

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA – BEJAIA
Faculté De Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Thème

*Traitement du signal vibratoire dans le
domaine Temps-Fréquence : Application à
la détection de défaut*

Soutenu le 24 juin 2018

Présenté par :

Mr.CHEURFA Halim

Mr.CHERFA Fahim

Composition du Jury :

Mr IDJDARENE

Examineur

Mr AIT MOKHTAR

Examineur

Mr IMAOUCHEN Yacine

Encadreur

Année Universitaire 2017/2018

Remerciement

Un merci de cœur au « bon Dieu » le tout puissant qui nous a donné la santé, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements très chaleureusement et notre sincère gratitude :

*A Notre promoteur **Mr Y. IMAOUCHEN**, pour son orientation, ses conseils, et sa disponibilité à tout moment de besoin d'orientation.*

Toutes nos reconnaissances pour vous.

Aux membres de jury, pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Que Dieu vous accorde, son aide, dans tous vos projets et activités.

Ddicace



Je dédie ce modeste travail à :

Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé et priée durant toute sa vie pour que je puisse réussir, et à mon père qui est toujours prêt à tout donné afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A mes frères : Azdin, Yamin, Yazid

A ma sœur : Nabila

*A tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (Safa, Yanni, Issa, Ayoub, Dina, Hanane, ...) et à mon chère aimé **Samira** et toute la promotion 2017/2018, Électrotechnique.*

E. Fahim

Dédicace



Je dédie ce modeste travail à :

Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé et priée durant toute sa vie pour que je puisse réussir, et à mon père qui est toujours prêt à tout donné afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A mes frères : Samir, Farouk,

A mes sœurs : Samira, Souraya

Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (kiki, Idir, Karim, Rabah, Mohamed, Yacine les jumeaux Omar et Mohand ...), et toute la promotion 2017/2018, Électrotechnique.

C. Halim

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : état de l'art des techniques d'analyse vibratoire et d'extraction d'inducteurs</i>	3
1. <i>Introduction</i> :.....	3
2. <i>Analyse dans le domaine temporel</i> :	3
2.1. <i>Les indicateurs scalaires</i> :	3
2.2. <i>Le moyennage temporel synchronisé</i> :	5
2.3. <i>Les modèles paramétriques</i> :.....	6
3. <i>Analyse dans le domaine fréquentiel</i> :	6
3.1. <i>La transformée de Fourier</i> :	7
3.2. <i>L'analyse d'enveloppe</i> :.....	7
4. <i>Analyse temps-fréquence</i> :	9
4.1. <i>La Transformée de Fourier à Fenêtre Glissante (TFFG)</i> :.....	9
4.2. <i>Le Kurtosis spectral et le Kurtogramme</i> :	10
5. <i>Analyse temps-échelle</i> :.....	10
5.1. <i>La transformation en ondelettes continues</i> :	11
5.2. <i>La transformation en ondelettes discrètes</i> :	12
5.3. <i>Les paquets d'ondelettes</i> :	12
6. <i>La décomposition en mode empirique</i> :.....	12
7. <i>La transformée SynchroSqueezing</i> :.....	13
8. <i>Conclusion</i> :	14
<i>Chapitre II : Diagnostic vibratoire d'une machine électrique tournante</i> :.....	15
1. <i>Introduction</i> :.....	15
2. <i>Les différents défauts d'une machine tournante</i> :	15
2.1. <i>Au stator</i> :	15
2.2. <i>Au rotor</i> :	16
2.3. <i>Défauts de roulement</i> :	18
3. <i>Détection de quelques défauts</i> :	19

