

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

SPÉCIALITÉ : INSTRUMENTATION

RÉALISÉ PAR :

BABOU Sonia

KECIRI Fatima

Thème

**DIAGNOSTIC DES MOTEURS A INDUCTION PAR UTILISATION DES
CAPTEURS DE VIBRATION**

Soutenu le 30/06/2018 devant le jury composé de:

Mr. SADJI

Mme. BELHSENE

Proposé et dirigé par :

Mr. TAFININE Farid

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

Nous remercions très vivement Monsieur **TAFININE FARID**, d'avoir encadré ce travail pour la confiance qu'il nous a accordée en nous permettant d'effectuer nos recherches, de ses conseils et son aide ont été des plus utiles pour l'aboutissement de ce travail. Sa grande disponibilité et ses nombreuses idées furent un soutien très précieux.

Nous exprimons notre gratitude à Monsieur **SADJI** pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury et pour sa lecture attentive de notre manuscrit. Madame **BALAHESSANE**, d'avoir accepté de participer à notre jury. Nous la remercions pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail.

Merci à tous ceux qui nous ont apporté leurs soutiens et leurs aides d'une manière ou d'une autre.

Nous tenons enfin à remercier notre famille qui nous a toujours gardé leur amour malgré les distances.

Dédicaces

*C'est avec un grand plaisir et une fierté que je dédie ce modeste travail à :
Mes très chères père, mère et à ma grand-mère source d'amour et tendresse qui
ont sacrifié toujours pour me voir réussir*

Mon très cher unique frère

Mes très chères sœurs

*A tous les nombres de ma grande famille qui porte le nom « KECIRI »
Tous mes amis et à tous les étudiants de Master 2 « Instrumentations » Electronique*

Enfin à tout ce qui nous aime et que 'on aime

KECIRI FATIMA

Dédicaces

*C'est avec un grand plaisir et une fierté que je dédie ce modeste travail :
Pour vous mes très chères parents
A mes très chères sœurs (karima et malha) et chères frères
Ainsi que tout mes amie on particulière ma chère sabine.*

BABOU SONIA

Table des matières

Dédicace	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

CHAPITRE I. MACHINE ASYNCHRONE : FONCTIONNEMENT DEFANTS ET DIAGNOSTIC

I.1	Introduction	1
I.2	Constitution de la machine asynchrone	1
I.3	Principe de fonctionnement	2
I.4	Les défauts de la machine asynchrone	3
I.4.1	Défauts internes et externes	3
I.4.1.1	Internes	3
I.4.1.1.1	Mécanique	3
I.4.1.1.2	Electrique	4
I.4.1.2	Externes	4
I.4.1.2.1	Mécanique	4
I.4.1.2.2	Electrique	4
I.4.1.2.3	Envirommentale	4
I.4.2	Clasification des défauts	4
I.4.2.1	Défauts d'origine mécanique	4
I.4.2.1.1	Les défauts de roulements	4
I.4.2.1.2	Les défauts d'excentricités	5
I.4.2.1.3	Défauts du flasque	6
I.4.2.1.4	Défauts de l'arbre	6
I.4.2.2	Défauts d'origine électrique	6
I.4.2.2.1	Les défauts court-circuit	6
I.4.2.2.2	Cassure de Barre	7
I.5	Diagnostic	7
I.5.1	Approche signal	7
I.5.2	Approche modèle	8
I.6	Conclusion	8

CHAPITRE II. APERÇU SUR L'ANALYSE DES VIBRATIONS

II.1	Introduction	9
II.2	Définition de la vibration	9
II.3	Origine des vibrations	9
II.3.1	Les forces aérodynamiques	9
II.3.2	Les forces mécaniques	10
II.3.3	Les force dorigine électrique	10
II.4	Type des vibrations	10
II.4.1	Vibrations périodiques	10

II.4.2	Vibrations apériodiques.....	11
II.5	Mesure du signale vibratoire.....	13
II.5.1	Les capteurs de vibration.....	13
II.5.1.1	Capteur d'accélération (Accéléromètre, principe piézoélectrique.....	13
II.5.1.2	Les Accéléromètres capacitifs.....	14
II.5.1.3	Capture de vitesse (vélocimètres).....	14
II.5.1.4	Les capteurs de déplacement.....	15
II.5.2	Choix de l'emplacement des capteurs.....	15
II.6	Conclusion.....	17
CHAPITRE III. Méthode classique à bas de l'analyse de fourier		
III.1	Introduction.....	18
III.2	Traitement de signal.....	18
III.2.1	Analyse temporelle.....	18
III.2.2	Analyse fréquentielle.....	20
III.2.2.1	Les série de Fourier.....	20
III.2.2.2	La transformée de Fourier.....	20
III.2.2.3	La transformée de Fourier discrète (TFD).....	21
III.2.2.4	La transformée de Fourier rapide (FFT).....	23
III.3	Description du système de mesure.....	23
III.4	Descriptif.....	24
III.4.1	Calcul des paramètrer statistique.....	25
III.5	Conclusion.....	28
CHAPITRE IV. Analyse par ondelette sur des données vibratoires		
IV.1	Introduction.....	29
IV.2	Transformée en ondelette (TO).....	29
IV.3	Définition d'une ondelette.....	29
IV.4	Transformation en Ondelettes Continue(TOC).....	30
IV.4.1	Conditions d'admissibilité.....	31
IV.4.2	Etape d'implémentation de la transformée d'ondelette continue(CWT).....	31
IV.5	Transformation en Ondelettes discrète (TOD).....	32
IV.5.1	Décomposition simple.....	33
IV.5.2	Décomposition multi niveau.....	34
IV.5.3	Décomposition par paquet d'ondelettes.....	35
IV.6	Les Différents Type d'Ondelettes.....	36
IV.6.1	Ondelette de Haar.....	36
IV.6.4	Ondelette de Morlet.....	36
IV.6.5	Chapeau Mexicain.....	36
IV.6.6	Ondelette de Daubechies.....	37
IV.7	Avantage l'analyse en Ondelettes.....	37
IV.8	Applications de l'algorithme de S.Mallat sur les signaux vibratoires.....	38
IV.9	Aplications des paquets d'ondelettes sur les signaux vibratoires.....	40
IV.10	Conclusion.....	41

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 – Constitution de la machine asynchrone	1
Figure I.2 – Photo du stator d'une machine asynchrone.....	2
Figure I.3 – Photo du rotor d'une machine asynchrone	2
Figure I.4 – Dimension du roulement à bille	5
Figure I.5 – Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique; (c) mixte	6
Figure I.6 – Défaut court-circuit statoriques.....	7

Chapitre II

Figure II.1 – Schéma de principe d'un accéléromètre.....	13
Figure II.2 – Shéma de principe d'une vélocimétrie.....	14
Figure II.3 – Schéma de principe d'un capteur de déplacement.....	15
Figure II.4 – Fixation du capteur sur palier	16
Figure II.5 – Choix directionnel pour la prise de mesure	16
Figure II.6 – Choix de l'emplacement du capteur	17

Chapitre III

Figure III.1– Technique de traitement de signal.....	18
Figure III.2 – Dispositif expérimental.....	24
Figure III.3 – Présentation temporelle du signal vibratoire :(a) Machine avec défaut ,(b) Machine sans	26
Figure III.4 – Spectre vibratoire d'une machine saine et avec défaut bague externe	27

Chapitre IV

Figure IV.1 – Représentation temporelle vers ondelettes.....	30
Figure IV.2 – Boites Temps-fréquence des deux ondelettes ψ_{a_1,b_1} et ψ_{a_0,b_0}	31
Figure IV.3 – Les étapes de calcul des coefficients.....	32
Figure IV.4 – Décompositoin du signal f en approximations et détails	33
Figure IV.5 – Décomposition simple du signal f en approximations et détails	34
Figure IV.6 – Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	35
Figure IV.7 – Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3	35
Figure IV.8 – Ondelette Chapeau Mexicain et module de sa transformée de Fourier	37
Figure IV.9 – Ondelette Daubechies avec N moments nuls(N=2,4,6,8)	37
Figure IV.10 – Représentation du spectre du signal détail 07 pour une machine avec défaut	38
Figure IV.11 – Représentation du zoom sur la bande de fréquence [50Hz-85Hz].....	39
Figure IV.12 – Représentation du zoom sur la bande de fréquence [105Hz-150Hz].....	39
Figure IV.13 – L'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes	40
Figure IV.14 – Spectre du PO (2,0) pour une machine avec défaut bague externe	41

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau.II.1 – Types de vibrations	12
--	----

Capitre III

Tableau.III.1 – Propriétés de la TF.....	21
Tableau.III.2 – Fréquences caractéristique des différents défaut	25
Tableau.III.3 – Paramètre statistique.....	25



Introduction générale

Introduction générale

Les machines asynchrones, de par leur robustesse et leur rapport poids/puissance, sont largement utilisées en milieu industriel. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenances préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.

Malheureusement, les contraintes nouvelles et l'intégration de ces machines dans les systèmes de conversion d'énergie de plus en plus complexes rendent le diagnostic plus difficile. La détection de défauts dans les machines asynchrones a fait l'objet de plusieurs recherches et réalisations industrielles ces dernières années. Il existe plusieurs techniques, la méthode la plus répandue est l'analyse vibratoire, cette méthode est principalement utilisée pour la détection de défauts mécaniques.

Le traitement du signal, l'analyse spectrale plus particulièrement, est utilisé depuis de nombreuses années dans la détection et la localisation des défaillances électriques ou mécaniques dans les machines asynchrones. Ce type de défaillances se prête bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre résultant. Suite au problème de résolution, la DSP (densité spectrale de puissance) trouve des difficultés dans la détection des défauts dans le cas d'un mélange de plusieurs types de défaut. Aussi, la DSP étant fondée sur le calcul de la T.F (Transformée de Fourier), implique implicitement, que les propriétés spectrales du signal soient stationnaires. En fait, le module de la T.F d'un signal fournit seulement une moyenne temporelle du contenu spectral du signal sans donner de précision sur d'éventuels changements de fréquence au cours du temps. Par conséquent, les informations concernant la localisation des fréquences dans le temps ne peuvent pas être déduites à partir de la transformée de Fourier.

Pour pallier à ces contraintes, on a eu recours aux représentations temps-échelle, c'est une méthode qui s'appelle la transformation en ondelette elle permet d'analyser et observer des variations de fréquences au cours du temps, la description du signal est effectuée dans le plan temps-fréquence composé de caractéristiques spectrales en fonction du temps pour bien visualiser notre défauts.

Ce travail pour but la détection et le diagnostic de défauts mécaniques d'un entraînement asynchrone, défauts principalement liés aux roulements à billes. Les signaux enregistrés seront ensuite analysés au moyen de méthodes de traitement du signal, afin d'en extraire des variables indicatrices des conditions de fonctionnement l'entraînement. Dans ce contexte de mémoire est organisé comme suite :

Introduction générale

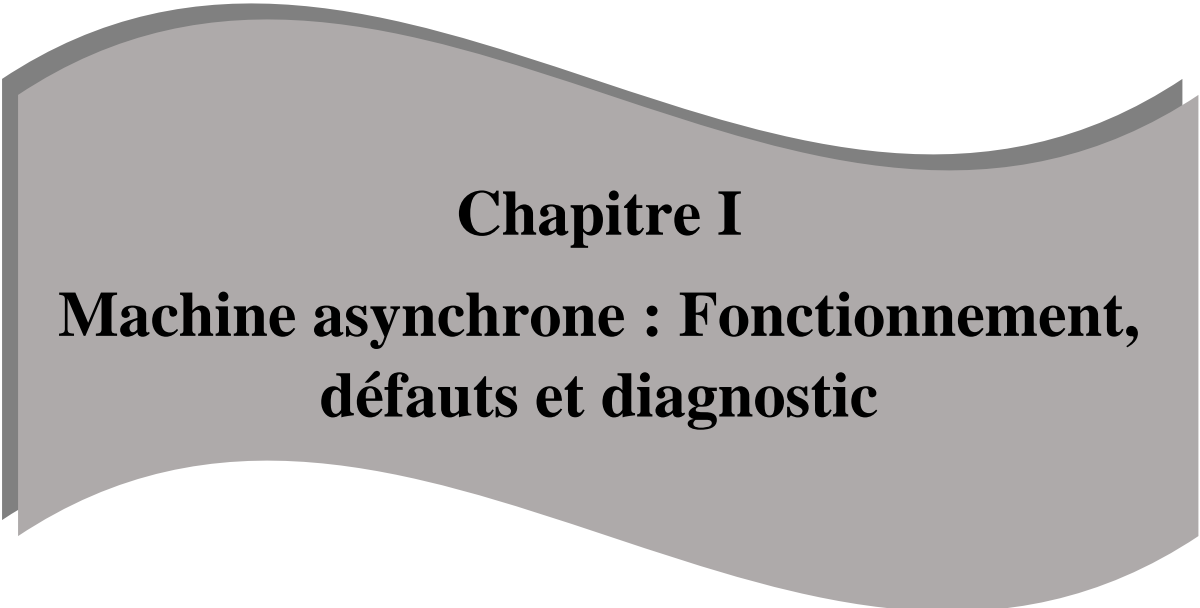
Le premier chapitre de notre travail a permis de donner une idée générale sur la constitution et le fonctionnement de la machine asynchrone, on avait aussi cité leurs défauts et diagnostic.

Le deuxième chapitre consacré sur l'analyse des vibrations, types, origine et on termine par mesure du signal vibratoire.

Le troisième chapitre a été divisé en deux parties, la première c'était un rappel relatif au traitement du signal, puis on avait parlé sur les techniques de traitement du signal (analyse temporelle, analyse fréquentielle). Dans la deuxième partie on avait fait une simulation sur Matlab dans le but d'extraire des signatures spectrales d'un roulement (bague externe) à l'état sain, et à l'état défaillant.

Le quatrième chapitre nous avons présentés dans un premier temps on a défini la transformée d'ondelette. Après on a appliqué la méthode des paquets d'ondelettes et l'algorithme de S.Mallat sur les signaux vibratoires.

Enfin, on termine notre travail par une conclusion et en soulignant les résultats les plus importants.



Chapitre I
**Machine asynchrone : Fonctionnement,
défauts et diagnostic**

I.1 Introduction

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Elle est plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelque kilowatt, car elle présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique.

