technique est composée de deux types de transformées. La première dite de Huang ou de décomposition modale empirique permet de décomposer un signal en ensemble d'IMF.

Les IMFs sont triées dans l'ordre décroissant allant de la plus haute fréquence à la plus basse fréquence. La dernière IMF, appelée résidu correspond à la composante de la fréquence la plus basse, Le EMD est une technique simple et plus avantageuse par rapport aux autres méthodes d'analyse de signaux non stationnaires.

La deuxième qui est la transformée de Hilbert permet d'estimer l'amplitude et la fréquence instantanée de chaque composante.

Les résultats d'analyse temps-fréquence de signaux par THH ont montrés l'efficacité de la méthode, de même pour le spectre on distingue facilement les fréquences caractéristiques de défaut de chaque élément de roulement, ainsi que leurs amplitudes sont claires sur le spectre.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail, c'est la classification automatique des défauts de roulement de la machine asynchrone. Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Cependant, statistiquement les défauts de roulements constituent la grande part des défauts de la machine asynchrone.

Cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant les forces de frottements entre eux.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil et les différents défauts qui peuvent affecter son bon fonctionnement, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Ensuite donner une idée générale sur la constitution et la conception des roulements, on avait aussi cité les différents types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter en indiquant les de chaque défaut.

Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : le grippage dû à l'absence de lubrification, la corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant et la corrosion de contact due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues etc...

Ces défauts apparaissent au niveau de la bague extérieure, la bague intérieure, la cage et les éléments roulants (billes). Chaque type de défaut dans ces quatre éléments de roulement à une fréquence caractéristique spécifique.

La technique étudiée pour la détection de défauts de roulement est basée sur l'analyse des signaux vibratoires dans le domaine temporel et fréquentiel. été traités par deux méthodes classiques. Il s'agit de l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier et l'analyse d'enveloppe basée sur la Transformée de Hilbert Huang.

La méthode de la EMD a été appliquée directement sur l'ensemble des signaux de la base de signaux de Case Western Reserve University (CWRU, Bearing Data Center) comportant des vibrations des différents modes de fonctionnement du moteur asynchrone (sain, défaut de la bague interne et bague externe, défaut des billes), et nous avons alors

obtenu pour chaque signal un ensemble d'IMFs qui le caractérise, pour chacune des ces IMFs nous avons calculé les spectres d'amplitude en utilisant la transformée de Hilbert, et comme pas toutes les IMFs sont significatives, nous avons opté alors pour une méthode de sélection des IMFs les plus pertinentes.

Les résultats de simulation des signaux simulant les défauts de roulement et les signaux réels d'un roulement sain est défectueux nous a permis de voir que l'analyse d'enveloppe élimine le bruit mais les interférences de vibrations restent présentes.

La décomposition modale empirique(EMD) est une technique innovante et plus avantageuse pour la détection des singularités des signaux par rapport aux autres techniques d'analyse de signaux non linéaires et non stationnaires telles que la transformée en FFT, STFT, WT...etc. est plus performante.

## **Références bibliographiques**

---

# Références bibliographiques

## Chapitre I

- [1] Multon B., Ahmed H.B., Bernard N., Cavarec P.E., 2000. "Les moteurs électriques pour applications de grande série". *Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan*. Revue 3EI. Site web : <http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr>
- [2] Tayoub Y., 2009. " Algorithme d'optimisation par essaim de particules (OEP): Application aux machines asynchrones du type HEM ", Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.
- [3] Didier G., 2004. "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [4] Chahmi A., 2007. "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic", Thèse doctorate, University of Sciences and Technology of Oran, Algeria Mohamed Boudiaf.
- [5] Schaeffer E., 1999. *Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts*", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [6] Ondel O., 2006. "Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application a un Ensemble Convertisseur-Machine ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon.
- [7] Allianz , 1988. "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes", cahier des préventions. CP2.
- [8] Thorsen O.V. & Dalva M., 1995. "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, no.5, pp.1186-1196.
- [9] Ondel O., 2006. "Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone ". Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
- [10] Didier. G, 2004. " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances". Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [11] Nandi S., Toliyat H.A, & Xiaodong Li., 2005." Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review". *IEEE Transaction on Energy conversion*, Vol. 20, No, 4.

---

[12] Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. and Vas P., 1996. "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect" in *Proc. IEEE Industry Applications Soc. Annu. Meeting Conf.*, San Diego, CA, Oct. 6–10, pp. 655–662.

[13] Filippetti F., Franceschini G., Tassoni , 1994. "Broken Bar Detection in Induction Machines; Comparaison between Current Spectrum Approach an Parametre Estimation Approach", *IEEE Industry Application Conference 94*, Vol. 1.

## Chapitre II

[1] Larba W., 2018. " Surveillance vibratoire et interventions pratiques sur le Compresseur «SPIROS ». Thèse de Master, université d'Annaba.

[2] Djebili O., 2013. " Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement ". Thèse de doctorat, université de Reims Champagne Ardenne.

[3] Mokhtari Y., 2019. " Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire". Thèse de Master, université de Mohamed Khider, Biskra.

[4] Akbi B., Hamzaoui M., 2017. " Analyse vibratoire des défauts courants dans le parc machine de la centrale thermique RAS-DJINET". Thèse de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes.

[5] Cherifi F., Smaili Y., 2014. " Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive conditionnelle". Thèse de Master, Université Abderahmane MIRA, Bejaia.

[6] Mazouzi N., Bourihane M., 2012. " Diagnostic par Analyse Vibratoire d'un Groupe Electropompe".Thèse de Master, Université Abderahmane MIRA, Bejaia.

[7] Saoudi A., Decha M., 2018. " La transformée en ondelettes et l'analyse en enveloppe pour le diagnostic des défauts dans les roulements à bille". Thèse de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa.

[8] Rabhi M., Zouaoui N., 2013. " Diagnostics de défauts de roulements par analyse vibratoire au sein de la briqueterie de REMILA". Thèse de Master, Université Abderahmane MIRA, Bejaia.

[9] Guenifed. A, 2012." Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes", (thèse de Master, Université de tlemcan,).

[10] Haddar A., 2019. " Evaluation non destructive par courant de foucault de la caractéristique électrique des pièces amagnétiques". Thèse de Magister, Université de Bejaia.

---

### Chapitre III

- [1] Hamdad N., 2013. *Transformée de Huang-Hilbert : Application à la détection des défauts* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou).
- [2] Messaoudi F. & Sadok H., 2016. *Conception d'une interface graphique pour une analyse du signal électromyogramme (EMG) par la transformée en ondelette et la décomposition modale empirique* (Doctoral dissertation).
- [3] Kirati M.S., 2015. *Application de la méthode EMD (Empirical Mode Decomposition) pour la détection des défauts de roulements*.
- [4] Rilling G., 2007. *Décompositions Modales Empiriques. Contributions à la théorie, l'algorithmie et l'analyse de performances* (Doctoral dissertation).
- [5] Lakhdar H.A.F.S.I., 2016. *Application de la technique EMD pour l'analyse des données des signaux de fuite dans les réseaux de distribution d'eau*. Doctoral dissertation, Université de M'sila.
- [6] Taha B.A.A.L.I., 2017. *Application de l'Ensemble de décomposition en mode empirique (EEMD) Pour la Détection des Défauts de Roulement en Régime Variable*.

---