3.1. Description de la machine étudiée :	19
3.2. Machine saine (sans défaut) :	20
3.3. Machine avec défaut de court-circuit :	21
3.4. Barre rotorique cassée :	22
4. conclusion :	22
Chapitre III : Recherche de la fréquence instantanée :	24
1. Introduction :	24
2. Signal analytique :	24
3. Fréquence instantanée et Amplitude instantanée :	25
4. Estimation de la fréquence instantanée par simulation :	26
4.1. Signal modulé simple :	26
4.2. Signal multi composantes :	27
4.3. Signal de roulement avec défaut :	28
4.3.1. Cas avec vitesse de rotation constante :	28
4.3.2. Cas avec vitesse de rotation variable :	29
5. Conclusion :	31
Chapitre IV : Application à la détection de défaut de roulement :	32
1. Introduction :	32
2. Description du banc d'essai :	33
3. Cas où la vitesse de rotation est constante:	33
3.1. Analyse en absence de défaut :	33
3.2. Analyse en présence de défaut :	35
4. Cas où la vitesse de rotation est variable :	36
4.1. Analyse au démarrage en présence de défaut :	36
4.2. Analyse à l'arrêt en présence de défaut :	37
5. Conclusion :	39
Conclusion générale :	40

Liste des figures

Figure I.1 : Séchoir traditionnelle	6
Figure I.2 : Séchoir statique	9
Figure I.3 : Echangeur thermique avec ventilateurs	10
Figure I.4 : Extracteur	10
Figure I.5 : Sonde de température PT 100	11
Figure I.6 : Illustration d'un capteur capacitif (hygrométrie).....	12
Figure I.7 : Electrovanne.....	12
..	
Figure I.8 : Armoire électrique	13
Figure I.9 : Disjoncteur moteur.....	13
Figure I.10 : Fusibles et portes-fusibles	14
Figure I.11 : Contacteur	15
Figure I.12 : Relais de phase.....	15
Figure I.13 : symbole d'un Disjoncteur magnétothermiques.....	16
Figure I.14 : Pupitre de dialogue et Code de couleur des voyants lumineux.....	17
Figure II.1 : Structure d'un système automatisé.....	18
Figure II.2 : Automates compact d'Allen-Bradly et automate zelio de Schneider.....	21
Figure II.3 : Automate modulaire de siemens et Modicon	22
Figure II.4 : structure interne d'un processeur.....	23
Figure II.5 : Architecture des canaux d'entrées/sorties d'un API	24

Figure II.6 : un photo-coupleur pour l'entrée d'API	25
Figure II.7 : un photo-coupleur pour la sortie d'API.....	25
Figure II.8 : Schéma de structure d'un automate programmable	25
Figure II.9 : Tableau d'un exemple sur les différents symboles de langage LD	26
Figure II.10 : Symbole des portes logique (exemple : millénium de crouzet)	27
Figure II.11 : Exemple d'un programme en langage IL	27
Figure II.12 : Exemple d'un programme en langage ST	28
Figure II.13 : Exemple d'un langage SFC (GRAFCET)	29
Figure II.14 : Architecture d'un' API LOGO ! 0BA7 (12/24RCE)	31
Figure II.15 : Architecture d'un module LOGO ! AM 2AQ	32
FigureII.16 : Architecture d'un module LOGO ! DM16 24R	32
Figure II.17 : Différentes tâches du logiciel LOGO ! Soft Comfort.....	34
Figure II.18 : L'interface de logiciel Siemens LOGO.....	35
Figure II.19 : Les icones de barre d'outils "Standard"	35
Figure II.20 : Les icones de la barre d'état.....	36
Figure II.21 : Barre d'outils de simulation et la fenêtre d'état	37
Figure II.22 : Création d'un nouveau programme.....	38
Figure II.23 : Importation des objets de programmation	38
Figure II.24 : Liaison entre les blocs entrées et sorties.....	39
Figure II.25 : Icône de conversion de FBD ver LD	39
Figure II.26 :Iconne de simulation.....	40
FigureII.27 : Icône d'enregistrement	40
FigureII.28 : Icône de simulation online.....	42