Dans ce chapitre on illustre les différents types de défauts des machines asynchrones suivi des différentes techniques de diagnostic.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de trois éléments principaux : Le stator (inducteur), le rotor (induit) et enfin la troisième partie est constituée d'un palier [1].

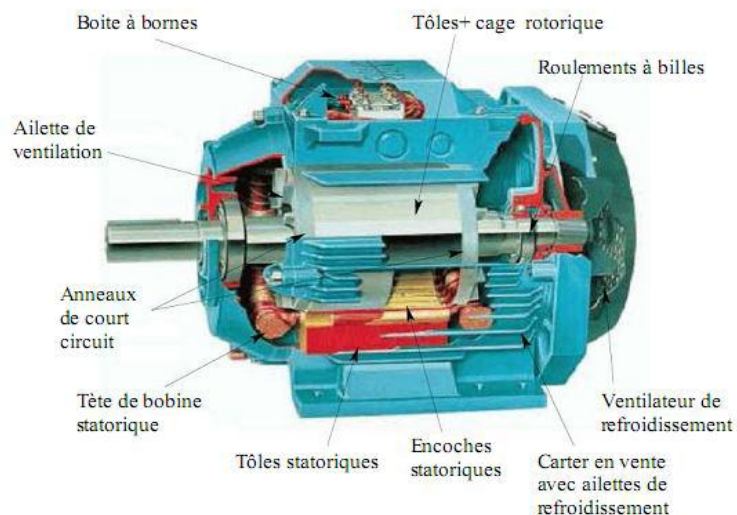


Figure (I.1) : Constitution de la machine asynchrone [2].

➤ Le stator :

C'est la partie fixe du système constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer. Il entoure la partie tournante.

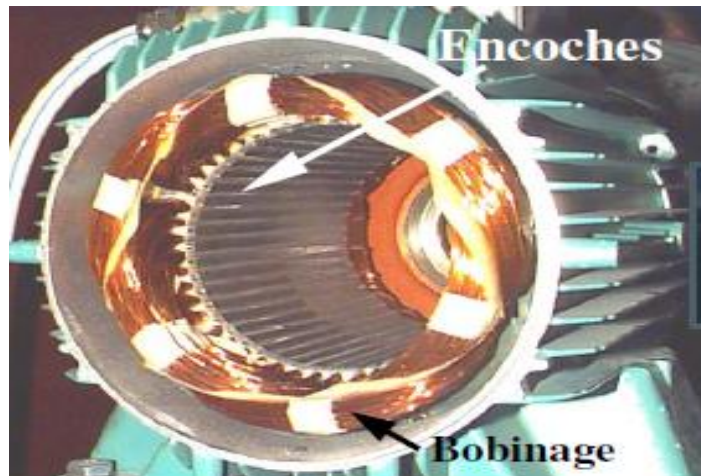


Figure (I.2) : Photo du stator d'une machine asynchrone.

➤ **Le rotor :**

C'est la partie tournante constituée de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.



Figure (I.3) : Photo du rotor d'une machine asynchrone.

➤ **Les paliers :**

Sont les organes mécaniques qui permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

I.3 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les

conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

f : est la fréquence d'aimantation.

P : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [2].

I.4 Les défauts de la machine asynchrones

Malgré que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte conséquence de la production [3].

I.4.1 Défauts internes et externes

Il existe 2 types de défauts principaux : Internes et externes [4].

I.4.1.1 Interne

I.4.1.1.1 Mécanique

- ❖ Défaut de roulement.
- ❖ Contact entre le stator et le rotor.
- ❖ Excentricité statique ou dynamique.
- ❖ Mouvement des enroulements et des tôles.

I.4.1.1.2 Électrique

- ❖ Rupture des barres

- ❖ Défaillance au niveau de l'isolation
- ❖ Défaillance au niveau du circuit magnétique

I.4.1.2 Externe

I.4.1.2.1 Mécanique

- ❖ Défaut de montage.
- ❖ Surcharge de la machine.
- ❖ Une charge oscillante.

I.4.1.2.2 Électrique

- ❖ Source de tension déséquilibrée.
- ❖ Fluctuation de la tension.
- ❖ Réseau bruité.
- ❖ Mouvement des enroulements et des tôles.

I.4.1.2.3 Environnementale

- ❖ Température.
- ❖ Humidité.
- ❖ Manque de propreté.

I.4.2 Classification des défauts

Les défauts de la machine asynchrone sont classés en deux types : les défauts d'origine mécanique et les défauts d'origine électrique.

I.4.2.1 Défauts d'origine mécanique

I.4.2.1.1 Les défauts de roulements

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants figure (I.4).

En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Les défauts de roulements entraînent une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations dans le couple de charge de la machine [5].

On peut citer aussi quelque défaut :

- ❖ Trous dans les bagues de roulement intérieures et extérieures.

- ❖ Attaque des billes.
- ❖ Ondulation de leur surface de roulement.

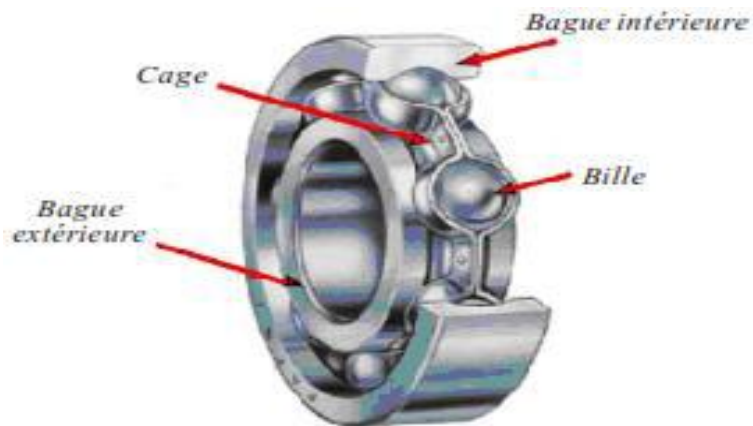


Figure (I.4) : Dimension du roulement à bille.

I.4.2.1.2 Les défauts d'excentricités

Les défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité statique, dynamique ou mixte. Ce défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique (voir figure (I.5)). Il est pourtant bon de préciser que les défauts d'excentricité sont inévitables étant donné qu'il existe avant même le fonctionnement de la machine, soit lors de sa construction, trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [6,7] :

- ❖ L'excentricité statique Figure I.5(a).
- ❖ L'excentricité dynamique Figure I.5(b).
- ❖ L'excentricité mixte Figure 1.5(c).

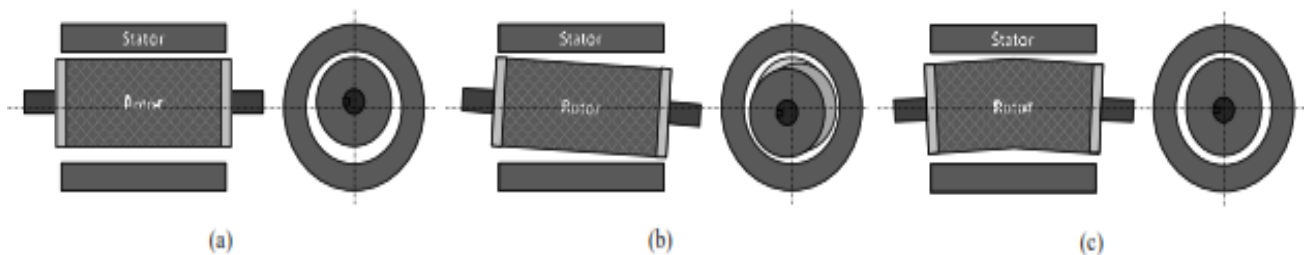


Figure (I.5): Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique; (c) mixte [8].

I.4.2.1.3 Défauts du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes. Par conséquent, induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine [9].

I.4.2.1.4 Défauts de l'arbre

L'utilisation d'un mauvais matériau lors de la construction de l'arbre de la machine peut causer une fissure. Cette fissure peut provoquer une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine [8].

I.4.2.2 Défauts d'origine électrique

I.4.2.2.1 Les défauts court-circuit

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement, d'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotoriques [5].

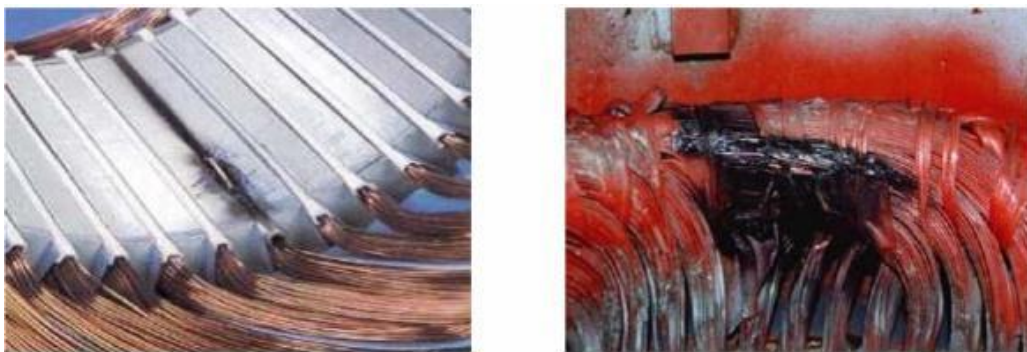


Figure (I.6) : Défaut court-circuit statoriques [5].

I.4.2.2.2 Cassure de Barre

Parmi les défauts les plus étudiés, la rupture de barres rotorique de la machine asynchrone à cage, fait sans doute partie des plus courants. La rupture d'une barre rotorique ou d'un

segment d'anneau de court-circuit peut être induite par plusieurs facteurs, qui sont souvent indépendants les uns des autres. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer par exemple [3] :

- ❖ L'augmentation de la température due à une surcharge de la machine.
- ❖ Les efforts résiduels dus aux problèmes de fabrication.
- ❖ L'environnement hostile dans lequel la machine fonctionne.

I.5 Diagnostic

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des défauts.

Il permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale d'un phénomène physique constaté lors de la surveillance. Comme la température, la vitesse, la pression et la vibratoire mécanique.

Ces possibilités conduisent à définir deux classes de méthodes de diagnostic : une approche dite signal et une approche dite modèle.

I.5.1 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse du signal repose sur l'existence des caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations...etc. Ces symptômes sont dus à la modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs mécaniques et électriques [10].

I.5.2 Approche modèle

Les méthodes de diagnostic à base de l'approche modèle sont les plus familières aux automaticiens. Elles supposent une connaissance approfondie du procédé sous forme d'un modèle numérique. Le principe est simple: on teste la cohérence entre les mesures et les calculs des modèles par les grandeurs caractéristiques de l'état du procédé, appelées résidus. Le vecteur des résidus, nul en fonctionnement normal, est comparé en ligne aux signatures des pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus et la localisation en reconnaissant les signatures. Le principe de cette méthode consiste à comparer la sortie du modèle aux données accessibles pour former un résidu exploité pour alimenter un mécanisme dédié à la détection des défauts. L'utilisation de ses

méthodes nécessite la connaissance au préalable des variations de ses paramètres dans les conditions de fonctionnement normal et lors de la présence de défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs peut être nécessaire pour garantir une localisation de défauts [10].

I.6 Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté les différentes défaillances pouvant se manifester dans la machine asynchrone (excentricité, roulement, court-circuit, rupture des barres...). Nous avons rappelé quelques techniques de diagnostic de la machine asynchrone, nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, s'effectue majoritairement par la surveillance (approche signal, approche modèle), dans le prochain chapitre on s'intéressera au défaut de roulement.



Chapitre II
Aperçu sur L'analyse des vibrations

II.1 Introduction

Toutes les structures et installations industrielles sont sujettes à des vibrations, qu'il s'agisse de celles qu'elles génèrent ou bien de celles qu'elles subissent par leur environnement.

L'analyse vibratoire est un moyen utilisé pour diagnostiquer l'état des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle. Toutes les machines tournantes produisent des vibrations qui sont en fonction de l'alignement et l'équilibre des parties rotatives.

Les grandeurs physiques usuelles permettant de caractériser un mouvement vibratoire sont au nombre de trois : le déplacement, la vitesse et l'accélération.

II.2 Définition de la vibration

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, si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort on constate qu'il se traduit par :

- ❖ Un déplacement: la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.
- ❖ Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps.
- ❖ Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps [11].

II.3 Origine des vibrations

Pour une machine tournante électrique, ces forces sont trois de natures différentes :

Aérodynamique, Mécanique, électromagnétique.

II.3.1 Les forces aérodynamiques

Elles proviennent de l'écoulement du fluide de refroidissement dans les différentes parties de la machine, comme l'entrefer. Cet écoulement provoque des variations aléatoires de pression dans la machine, ce qui engendre des forces ayant surtout un caractère large bande [12].

II.3.2 Les forces mécaniques

Les forces d'origine mécanique sont dues à des défauts de fabrication, de jeu ou d'usure. On peut par exemple citer le phénomène de balourd dynamique provenant d'un mauvais équilibrage du rotor, ou l'usure de l'accouplement reliant deux machines différentes. Ces phénomènes génèrent en général des forces périodiques, dont les fréquences sont liées à la fréquence de rotation de la machine [13].

II.3.3 Les forces d'origine électrique

Elles sont principalement des forces de Maxwell, donc directement proportionnelles au carré du champ d'induction présent dans l'entrefer de la machine. Ce champ n'est jamais à répartition purement sinusoïdale, et ceci pour un grand nombre de raisons (distribution spatiale imparfaite des forces magnétomotrices créée par les enroulements, courant d'alimentation non sinusoïdal, etc.) [12] [14].

II.4 Type des vibrations

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée [15].

II.4.1 Vibrations périodiques

Elles peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pour comme celui d'un diapason ou, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser [15].

a) Vibrations harmoniques

Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés « composantes harmoniques » et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié qui est appelé « fréquence fondamentale » ou fréquence de l'harmonique d'ordre 1 [15].

b) vibrations complexes périodiques

Deux ou plusieurs vibrations périodiques peuvent se superposer et donner comme résultante un mouvement qui est la composition de tous les mouvements élémentaires.

Une telle vibration est créée par une excitation, elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines [15].

II.4.2 Vibrations apériodiques

a) Les vibrations aléatoires

C'est une vibration continue pour laquelle il est possible de déterminer une période de répétition. Cette vibration ne peut être représentée par une fonction mathématique exacte, d'où l'utilisation des lois de probabilité pour la caractériser [15].

b) Les vibrations transitoires

Sont générées par des forces discontinues (choc). Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement. Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudopériodique, si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur critique et le mouvement est apériodique [15].

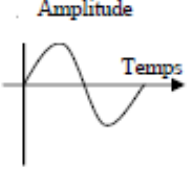
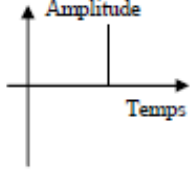
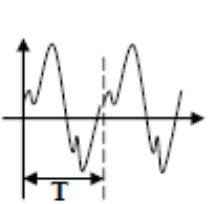
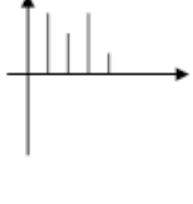
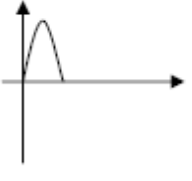
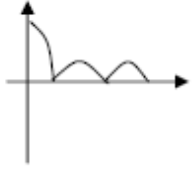
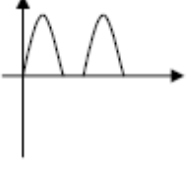
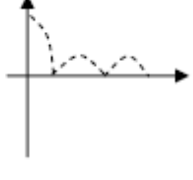
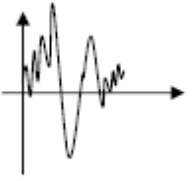
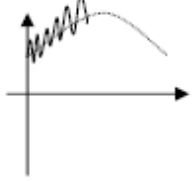
Nature de vibration	Forme temporelle	Forme spectrale	Phénomènes générateurs
<p>Harmonique (Sinusoïdale)</p> <p>Elle est représentée par une sinusoïde</p> $x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi)$			Balourd
<p>Périodique (Sinusoïdale Complexe)</p> $x(t) = \sum X \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ <p>Elle est composée de plusieurs vibrations harmoniques</p>			Effort dynamique d'engrènement
Transitoire			Explosion Laminaires
Transitoire périodique non harmonique			Presses Automatique
<p>Apériodique (Aléatoire)</p> <p>Elle a comportement temporel quelconque</p>			Oscillations de pression exercée sur une structure Chocs dans le Broyeur

Tableau (II.1) : Types des vibrations [15]

II.5 Mesure du signal Vibratoire

II.5.1 Les capteurs de vibration

Le rôle des capteurs est de transformer l'énergie mécanique disposée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. Il existe deux grandes familles de capteur, Les absolus (accélération, Vélocimétries) et les relatifs (prosimètres).

II.5.1.1 Capteur d'accélération (Accéléromètre, principe piézoélectrique)

Par définition l'effet piézoélectrique est la transformation d'une énergie mécanique en une énergie électrique

Un accéléromètre piézoélectrique (**figure II.1**) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.

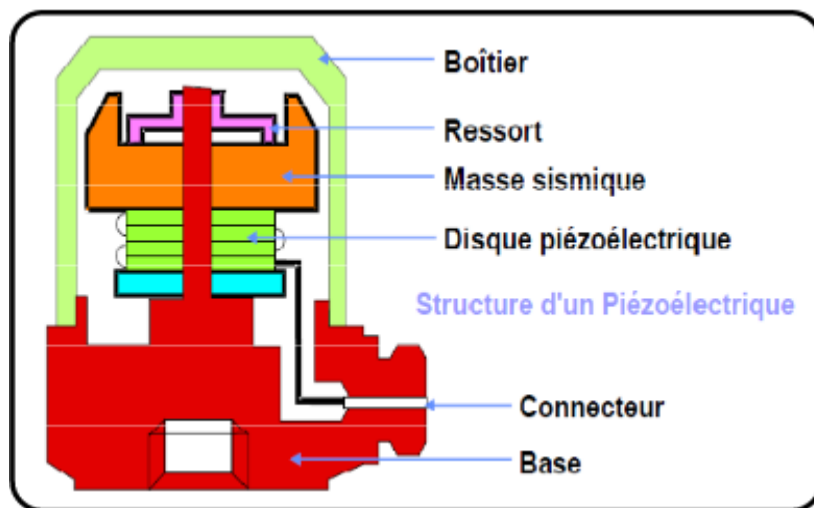


Figure (II.1) : Schéma de principe d'un accéléromètre [11].

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- ❖ Utilisable sur une très grande gamme fréquences.
- ❖ Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- ❖ Aucun élément mobile, donc extrêmement durable [11].

II.5.1.2 Les Accéléromètres capacitifs

Ces Accéléromètres sont des capteurs à l'état solide incorporant des éléments sensibles micro mécanismes silicium de technologie très avancée et une microélectronique intégrée. Ils ont été conçus pour les applications nécessitant une mesure précise d'accélération de faible niveau (0 à 200g) Dans une bande passante du continu à 2000Hz (Selon l'étendue de mesure pleine échelle). L'accéléromètre à capacité variable répond aux besoins de nombreux secteurs de marchés existants nécessitant la mesure à très basse fréquence ou continue, d'accélération. Actuellement, deux autres types d'accéléromètres peuvent également répondre à ce besoin.

Les accéléromètres piézorésistifs, conçus pour la mesure de faible accélération, mais ils sont limités en surcharge. De plus, ils n'offrent pas en fonction de la température, toute la précision ou la stabilité nécessaire à la majorité d'applications «mesure de faible accélération».

Les servo-accéléromètres à boucle asservie, sont aussi capables de mesures avec très grande précision et stabilité [16].

II.5.1.3 Capture de vitesse (vélocimètres)

Les vélocimètres sont des capteurs électrodynamiques, auto générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine. Le mouvement de la pièce métallique dans les spires provoque une variation du flux métallique, donc une induction de courant dans la bobine.

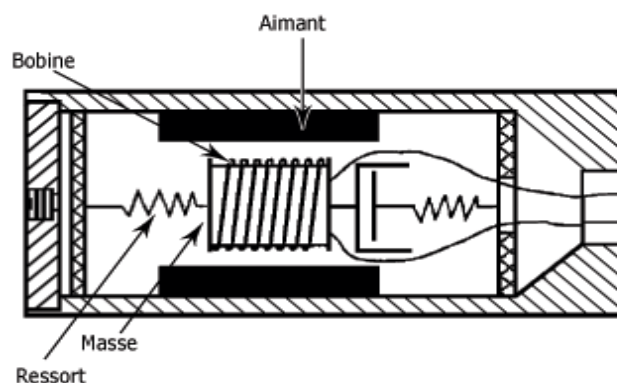


Figure (II.2) : Schéma de principe d'une vélocimétrie [17].

II.5.1.4 Les capteurs de déplacement

Ces capteurs sont des capteurs relatifs au courant de Foucault. Le pont d'impédances est alimenté par un oscillateur ($>100\text{KHz}$). La partie variable du pont est constituée d'une self.

Si le pont est équilibré, il n'y a pas de tension aux bornes du démodulateur **figure (II.3)**. Dès qu'il y a une modification de l'impédance de la bobine (variation de l'entrefer entre la cible et le noyau), il y a un déséquilibre du pont, donc une tension aux bornes du démodulateur à la fréquence de l'oscillateur. La tension aux bornes du démodulateur est proportionnelle à la distance entre la cible et la bobine [18].

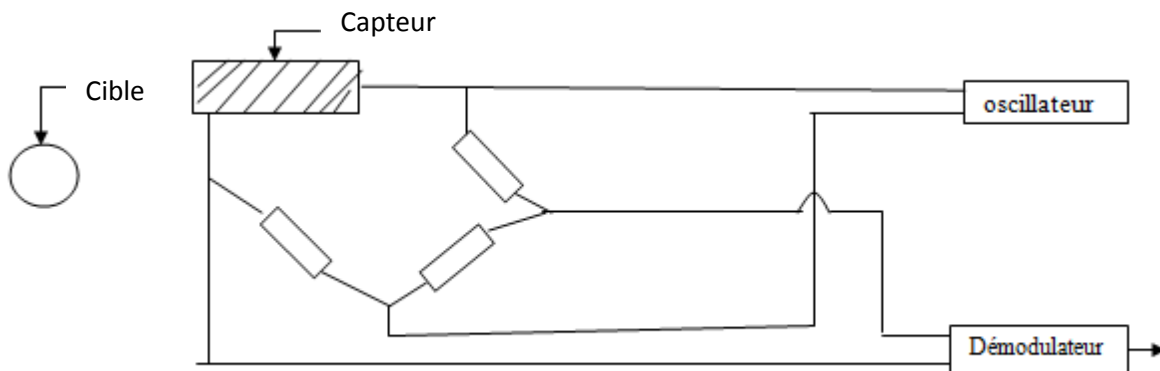


Figure (II.4) : schéma de principe d'un capteur de déplacement [18].

II.5.2 Choix de l'emplacement des capteurs

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile (**figures (II.4) et (II.5)**). Ces efforts sont de deux types :

- Efforts tournants : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial.
- Efforts directionnels : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial **figure (II.6)**), ou par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

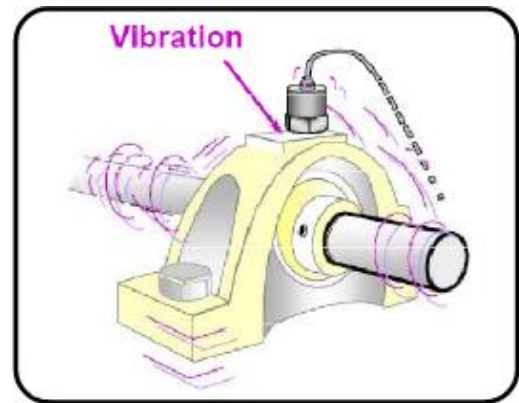


Figure (II.4): Fixation du capteur sur palier [19].

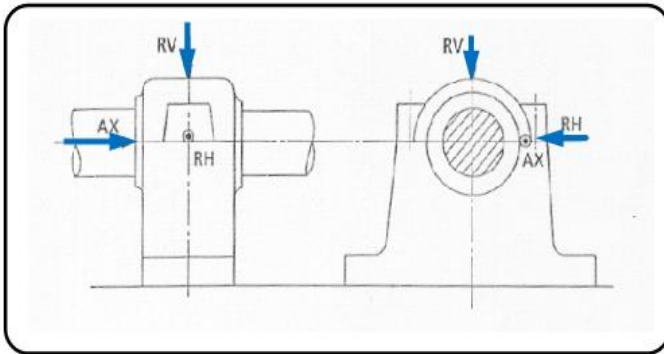


Figure (II.5) : Choix directionnel pour la prise de mesure [19].

➤ Consignes pour la fixation des capteurs

Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur **figure (II.6)**.

L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure [9].

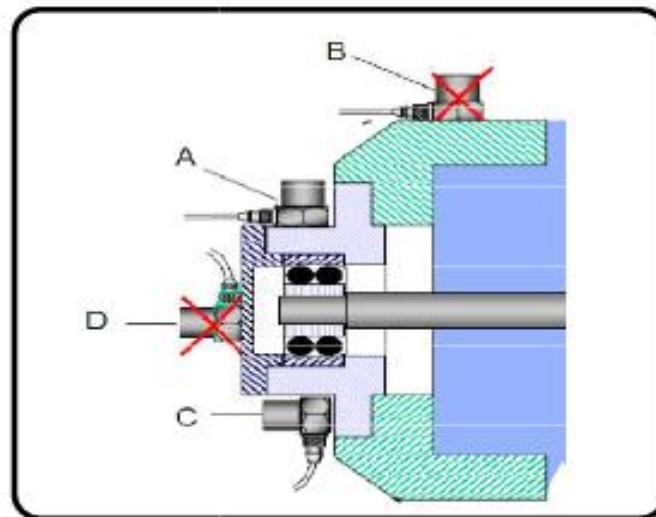


Figure (II.6): Choix de l'emplacement du capteur [9].

II.6 Conclusion

Ce chapitre présente quelques généralités sur les vibrations (origine, type, mesure, ...), nous avons exposé les types des capteurs utilisés pour la mesure du signal vibratoire (accéléromètre, piézo-électrique, vélocimètres,...).

La mesure de vibration constitue un domaine intéressant pour la maintenance des machines asynchrones. Elle est basée sur la détection des défauts pouvant affecter la machine asynchrone, La surveillance des roulements par analyse vibratoire est un moyen intéressant pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine asynchrone afin d'exploiter ces informations dans la maintenance, car elle permet de suivre et d'analyser l'évolution du spectre du signal mesuré en un ou plusieurs point de la machine.

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

Chapitre III

Méthode classique à base de l'analyse de Fourier

III.1 Introduction

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est de réussir à extraire un maximum d'information.

La transformée de Fourier est un outil de traitement de signal qui permet la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux. Cet outil trouve de nombreuses applications dans des domaines tels que la transmission numérique, le diagnostic ou encore l'astronomie.

On s'intéresse à décrire dans ce chapitre les principales techniques de traitement de signal pour le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.

III.2 Traitement de signal

Le traitement du signal regroupe un ensemble de techniques permettant de créer, d'analyser et de transformer les signaux d'entrée en vue d'extraire des paramètres indicateurs de défauts.

Il est possible de classer les techniques de traitement de signal en : Analyse temporelle, Analyse fréquentielle et analyse temps-fréquence [20] [21][22].

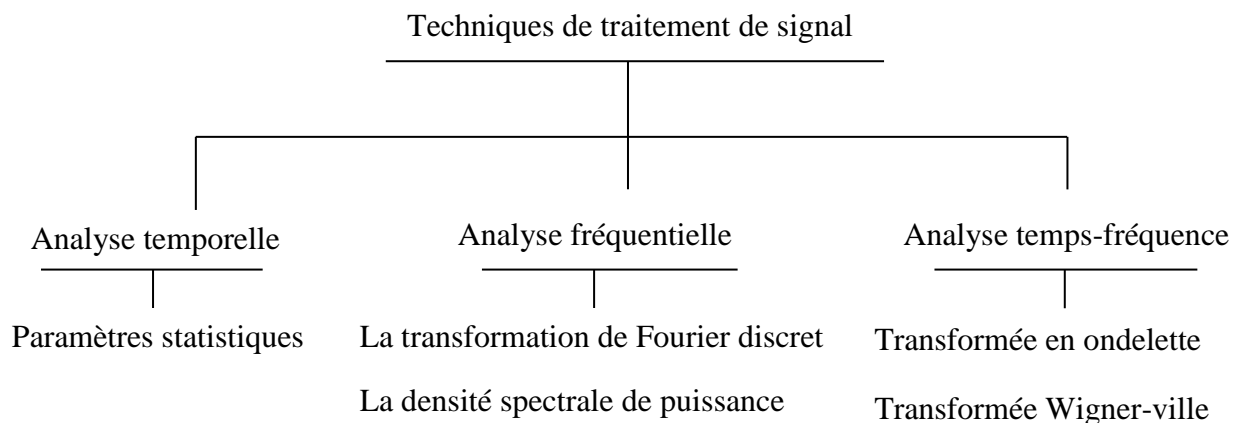


Figure (III.1):Technique de traitement de signal [21].