Figure II.29 : L'afficheur de LOGO TD de Siemens	42
Figure III.1 : Graficet de marche	44
Figure III.2 : Graficet d'arrêt/arrêt d'urgence	44
Figure III.3 : Graficets de comptage.....	45
Figure III.4 : Graficet de marche automatique des ventilateurs	45
Figure III.5 : Graficet automatique de l'extracteur.....	46
Figure III.6 : Graficet automatique de l'électrovanne	46
Figure III.7 : Graficet du mode manuelle	46
Figure III.8 : Table des mnémoniques.....	47
Figure III.9 : Schéma de puissance de démarrage direct a deux sens de rotation des ventilateurs	48
Figure III.10 : Shéma de commande du démarrage direct a deux sens de rotation des ventilateurs	49
Figure III.11 : Schémas de puissance et commande d'un démarrage direct d'un extracteur .	49
Figure III.12 : schéma de câblage d'un automate LOGO	51
Figure III.13 : Bloc de régulation chez siemens – LOGO.....	52
Figure III.14 : Courbes d'une réponse d'une action proportionnelle intégrale sur un échelon	53
Figure III.15 : Programme en FBD (LOG) de séchoir statique.....	57
Figure III.16 : Programme pour l'affichage de texte.....	57
Figure III.17 : Sélection l'appareil de base OBA7	58
Figure III.18 : Configuration des adresses de communication.....	59
Figure III.19 : Détection des adresses de communication PC et LOGO.....	59
Figure III.20 : Addition d'une connexion Ethernet.....	60
Figure III.21 : Indication des valeurs TSAP à attribuer	60

Références bibliographiques

- [1]- Paul Anglaret ; Stéphan Kazmierczak technologie génie chimique, tomes 2et 3, éditeur Amiens Centre régional de documentation pédagogique 1999
- [2]- PATRICIA ARLABOSSE, Technologies de l'ingénieur : articles relatifs au séchage, Date de publication : 10 déc. 2008
- [3]- M.MAFART, Les opérations unitaires du génie industriel alimentaire, Tome 2 : techniques séparatives (2e éd.).
- [4]-Georges Asch et coll <<les capteurs en instrumentation industrielle>>,7° édition, ©Dunod, Paris, 2006, 2010.
- [5]- thierry schanen, guide des automatismes,2001/2007.
- [6]- catalogue de schnieder électrique ,2013/2015
- [7]- Mr Melahi Ahmed, cours de conception assister par ordinateurs 2016-2017, université de Bejaïa
- [8] - Laifaoui Abdelkrim, cours de technologies des automatismes 2016-2017 Mr, université de Bejaïa
- [9]-cédric sindjui,<<le grand guide des automatismes de contrôle-commande industriels>>,lexitis édition.
- [10]- William Bolton<<automate programmable>>, traduction d'Hervé soulard, 2° édition, copyright Dunod ,2015.
- [11]- Philippe LE BRUN Lycée Louis ARMAND, programmation des automates, utilisation du grafcet et de GEMMA.
- [12] - Document technique de logo, de la firme siemens ,2009.
- [13] - Documentation technique de l'automate logo de siemens, doc version : a5e00380836-01 français.2006/2009.

Liste des tableaux

Tableau 01 : Les différents paramètres du régulateur et les plages de valeurs possible à réglé dans LOGO	53
Tableau 02 : Exemple d'application des paramètres de KC, TI et Dir	55
Tableau 03 : les procédures de configuration de l'adresse IP.....	58

Liste des figures

CHAPITRE I

<i>Figure (1.1) : principe de calcul de l'enveloppe</i>	08
<i>Figure (1.2) : Exemple de kurtosis spectral et son Kurtogramme associé</i>	10
<i>Figure (1.3) : Translation (changement de position) des ondelettes</i>	11
<i>Figure (1.4) : Changement d'échelle (niveau) des ondelettes</i>	11
<i>Figure (1.5) : Principe de la TO</i>	12