III.2.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle permet d'extraire des paramètres indicateurs de défauts à partir de données brutes du capteur. Les paramètres décrits ici sont appelés « paramètres

statistiques » car ils sont basées sur une analyse des caractéristiques temporelles du signal enregistré. On peut citer par exemple[23] :

La valeur moyenne : la valeur moyenne notée \bar{x} d'un signal sur une fenêtre d'échantillons de données est un paramètre significatif pour presque chaque type de capteur. Elle est définie par :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{III.1})$$

Où x_i est $i^{\text{ième}}$ donnée et N est le nombre de points total choisi pour représenter le signal.

✚ **La variance** : notée par Var est une mesure servant à caractériser la dispersion d'une distribution ou d'un échantillon. Elle est définie par :

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (\text{III.2})$$

✚ **L'écart type** : noté par σ ou la moyenne quadratique, c'est la racine carrée du moment d'ordre deux (variance) du signal :

$$\sigma = \sqrt{Var} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{III.3})$$

C'est l'un des paramètres le plus utilisé dans l'analyse temporelle. Une augmentation de la valeur du RMS indiquera une dégradation de l'état de santé du système [24].

✚ **Le Skewness** : noté S_{kew} représente le moment statique d'ordre 3 centré sur le cube de l'écart-type. Il mesure la symétrie de la distribution, ou plus précisément le manque du signal. Il est défini comme suit :

$$S_{kew} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(\sigma)^3} \quad (\text{III.4})$$

Les paramètres décrits ci-dessus ont tous le même inconvénient, ils indiquent la dégradation du système mais n'arrivent pas à identifier le défaut responsable de cette dégradation [25].

✚ **Le Kurtosis** : Le Kurtosis noté S_{kurt} représente le moment statique d'ordre 4. Il mesure le degré d'écrasement de la distribution du signal vibratoire enregistré et il est

défini comme étant le rapport entre le moment d'ordre quatre centré et le carré de la variance.

$$S_{kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(\sigma^2)^2} \quad (\text{III.5})$$

Un système en bon état engendre un signal vibratoire avec un Kurtosis voisin de 3. Pour un système dégradé, l'amplitude du signal est modifiée et le Kurtosis devient supérieur ou égal [25].

III.2.2 Analyse fréquentielle

III.2.2.1 Les séries de Fourier

En analyse, les séries de Fourier sont un outil fondamental dans l'étude des fonctions périodiques. C'est à partir de ce concept que s'est développée la branche des mathématiques connue sous le nom d'analyse harmonique.

Un signal périodique $x(t)$ de fréquence $f_0 = \frac{w_0}{2\pi}$ et de forme quelconque peut être obtenu en superposant à une sinusoïde de fréquence f (fondamentale), des sinusoïdes dont les fréquences sont des multiples entiers de f_0 . Ces sinusoïdes ont des amplitudes et des positions de phase appropriées [26].

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nw_0t) + b_n \sin(nw_0t)) \quad (\text{III.6})$$

Où f_0 représente la fréquence du fondamental, $w_0 = 2\pi f_0$ est la pulsation propre, a_0 est la moyenne de $x(t)$, a_n et b_n sont dits coefficients de la série de Fourier avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} x(t) dt \quad (\text{III.7})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_0} x(t) \cos(nw_0t) dt \quad (\text{III.8})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_0} x(t) \sin(nw_0t) dt \quad (\text{III.9})$$

Si le signal $x(t)$ est pair alors $b_n = 0 \forall n$.

Si le signal $x(t)$ est impair alors $a_n = 0 \forall n$.

a_0 représente la valeur moyenne du signal $x(t)$.

III.2.2.2 La transformée de Fourier

Pour un signal non périodique, on utilise la transformée de Fourier, qui est une extension de la série de Fourier. La transformée de Fourier s'exprime comme une somme infinie des fonctions trigonométriques de toutes les fréquences. Une telle sommation se présente sous forme d'intégrale [26].

Elle permet d'obtenir une représentation en fréquence (représentation spectrale) de ces signaux. Elle exprime la répartition fréquentielle de l'amplitude, de la phase et de l'énergie (ou de la puissance) des signaux considérés.

Soit $s(t)$ un signal déterministe. Sa transformée de Fourier est une fonction, généralement complexe, de la variable f et définie par :

$$x(f) = TF[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.10})$$

➤ **Quelques propriétés des transformées de Fourier [26]**

	x(t)	X(f)
Linéarité	$a \cdot x(t) + by(t)$ $aetb \neq 0$	$aX(f) + bY(f)$
Translation	$x(t - t_0)$	$e^{-j2\pi ft_0} X(f)$
	$e^{j2\pi f_0 t} x(t)$	$X(f - f_0)$
Conjugaison	$x(t)$	$X(-f)$
Dérivation	$\frac{d^n x(t)}{dt^n}$	
Dilatation	$x(at)$ $a \neq 0$	$\frac{1}{a} X\left(\frac{f}{a}\right)$
Convolution	$x(t) * y(t)$	$X(f) \blacksquare Y(f)$
	$X(t) \blacksquare Y(t)$	$x(f) * y(f)$

Tableaux(III.1) : propriétés de la TF.

III.2.2.3 La transformée de Fourier discrète TFD

Le calcul de cette transformée à l'aide d'un ordinateur, revient [27] :

- ✚ d'abord à échantillonner le signal $x(t)$ avec une période T_e puis numériser ses valeurs donnant le signal discret $x(nT_e)$
- ✚ et vu que l'ordinateur n'ait qu'un nombre fini de mots de taille finie, il faudra aussi tronquer la durée du signal à l'intervalle $[0, (N - 1)T_e]$, on obtient

$$x(f) = T_e \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_e) e^{-j2\pi f n T_e} \quad (\text{III.11})$$

- ✚ L'échelle des fréquences f est continue, il faudra également la discrétiser avec une période Δf sur un intervalle $[0, (N-1)\Delta f]$, on obtient

$$X(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_e) e^{-j2\pi k \Delta f n T_e} \quad (\text{III.12})$$

- ✚ Vu que le nombre d'échantillons du signal $x(nT_e)$ et de sa transformée de Fourier $X(k\Delta f)$, est le même et est égale à N . Et vu la dualité entre les deux représentations temporelle et fréquentielle, en l'occurrence, la durée de
- ✚ $X(k\Delta f)$ = L'inverse du pas d'échantillonnage de $x(nT_e)$, et vis-versa. On peut écrire $N \cdot \Delta f = 1/T_e$, ce qui aboutit à l'expression :

$$X(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_e) e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{III.13})$$

- ✚ Et enfin la normalisation de l'échelle des temps ainsi que celle des fréquences, donne

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{III.14})$$

C'est l'expression de la Transformée de Fourier Discrète TFD. TFD d'un signal discret (ou d'une suite discrète) de valeurs $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$, est la suite de N termes $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$, définis par $X(k)$, pour $k \in [0, N-1]$.

On rajoute que :

- $X(k)$ est définie à N points aux fréquences : $k\Delta f = k \frac{f_g}{N}$ pour $k \in [0, N-1]$
- $x(n)$ est définie à N points aux instants : $nT_e = n \frac{\tau}{N}$ pour $n \in [0, N-1]$, ou τ est la durée du signal.

Par ailleurs, il est essentiel de restituer le signal temporel discret à partir de sa Transformée de Fourier, et cela par le calcul de la Transformée de Fourier inverse, tel que :

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (\text{III.15})$$

III.2.2.4 La transformée de Fourier rapide (FFT)

C'est un algorithme qui permet d'implémenter la TFD en réduisant les redondances dans les opérations et en particulier de multiplication. Son principe consiste à décomposer le calcul de la TFD d'ordre $N = 2^L$ en L étapes successives.

Si le nombre d'opérations arithmétiques (sommations et produit) nécessitées par la TFD d'une suite de longueur N est proportionnel à N^2 , l'algorithme de la FFT utilise le fait que l'opération de la TFD globale peut être décomposée en la TFD de séquences de plus en plus courtes. Il en découle alors que le nombre total d'opérations est bien inférieur à celui imposé par simple application de l'algorithme de la TFD. En contrepartie, le nombre de points analysés N doit être une puissance de 2. Le nombre d'opérations demandées par le nouveau algorithme est alors fortement diminué et il vaut $N_{OP} \approx N \log_2(N)$ [27].

III.3 Description du système de mesure

Le banc d'essais est constitué d'un treuil de levage afin d'étudier la surveillance d'une chaîne cinématique. Il comprend un moteur asynchrone à deux paires de pôles et un réducteur à trois trains épicycloïdaux avec un facteur de réduction de 77. Le moteur entraîne une charge en rotation suivant deux modes :

- ❖ Mode(M) : En montée de la charge.
- ❖ Mode (D) : En descente de la charge.

Les essais sont réalisés avec plusieurs niveaux de charge et de vitesse. Nous disposons :

- ❖ Deux consignes de vitesse de l'arbre de sortie du moteur « V3 et V5 » ce qui correspond respectivement à 1350Tr/min.
- ❖ Quatre consignes de charge désignées par : C1=300 daN, C2=600 daN, C3=1000 daN et C4=2000 daN.

Nous notons que toutes les mesures sont prises en régime quasi permanent. En d'autres termes, la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est quasi constante [28].



Figure (III.2) : Dispositif expérimental [28].

III.4 Descriptifs

Les vibrations réelles sont infiniment plus complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres.

Néanmoins, ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de plusieurs composantes élémentaires purement sinusoïdales pour lesquelles les principes énoncés sont applicables.

Les analyses spectrales ont été réalisées sur des blocs de **1 million** d'échantillons, la fréquence d'échantillonnage est de l'ordre de **25KHz**, soit une **résolution spectrale de 1/40Hz**, on dispose des vibrations mécaniques d'une **machine saine** et d'une **machine avec défaut bague externe**.

Pour les dimensions suivantes, $BD=20.636\text{mm}$, $PD=175\text{mm}$, n (nombre de bille) =16, les fréquences caractéristiques des défauts sont données dans le tableau (III.2)

	Défaut bague externe	Défaut bague interne	Défaut bille
Avec réduction	4.58Hz	5.73Hz	5.4Hz

Tableau (III.2): Fréquences caractéristique des différents défauts.

Les signaux que nos disposons pour :

- ❖ Consigne de vitesse de l'arbre d sortie du moteur est $V5=3004$ Tr/min.
- ❖ Consigne de charge $C2=600$ daN.
- ❖ Mode (D) : En descende de la charge.

Cette partie pratique a été réalisée à l'Université de Compiègne en France en 2009.

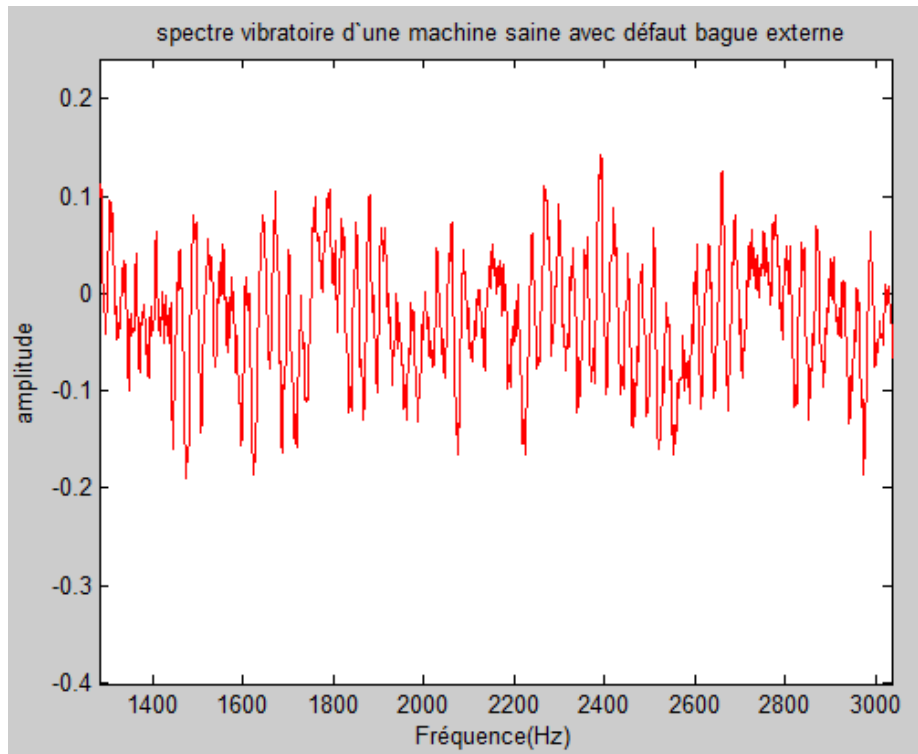
III.4.1 Calcule des paramètre statistique [7]

	Machine saine	Machine avec défaut
Moyenne	-0.0409	-0.0258
L'écart type	0.0749	0.0654
Variance	0.0056	0.0043
Kurtosis	2.6605	2.8511
Skewness	-0.0114	-0.0312

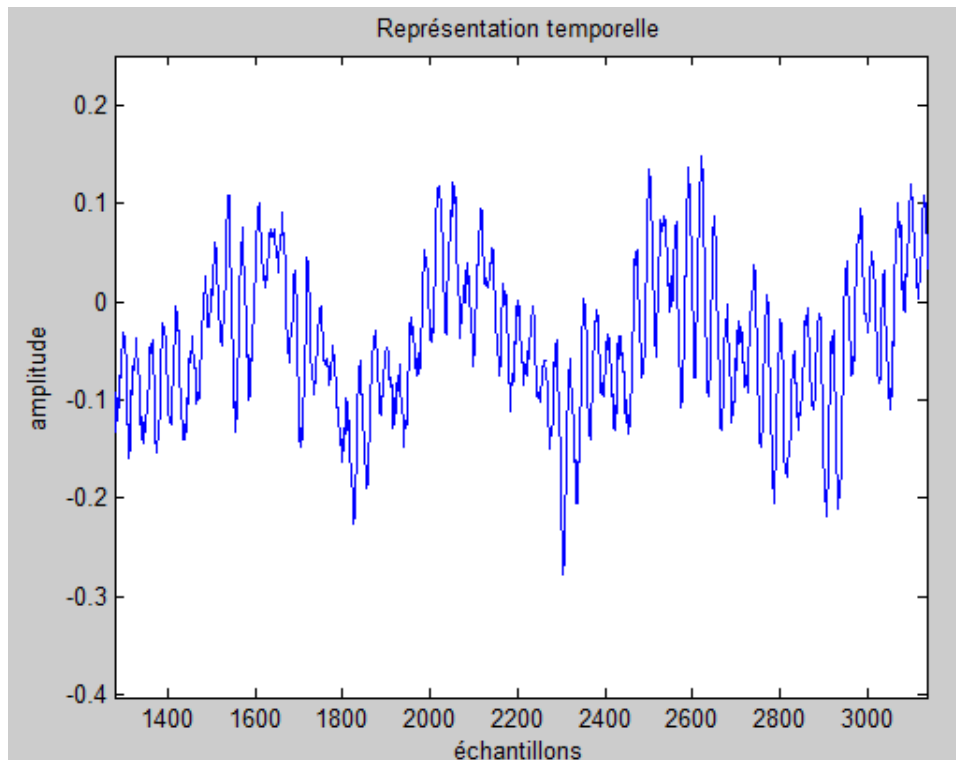
Tableau(III.3) : paramètre statistique.

Les paramètres statistiques (moment d'ordre 1, 2, 3,4) montre que l'on peut séparer le cas sain et le cas avec défaut, mais elle ne donne aucune information car la nature de défaut d'où de passage au domaine fréquentiel.

La représentation temporelle du signal vibratoire est donnée par la figure (II.4) :

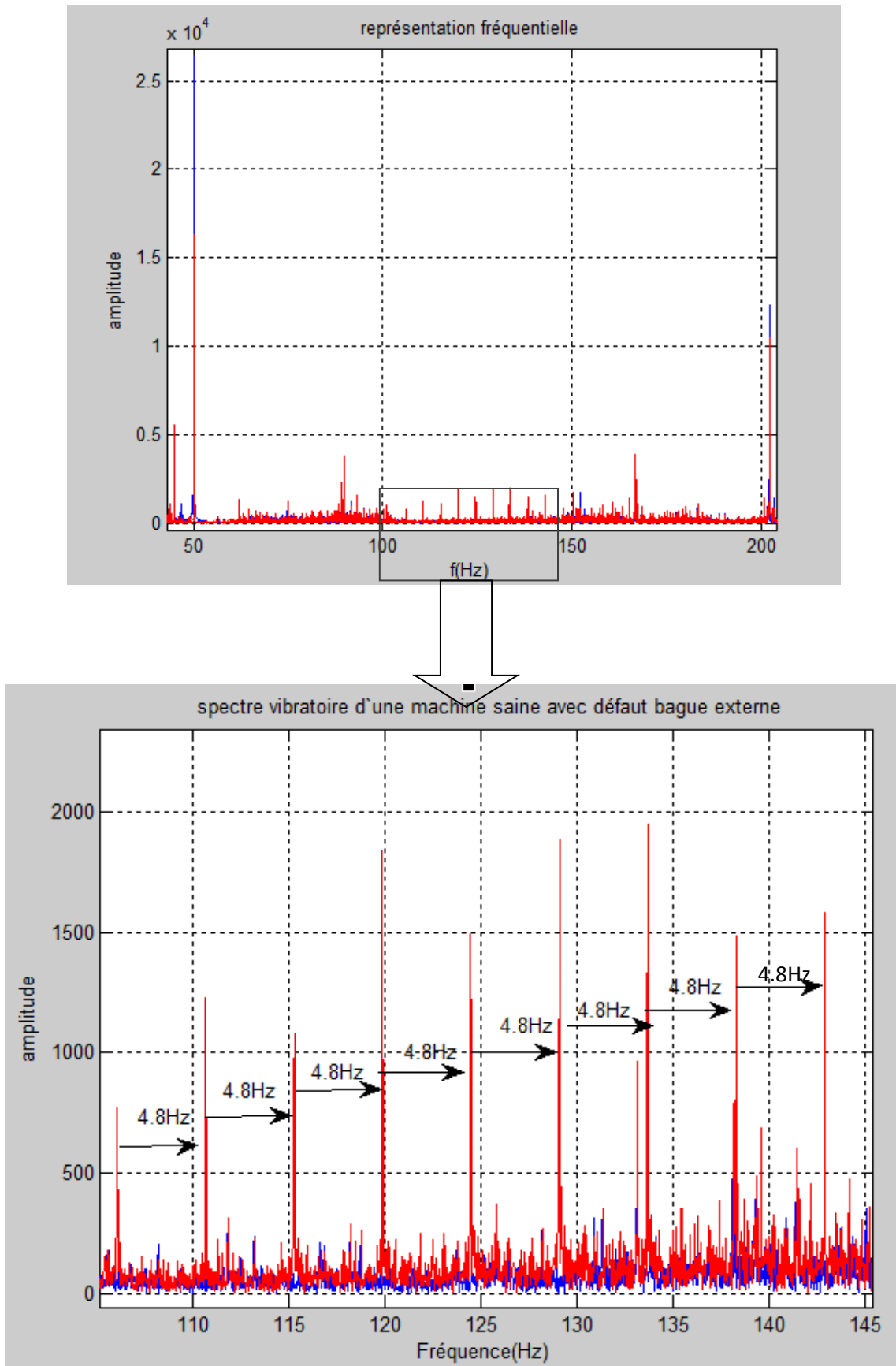


Figure(II.3.a) : Représentation temporelle du signal vibratoire Machine avec défaut



Figure(II.3.b) : Représentation temporelle du signal vibratoire Machine sans défaut

Le spectre vibratoire d'une machine saine et avec défaut bague externe est illustré sur la figure (II.5) :



Figure(II.4) : Spectre vibratoire d'une machine saine et avec défaut bague externe.

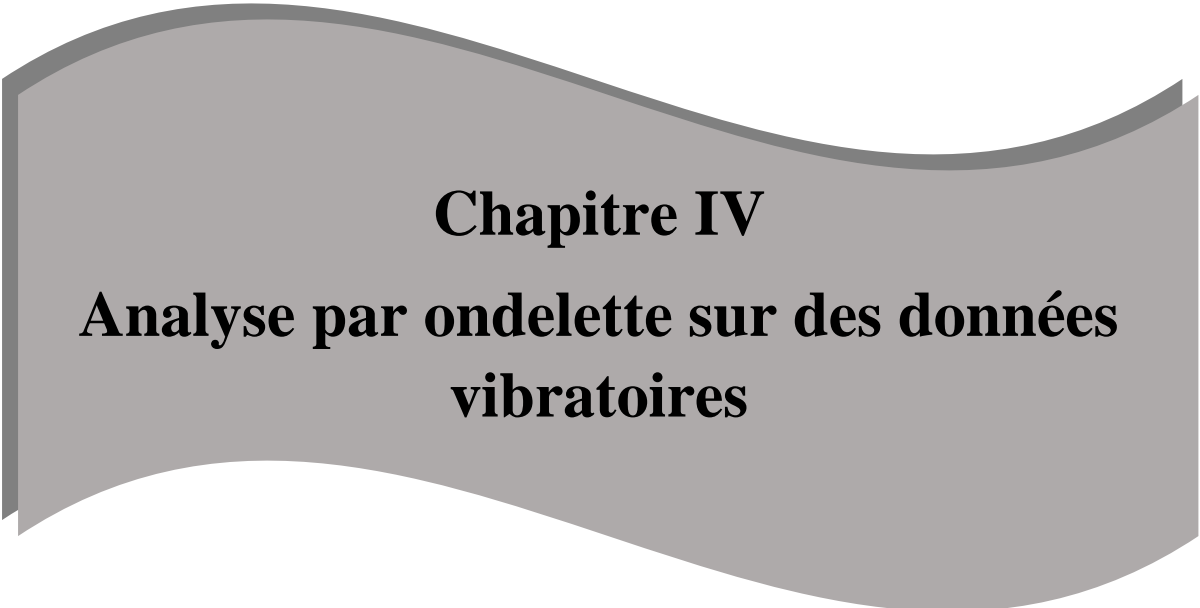
Commentaires :

La représentation fréquentielle permet une meilleure lecture du signal que sa représentation temporelle, on peut facilement observer la répartition des raies équidistance sur le spectre vibratoire de la machine avec défaut dans l'intervalle [100 Hz à 140 Hz] par contre elle n'apparaît pas sur le spectre vibratoire de la machine saine, la fréquence des répétitions des raies est de 4.80Hz. Qui représente la fréquence du défaut bague externe.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé sur les techniques classiques de traitement de signal qu'elles soient temporelles (moyenne, l'écart type, kurtosis...) ou fréquentielles (série de Fourier, transformation du Fourier) et grâce à la transformation de Fourier nous avons pu localiser et identifier le défaut de roulement, cette méthode est l'une des méthodes classique la plus utiliser dans l'analyse vibratoire.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier les performances de la transformée en ondelettes.



Chapitre IV
Analyse par ondelette sur des données
vibratoires

IV.1 Introduction

L'analyse par ondelettes est apparue au début des années 80. En réalité, cette théorie est un travail pluridisciplinaire qui a réuni des ingénieurs, des mathématiciens et des physiciens ayant développé des idées semblables dans leur domaine respectif. Il s'agit de donner une représentation des signaux permettant la mise en valeur simultanée des informations temporelles et fréquentielles (localisation temps-fréquence).

Avant de définir la transformation en ondelettes, nous allons suivre une démarche naturelle qui va nous permettre de mieux comprendre comment cet outil a été élaboré.

IV.2 Transformée en ondelette (TO)

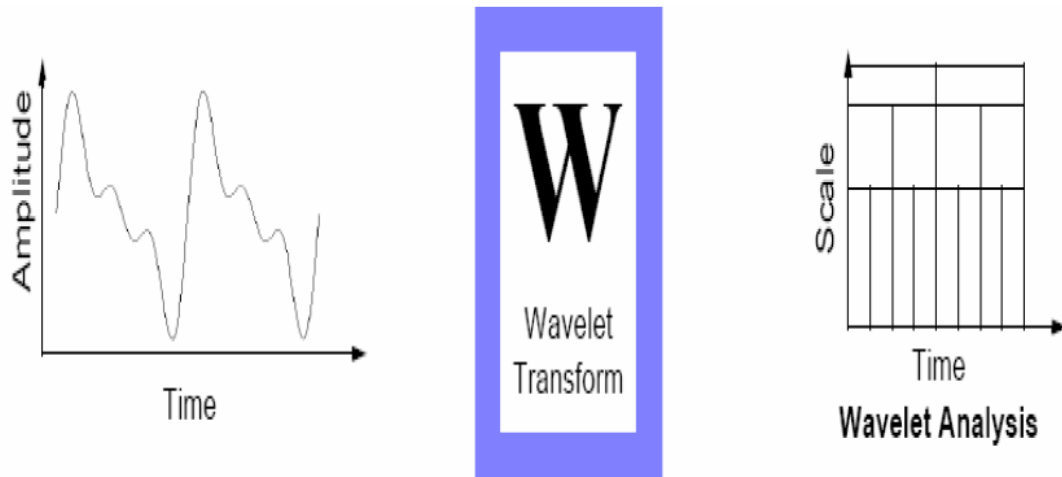
La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier.

Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique [29].

IV.3 Définition d'une ondelette

L'ondelette est une forme d'onde, qui est la vibration la plus courte envisageable dans une plage de fréquence donnée qui a une valeur moyenne égale à zéro, elle est donc très concentrée en temps et en fréquence.

La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. L'analyse multi-résolution de la transformation en ondelettes équivaut à une décomposition atomique temps-échelle. Chacun des atomes peut s'interpréter comme étant une projection locale du signal analysé et est obtenu à partir d'une ondelette $\psi(t)$ unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle [30].



Figure(IV.1) : Représentation temporelle vers ondelettes [31].

IV.4 Transformation en Ondelettes Continue(TOC)

L'analyse par la transformée en ondelette ou analyse temps-échelle est l'une des techniques de traitement de signal la plus utilisée pour la détection des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquences différentes rencontrées dans un signal. Elle consiste à décomposer un signal à l'aide des fonctions analysantes particulières construites à partir d'une ondelette mère.

L'idée de base est de décomposer un signal sur une famille de fonctions translatées et dilatées à partir d'une fonction unique appelée ondelette $\psi_{a,b}(t)$, la famille s'écrit [32] :

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

Avec :

a et b : sont respectivement facteur échelle et facteur translation.

$\frac{1}{\sqrt{a}}$: sert à la conservation d'énergie.

La transformation temps-échelle a pour expression [33] :

$$W_{x(a,b)} = k \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{IV.2})$$

Avec : $W_{x(a,b)}$: Coefficients en ondelette du signal $x(t)$.

K : Facteur de normalisation.

La transformée prend les deux arguments a et b qui sont respectivement des coefficients de la dilatation et de la translation. En faisant varier ces arguments, on peut couvrir complètement le plan temps fréquence avec des boites, on obtient ainsi une représentation complète et redondante du signal analysé [34].

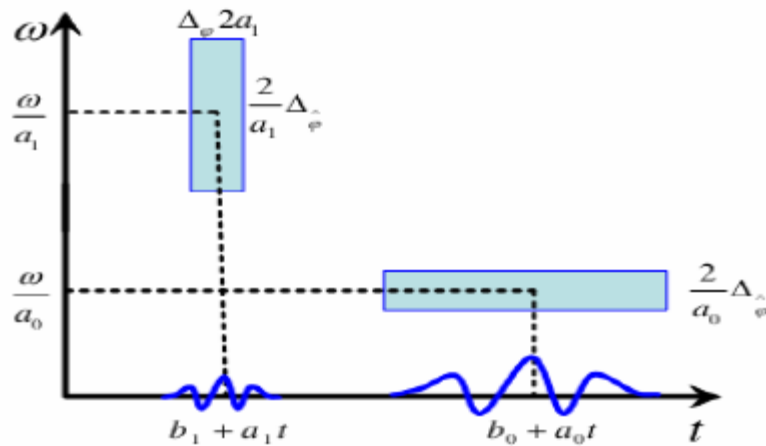


Figure (IV.2) : Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes ψ_{a_1, b_1} et ψ_{a_0, b_0} [34].