CHAPITRE II

<i>Figure (2.1) : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone</i>	16
<i>Figure (2.2) : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil</i>	17
<i>Figure (2.3) : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte</i>	17
<i>Figure (2.4) : Quelques défaillances affectant les roulements</i>	18
<i>Figure (2.5) : Machine asynchrone utilisée</i>	19
<i>Figure (2.6) : Analyse spectrale du signal de la machine saine</i>	20
<i>Figure (2.7) : Analyse fréquentielle du signal avec défaut cc</i>	21
<i>Figure (2.8) : Analyse fréquentielle du signal avec défaut barre rotorique Cassée</i>	22

CHAPITRE III

<i>Figure (3.1) : Principe d'estimation de la fréquence instantanée via le signal analytique</i>	26
<i>Figure (3.2) : (A) représente le signal $x(t)$ en fonction de temps, (B), (C) présente le comportement de l'amplitude instantanée (AI) et la fréquence instantanée(FI) et leur estimation</i>	26
<i>Figure (3.3) : TFR de signal $s(t)$: (A) TO, (B) SST (signale multi composante)</i>	27
<i>Figure (3.4) : (A) signal d'un défaut de roulement simulé, (B) spectre du signal simulé, (C)</i>	

<i>spectre de son enveloppe (Cas avec vitesse de rotation constante).....</i>	28
<i>Figure (3.5) : TFR de signal $s(t)$: (A) TO, (B) SST</i>	29
<i>Figure (3.6) : (A) signal d'un défaut de roulement simulé, (B) spectre du signal simulé, (C)</i>	
<i>spectre de son enveloppe (Cas avec vitesse de rotation variable).....</i>	30
<i>Figure (3.7) : TFR de signal $s(t)$: (A) TO, (B) SST</i>	30

CHAPITRE IV

<i>Figure (4.1) : (A) banc d'essai de l'ÉTS de Montréal, (B) défaut de bag extérieure de</i>	
<i>roulement</i>	33
<i>Figure (4.2) : Analyse spectrale du signal de la machine saine, (B) spectre du signal, et (C)</i>	
<i>spectre de son enveloppe, (D) TO, (E) SST</i>	34
<i>Figure (4.3) : Analyse spectrale du signal de la machine avec défaut à vitesse de rotation à 15</i>	
<i>Hz, (B) spectre du signal, et (C) spectre de son enveloppe,</i>	35
<i>Figure (4.3) : (D) TO, (E) SST</i>	36
<i>Figure (4.4) : Analyse spectrale du signal de la machine avec défaut jusqu'à la vitesse de</i>	
<i>rotation 20 Hz, (B) spectre du signal, et (C) spectre de son enveloppe, (D) TO,</i>	
<i>(E) SST</i>	37
<i>Figure (4.5) : Analyse spectrale du signal de la machine avec défaut à l'arrêt à partir de</i>	
<i>fréquence de rotation 30 Hz, (B) spectre du signal, et (C) spectre de son</i>	
<i>enveloppe (D) TO, (E) SST.....</i>	38

Liste des tableaux

Tableau (2.1) : Paramètres des tests et de la machine utilisée 20

Abréviations et notations

AR	: Modèle Autorégressif
TF	: Transformée de Fourier
TFFG	: Transformée de Fourier à Fenêtre glissante
DWV	: Distribution de Wigner Ville
TO	: Transformée en ondelettes
TOC	: Transformée en ondelettes continue
TOD	: Transformée en ondelettes Discrète
ARMA	: Autoregressive Moving Average
RMS	: Valeur efficace (Root Mean Square)
FC	: Facteur Crête
MTS	: Moyennage temporel synchronisé
TH	: Transformée de Hilbert
SNR	: Rapport signal sur bruit (Signal to noise ratio)
EMD	: Décomposition modale empirique (Empirical Mode Decomposition)
IMFs	: Mode de fonction intrinsèque (Intrinsic mode functions)
SST	: Transformée SynchroSqueezing
TFR	: Représentation temps-fréquence

Introduction générale

L'analyse vibratoire est une technique de la maintenance conditionnelle particulièrement adaptée aux machines tournantes. Son objectif est la surveillance et le diagnostic de l'état de fonctionnement de ces machines. En revanche, la mise en place d'une telle forme de maintenance reste très difficile. Pour cette raison, nous avons élaboré une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire.