IV.4.1 Conditions d'admissibilité

Pour qu'une fonction $\psi(t)$ soit une ondelette mère, elle doit satisfaire des conditions dites « conditions d'admissibilité » qui sont :

- $\psi(t)$ doit être un signal à énergie finie, c'est-à-dire :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (\text{IV.3})$$

Pour cela $\psi(t)$ doit être bien localisée dans le temps et elle doit décroître suffisamment vite à l'infini :

- $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ (IV.4)

Si $\psi(f) = \text{TF} [\psi(t)]$

On a $\psi(0) = 0$, énergie nulle à la fréquence nulle [34].

IV.4.2 Étapes d'implémentation de la transformée en ondelette continue (CWT)

L'implémentation de la transformée en ondelettes continue peut se résumer de la manière suivante [28] :

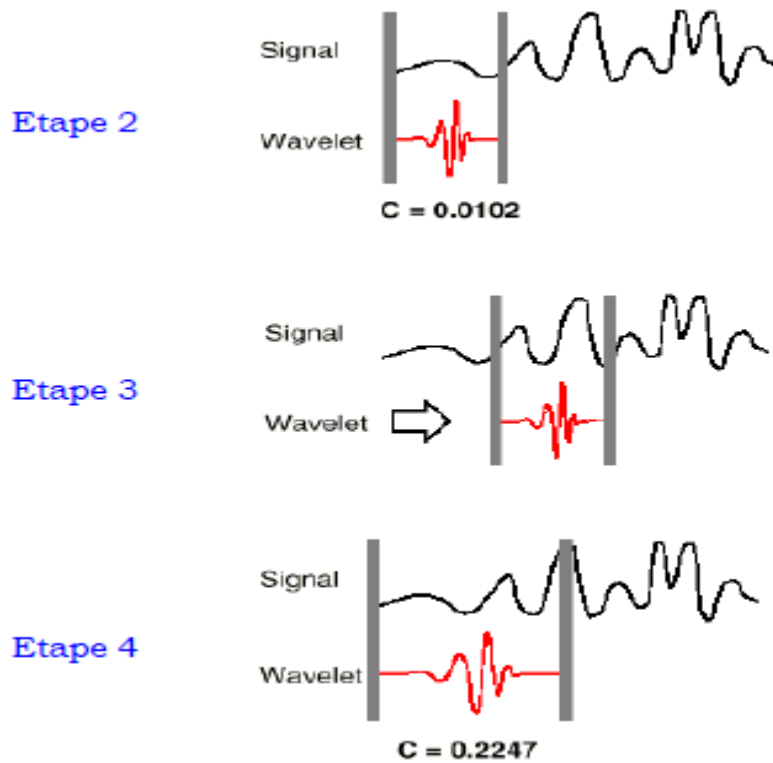
Étape 01 : Prendre l'ondelette et la comparer au segment du signal en cours. (Ceci en débutant par le premier segment du signal).

Étape 02 : Calculer le coefficient $W_x(a, b)$.

Étape 03 : Translater l'ondelette, répéter étape 01 et étape 02 jusqu'à ce que tout le signal soit balayé.

Étape 04 : Dilater ou compresser l'ondelette et répéter étape 03.

Étape 05 : Répéter étape 04 pour toutes les échelles choisies.



Figure(IV.3) : Les étapes de Calcul des Coefficients [35].

IV.5 Transformation en Ondelettes discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée ondelettes discrète dynamique toute base des ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $a = 2^i$.

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

Soit ϕ la fonction d'échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle. On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $i \in Z$ comme suit [30] :

$$\phi_{i,j}(t) = 2^{-\frac{i}{2}} \phi(2^{-i}t - j) \quad (\text{IV.5})$$

Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-\frac{i}{2}} \psi(2^{-i}t - j) \quad (\text{IV.6})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j)\phi(2t - j) \quad (\text{IV.7})$$

$$\psi(t) = \sum_j 2g(j)\phi(2t - j) \quad (\text{IV.8})$$

Les équations (IV.7) et (IV.8) représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe-bas et passe-haut respectivement lors d'une décomposition par ondelette.

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de la décomposition de signal en approximations et en détails. Le signal d'origine $f(t)$, traverse deux filtres complémentaires, passe-bas et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails D comme le montre la figure (IV.4) [36].

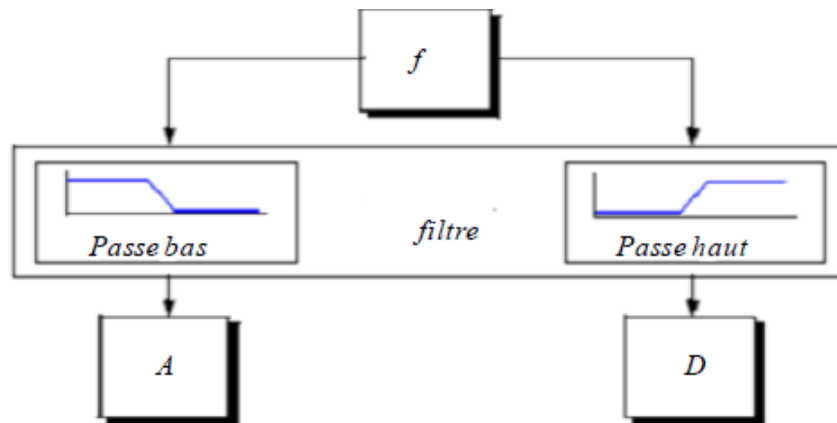


Figure (IV.4) : Décomposition du signal f en approximations et détails [36].

- L'approximation : est la partie grande échelle, basse-fréquence du signal.
- Le détail : est la partie petit-échelle, haut-fréquence du signal.

IV.5.1 Décomposition simple

Comme on a dit précédemment le signal f est divisé en deux signaux mais actuellement pour faire cette opération dans un signal réel, on trouve deux signaux de même taille que le signal original.

Supposant pour l'instant, que le signal f contient 1000 échantillons donc le résultat des signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous les deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est du au fait l'opération de décimation par 2 [36].

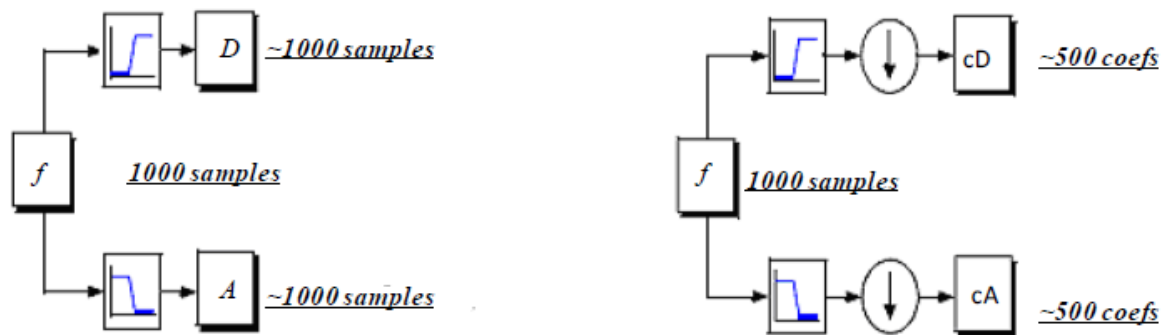


Figure (IV.5): Décomposition simple du signal f en approximations et détails [36].

IV.5.2 Décomposition multi niveau

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal f en plusieurs niveaux comme illustré sur la figure (IV.6). Le processus de décomposition peut être réitéré avec des approximations successives étant décomposées alternativement de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continu indéfiniment. En réalité la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer [30].

Le signal $f(t)$ est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolution. Les premiers coefficients de décomposition sont A1 et D1, où A1 est la version approximative du signal original $f(n)$ et D1 est la représentation détaillée du signal $f(n)$.

On peut représenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences figure (IV.6) [30].

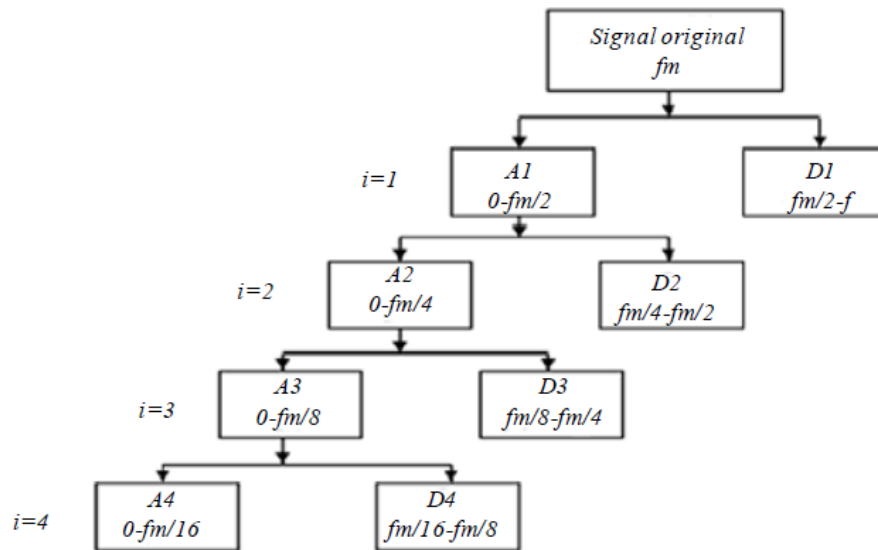


Figure (IV.6) : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux [30].

IV.5.3 Décomposition par paquet d'ondelettes

La méthode par paquet d'ondelette est une généralisation de la décomposition en ondelette discrète qui offre une gamme plus riche des possibilités pour l'analyse du signal.

Dans l'analyse en ondelette un signal est décomposé en approximation et détail, l'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau et le processus est répété.

Dans l'analyse par paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés.

L'arbre de décomposition en paquet d'ondelette est représenté dans la figure (IV.7) [30].

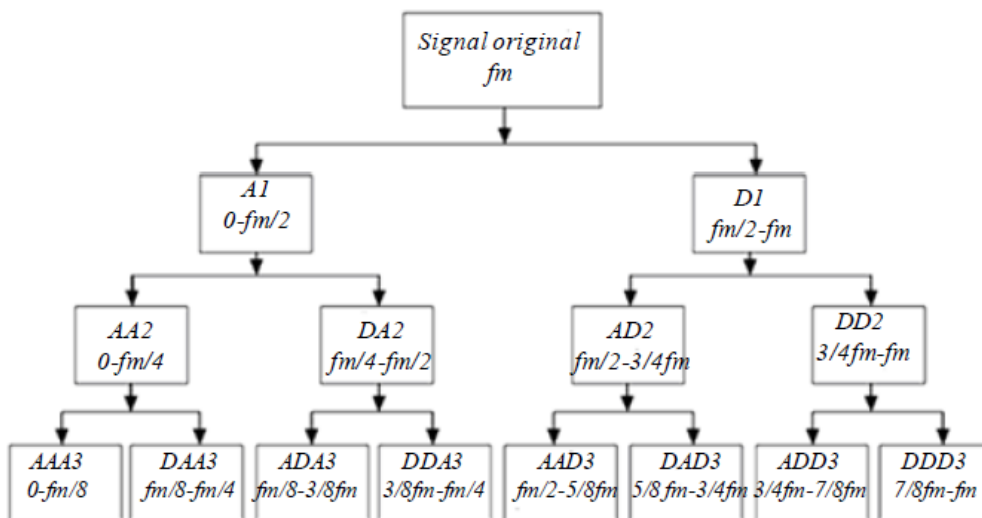


Figure (IV.7) : Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3 [30].

Le paquet d'ondelettes décompose le signal original dans des bandes de fréquence indépendantes. Il n'y a aucune information redondante dans les bandes de fréquence décomposées. C'est une approche efficace d'analyse basée sur la multi-résolution et peut être proposée comme méthode de diagnostic des défauts [30].

IV.6 Les Différents Type d'Ondelettes

On donne ici quelques types d'Ondelettes couramment utilisées [35] :

IV.6.1 Ondelette de Haar

La fonction échelle $\phi(t)$ et la fonction d'Ondelette $\psi(t)$ sont données par [35] :

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Fonction de transfert des filtres associés s'écrit :

$$H(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}z^{-1} \quad (\text{IV.11})$$

$$G(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}z^{-1} \quad (\text{IV.12})$$

IV.6.2 Ondelette de Morlet

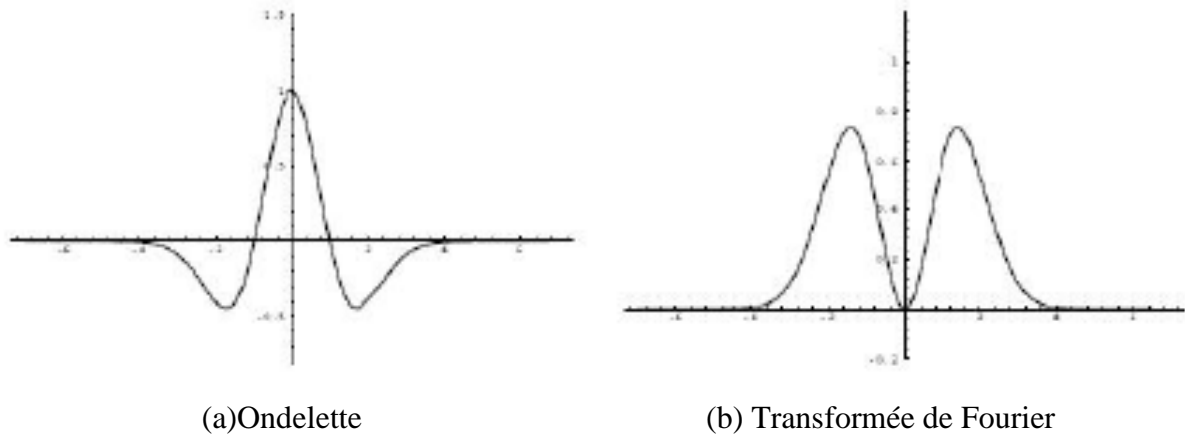
L'ondelette de Morlet a un grand intérêt dans l'étude des signaux sismiques, comme nous allons le voir plus tard, puisque sa forme ressemble beaucoup à celle de l'ondelette sismique (l'impulsion). Cette ondelette est inspirée du signal élémentaire de Gabor elle est obtenue par modulation d'une gaussienne. [35]

$$\psi(t) = (\pi \cdot t_0)^{-1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 + 2j\pi f_0 t\right] \quad (\text{IV.13})$$

IV.6.3 Chapeau Mexicain

C'est une ondelette réelle qui doit son nom à sa forme figure(IV.8), est construite à partir de la dérivée seconde de la gaussienne [35] :

$$\psi_{CM}(t) = (1 - t^2) \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) \quad (\text{IV.14})$$



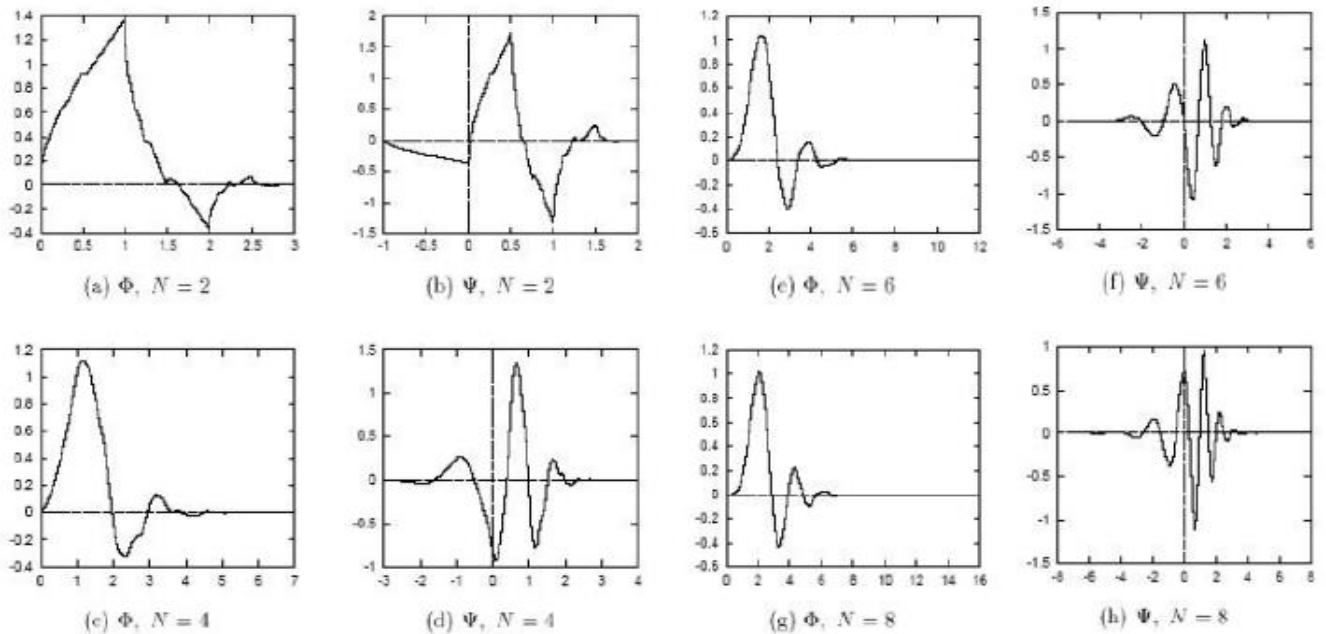
(a)Ondelette

(b) Transformée de Fourier

Figure (IV.8) : Ondelette Chapeau Mexicain et module de sa transformée de Fourier [35].

IV.6.4 Ondelette de Daubechies

Les Ondelettes d'Ingrid Daubechies sont intéressantes puisque elles sont orthogonales et bien localisées en temps (ou espace) de plus elles donnent la possibilité de choisir le degré de régularité voulue en imposant un certain nombre de moments nuls figure(IV.9), leur régularité augmente avec N [35].

**Figure(IV.9) :** Ondelettes de Daubechies avec N moments nuls (N = 2, 4, 6, 8) [34].

IV.7 Avantage l'analyse en Ondelettes [34]

Le fait que la transformée utilise des fonctions bien localisées dans le plan Temps-Fréquence lui donne beaucoup d'avantages :

- La localisation en temps est précieuse pour un certain nombre d'application.

- La transformée en Ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque en peu de coefficients.

IV.8 Applications de l'algorithme de S.Mallat sur les signaux vibratoires

On à appliqué la structure pyramidale de L'algorithme de Mallat à 07 niveaux de décomposition sur un signal vibratoire de la machine avec défaut bague externe.

La figure (IV.10) illustre la représentation des coefficients de détail 07.

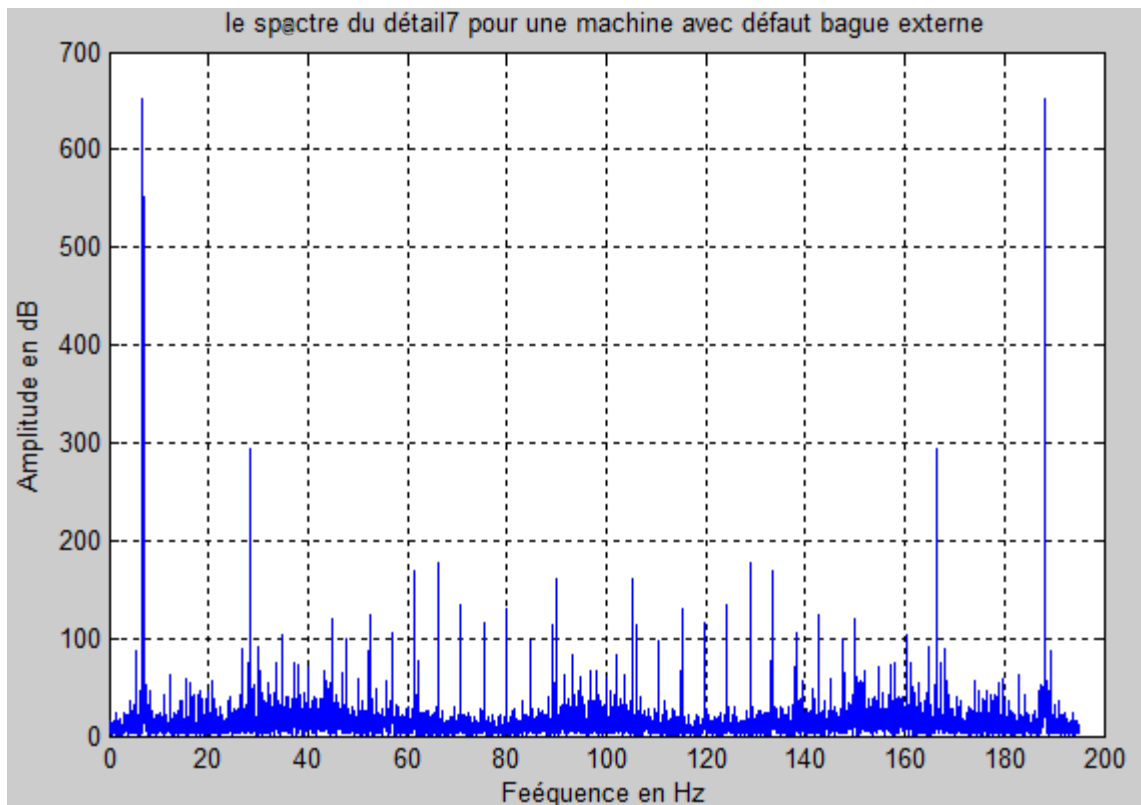


Figure (IV.10) : Représentation du spectre du signal détail 07 pour une machine avec défaut.

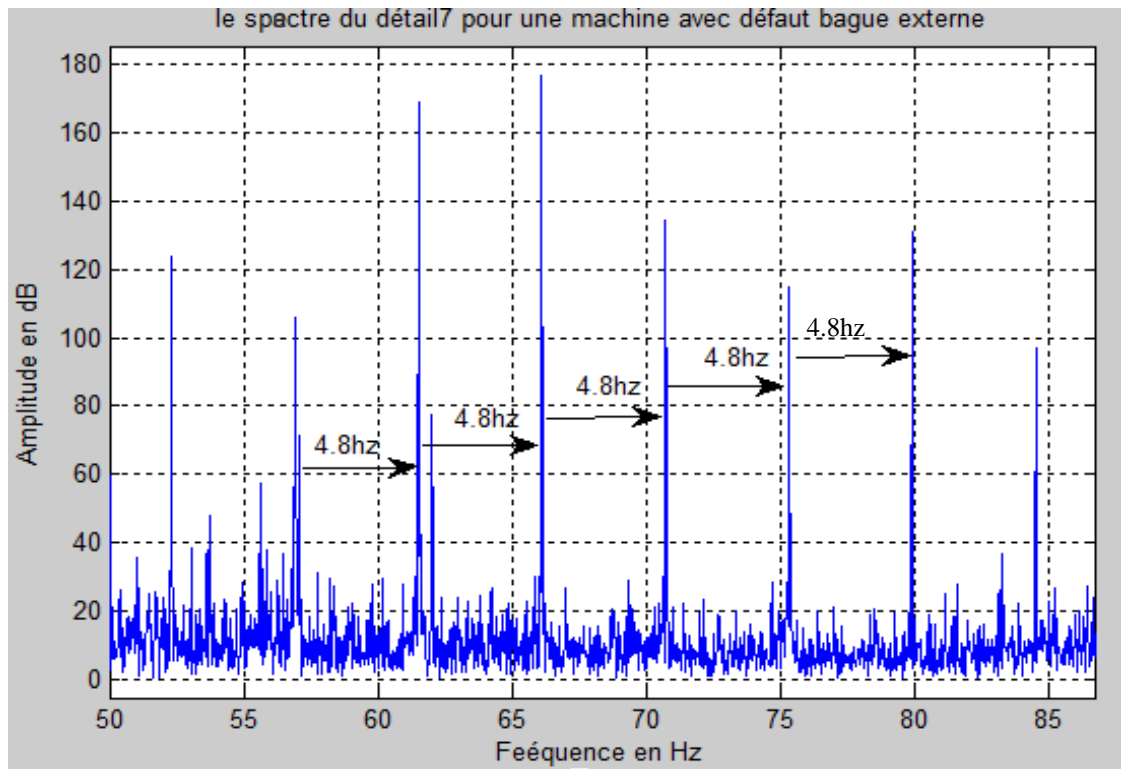


Figure (IV.11) : Représentation du zoom sur la bande de fréquence [50Hz-85Hz].

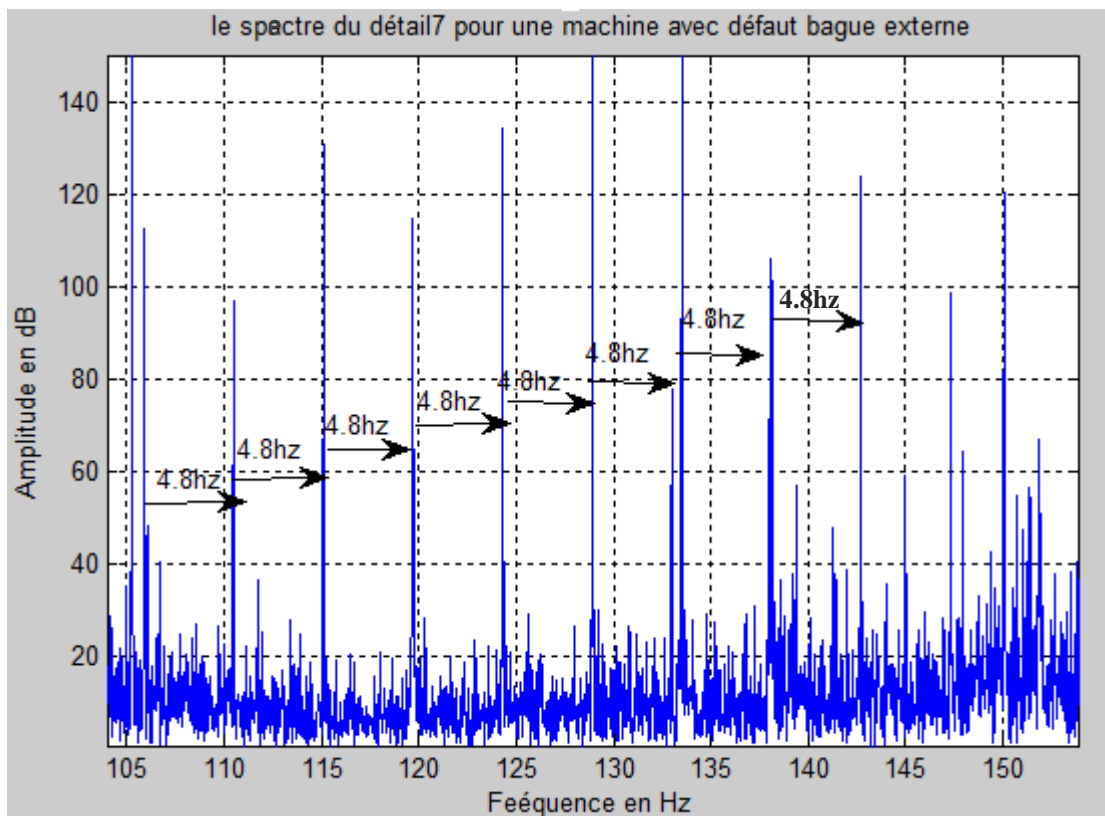


Figure (IV.12) : Représentation du zoom sur la bande de fréquence [105Hz-150Hz].

- **Commentaire**

- Après observation de spectre de détail 07, on remarque sur les deux bandes de fréquences [50Hz-85Hz] et [110Hz 140Hz] apparition des raies répétitives.
- La distance entre les raies est de l'ordre de 4.8 Hz qui représente la fréquence du défaut de bague externe.

IV.9 Applications des paquets d'ondelettes sur les signaux vibratoires

Cette méthode nous a permis de détecter l'apparition des défauts de roulement de type bague externe sur un signal vibratoire à l'aide de logiciel Matlab on a obtenus des résultats qui sont représentés sur les figures (IV.13) et (IV.14).

Les figures (IV.13) et (IV.14) présentent successivement l'arbre de la décomposition en paquet d'ondelettes sur trois niveau de décomposition et le spectre des paquets d'ondelettes (2,0) pour une machine asynchrone avec défaut bague externe.

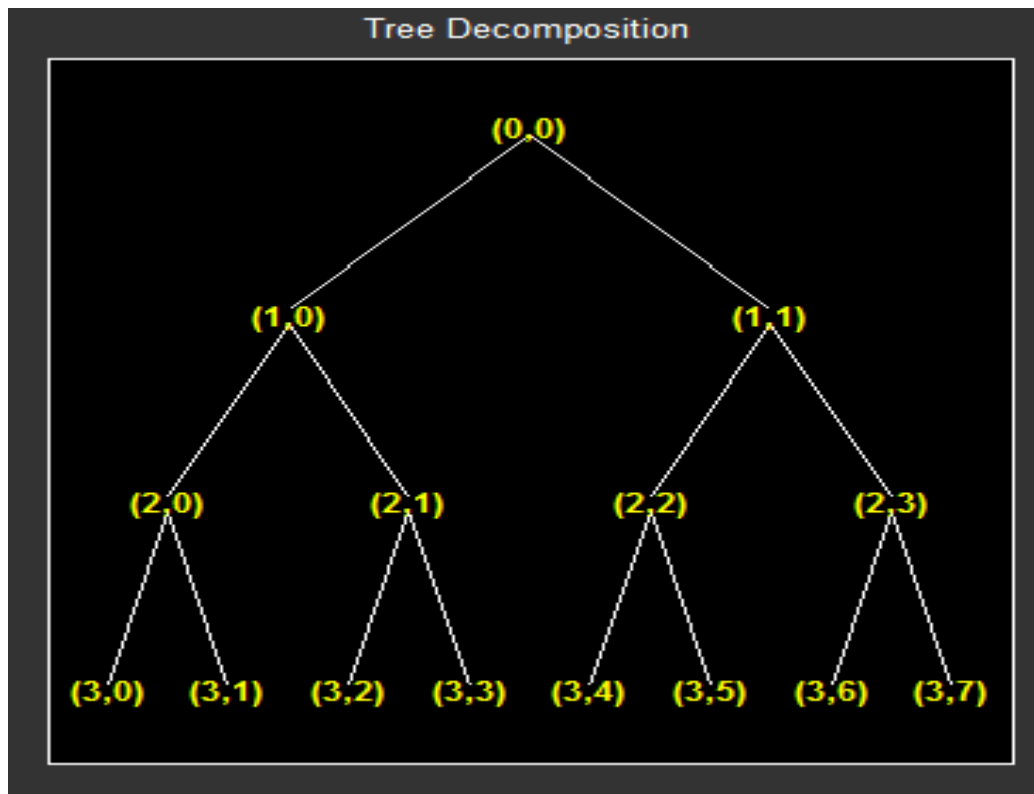


Figure (IV.13) : l'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes.

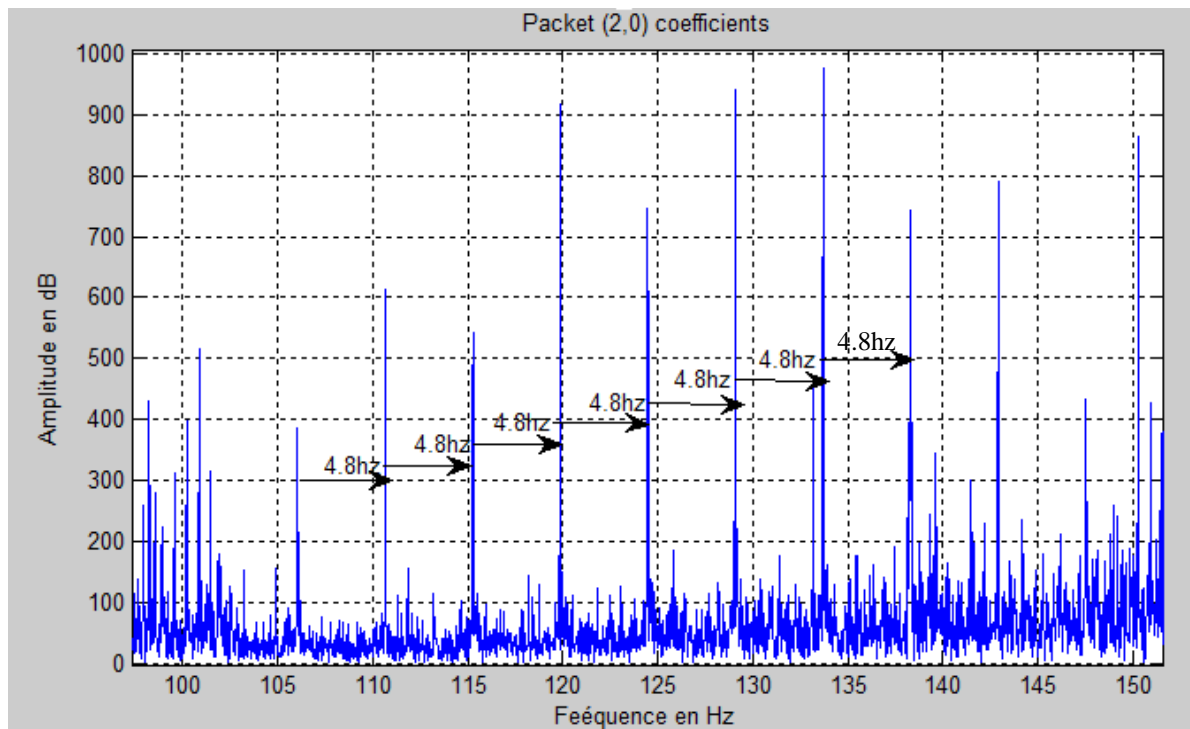


Figure (IV.14) : Spectre du PO (2 ,0) pour une machine avec défaut bague externe.

- **Commentaire**

Après visualisations de spectre de l'approximation (2,0) on remarque des raies sur la bande de fréquence [110Hz 150Hz] qui se répète avec la même distance de 4.8Hz, qui représente la fréquence du défaut bague externe.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que la Transformé en Ondelettes permet d'obtenir une distribution temps-échelle des signaux vibratoires et l'application des méthodes paquets d'ondelettes et l'algorithme de S.Mallat, nous a permis de mieux détecter et caractériser le type de défaut de roulement.

L'avantage de l'analyse temps-échelle, et de réduire l'étude spectrale sur des intervalles bien définies afin d'améliorer le temps de recherche des harmoniques du défaut.



Conclusion générale

Conclusion générale

Ce présent travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts de la machine asynchrone et plus particulièrement les défauts de roulement.

L'étude est basée sur l'utilisation de deux méthodes d'analyse du signal en vue du diagnostic et la détection des défauts dans la machine. L'une à base de la transformée de Fourier et l'autre est la transformée en ondelette.

Pour mener cette étude. Nous avons fait une simulation sous Matlab dans le but d'extraire les signatures spectrales d'un roulement à l'état sain (fonctionnement normal), et à l'état défaillant. La méthode classique utilisées pour la détection du défaut basé sur la transformée de Fourier rapide (FFT) du signal vibratoire montrer l'apparition des raies de défaut dans la bande [110hz-150hz]. Les résultats obtenus montrent que la FFT peut indiquer la présence du défaut bague externe.

L'analyse spectrale classique permet la détection des défauts, mais son inconvénient est la recherche de la bande spectrale qui contient le défaut, ce qui présente une limitation d'une telle approche vu la complexité du spectre, pour cela, nous avons introduit l'analyse par ondelette qui est relativement récente en diagnostic. Cette technique est basée sur la décomposition en ondelettes des signaux vibratoires en plusieurs niveaux, qui nous a permis de constater la richesse du signal vibratoire d'une machine asynchrone avec défaut par rapport au cas sain. Le spectre du signal détail nous a permis de détecter la fréquence de répétition des chocs qui est proche à celle obtenue théoriquement.

L'avantage de l'analyse multi-résolution et les paquets d'ondelette, est de déterminer la bande de répétition des chocs sans recourir à l'étude de tout le spectre du signal vibratoire. L'analyse par ondelette, semblait la plus intéressante à appliquer.

La méthode de la transformée on ondelette est très efficace pour le diagnostic des pannes surtout lorsque on parle des défauts liés aux éléments des machines tournantes qui produisent des chocs ainsi des signaux non-stationnaires comme les roulements. Nous pouvons conclure que le succès des ondelettes provient non seulement de son analyse temps fréquence mais aussi de ses algorithmes rapides.

En perspectives, nous proposons l'utilisation de la méthode S.Transform pour faire une comparaison avec nos résultats.



Liste bibliographique

Liste bibliographique

- [1] : Philippe le Brun, «Machine asynchrone »,Lycée Louis Armand.
- [2] : S. Bazine, J. Trigeassou, «Les défauts des machines électriques et leur diagnostic » cours, ECL, Lyon, 2003.
- [3] : Haylock, « IPM synchrone machine drive response to symmetrical and asymmetrical short circuit faults », IEEE transactions on energy conversion pp. vol.18 n° 2.PP.291 .298 .03.
- [4] : P. O'Donnell, «Report of large reliability survey of industrial and commercial Installations, Part 1 », IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N° 4.
- [5] : D. Housse, S. Salah eddine, «Command et diagnostic de la machine asynchrone à l'aide d'observateur», Mémoire Master Université de Ouargla, 2016.
- [6] : M. El Tabache, « Détection des défauts mécaniques par l'analyse des signaux d'alimentation des moteurs asynchrones », Thèse de doctorat, Nancy, Juillet 2002.
- [7] : S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, « Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.
- [8]: R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F. M. Sargos, « Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, pp. 4238-4251, December 2008.
- [9] : G. Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [10] : A.Kabla, « Analyse de la signature du courant pour la détection et la classification de défauts de roulement dans les machines électrique», mémoire de magister, université de Bejaia 2009.
- [11] : L.Foued, «Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire»,2003.
- [12] : P. Granjon, « Contribution à la compensation actif des vibrations des machines électrique », Thèse Doctorat, INPG, Grenoble, 2000.
- [13] : O. Butscher, « Diagnostic de la machine asynchrone », mémoire de DEA en génie électrique, (INPG) Grenoble, septembre 2001.
- [14] : A. Maddi, « Contribution à l'étude des vibrations dans la machine électrique », mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2012.

Liste bibliographique

- [15] : Sari-Hassoun. Z, Hadjoui. A, Hamidou. A, Bouzid. S, « La maintenance prédictive pour les machines tournantes », Symposium International : Qualité et Maintenance au Service de l'Entreprise, Université de Tlemcen 2004.
- [16] : Alliantech S.A.S « Technologies d'accéléromètres pour la mesure de vibration et choc », Alliantech, 12 rue Traversière.
- [17] : B. Toufik, « Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur », mémoire de magister Université Badji Mokhtar – Annaba (2008).
- [18] : A. Laiche, A. Fouar, « Analyse vibratoire appliquée à l'étude des machines : motopompe et compresseur », mémoire d'ingénieur, L'université M'hamed Bougara Boumerdes, 2007.
- [19] : <http://www.silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/les-vibrations-des-machines-tournantes.pdf>.
- [20] : O. R. Seryasat, M.A. Shoorehdeli, F. Honarvan, A. Rahmani, « multi-fault diagnosis of ball bearing based on features extracted from time-domain and multi-class support vector machine (MSVM) », in Proc. IEEE, SMC, 2010, PP. 4300-4303.
- [21] : K. Chen, K. Li, F. Wang, T. Wang, and C. Wu, « Bearing fault diagnosis using wavelet analysis », in Proc. IEEE Int. QRRMSE. 2012, PP. 699-702.
- [22] : M.D. Prieto, G. Cirrincione, A. G. Espinosa, J.A. O. Tega, and H. Henao, « Bearing fault detection by a novel condition monitoring scheme based on statistical. Time features and neural networks », IEEE Trans. Ind Electron vol. 60, pp. 398-340, Aug. 2013.
- [23] : Shaiokai Wang, William Prentney Ana-Maria Popesai, Tanzeen Chaudhury, and Mattai Philipose, common sense based joint training human activity recognizers » : In Proceedings of the 20 International Joint Conference on Artificial Intelligence. pp. 2237-2242. 2007.
- [24] : N. Tandon and A. Choudhury, « A review of vibration and acoustic measurement methods the detection of defects in rolling element bearings », Tribology International, Vol. 32, pp. 469-480, 1999.
- [25] : A. Soualhi, « Du diagnostic au pronostic de pannes des entraînements électriques », thèse de doctorat, Université de Lyon, 24 septembre 2013.
- [26] : F. de Colson des « Théorie et traitement des signaux, édition PRR, 1984.

Liste bibliographique

- [27] : Freddy Murry, « Traitement des signaux,Support, de Cours», Haute Ecole d'ingénieur et de gestion de Canton Vaud.2011.
- [28] : B. Amirouche, « Machine asynchrone : Diagnostic par le courant statorique et par approche vibratoire », mémoire de fin d'étude, Université de Bejaia, 2010.
- [29] : S.G. Mallat,« A wavelet tour of signal processing », second ed, Academic Press, 1998.
- [30] : A. Bouzida. « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes », thèse de magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie 2008.
- [31] : M. Misiti, G. Oppenheim. J. M. Poggi. WaveletToolbox for Use with MATLAB 2010.
- [32] : A. Quinquis, « Le traitement de signal sous matlab 'pratique et applications' », édition Hermès Science Publications, Paris 2000.
- [33] : M.E.H. Benbouzid, « A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection », IEEE Transaction on industrial electronics, vol47,5 n°5, pp984-993,Octobre 2000 .
- [34] : E. Hitti, « Sélection d'un banc optimale de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes, Application à la détection de sauts de fréquences dans des signaux multi composantes », thèse de doctorat de l'école Central de Nantes France, Novembre 1999.
- [35] : R. Benzid,« Ondelettes et statistiques d'ordre supérieur appliquées aux signaux uni et bidimensionnels », thèse de doctorat, Université de Batna, Septembre 2005.
- [36] : M. Brahim, « Analyse de signal de parole par les ondelettes : 'Application Aux Mots Isolés' », mémoire de magister, Université de Batna, Algérie 2009.