L'analyse vibratoire, en tant qu'outil puissant de la maintenance conditionnelle, est difficile à maîtriser et à mettre en œuvre. Elle s'est, aujourd'hui, très fortement répandue dans l'industrie en y trouvant sa place parmi les stratégies de la maintenance conditionnelle pourtant les méthodes et les techniques utilisées sont très difficiles et très différentes d'un site à l'autre. Même les spécialistes trouvent toujours des difficultés lors du déploiement du diagnostic vibratoire. Actuellement, il existe un réel décalage entre les potentialités d'investigation et de surveillance offertes par l'analyse vibratoire et la plupart des pratiques sur le terrain. La réussite de l'instauration de ces techniques d'investigation passe par l'implantation d'une démarche rigoureuse.

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art des techniques d'analyse vibratoire et d'extraction d'indicateurs. Cet état de l'art, a pour but d'éclaircir et de visionner les avantages et les inconvénients de différentes techniques utilisées dans l'analyse vibratoire, ce qui permet d'avoir une direction de travail assez claire.

Le deuxième chapitre mentionne les différents types de défaut dans une machine tournante (roulement, rotor, stator), ensuite, on a mesuré les vibrations sur la machine asynchrone pour trois conditions différentes, à savoir le cas où la machine est : saine (sans défaut), machine avec défaut de court-circuit au stator et avec défaut de barre cassée au rotor.

Le troisième chapitre consiste à l'amélioration de la représentation Temps-Fréquence (TFR), et estimation de la Fréquence Instantanée (FI) d'un signal mono-composante avec les différentes méthodes, ainsi la représentation d'un signal multi-composante. Une analyse sur le plan Temps-Fréquence d'un signal multi-composante a été traitée avec la Transformée en Ondelettes (TO) et par la Transformée SynchroSqueezing (SST). Et à la fin, une simulation d'un signal de roulement en présence de défaut avec deux cas de figure ; à vitesse de rotation constante et à vitesse de rotation variable.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une analyse réalisée sur des signaux vibratoires réels dont le but de diagnostic des roulements sans et avec défauts dans les cas où la machine d'essai tourne à vitesse de rotation constante où variable (démarrage et arrêt progressifs). L'analyse des signaux de mesure se fait avec les techniques proposées dans le chapitre 1.

Enfin, une discussion de l'ensemble des résultats est donnée en conclusion en soulignant l'avantage et la limite des méthodes proposées ainsi que les points négatifs qui peuvent être améliorés par d'autres études ultérieures.

Chapitre I

État de l'art des techniques d'analyse vibratoire et d'extraction d'indicateurs

1. Introduction

La première phase de la conception d'un système de diagnostic vibratoire automatisé est le choix des méthodes de traitement de signal qui a fait l'objet de plusieurs études de recherche ces dernières années. Les indicateurs ainsi calculés doivent être significatifs de l'évolution du mode de défaillance à anticiper. En analyse temporelle, l'étude est basée sur l'évolution des signaux vibratoires dans le temps. Dans ce type d'analyse, figurent en premier lieu les grandeurs statistiques telles que : la valeur moyenne, la variance, la valeur efficace ...etc. Une autre approche très populaire dans le domaine temporel est le moyennage temporel synchronisé. Les modèles paramétriques sont aussi utilisés, à l'exemple des modèles autorégressifs Modèle Autorégressif (AR), et Autoregressive Moving Average (ARMA). Les approches portant sur le domaine fréquentiel sont basées sur l'analyse par la transformation de Fourier (TF), et l'analyse d'enveloppe. Les analyses dans le domaine temps-fréquence permettent de représenter dans ces deux espaces les signaux non stationnaires. Dans cette catégorie, à part la Transformation de Fourier à Fenêtre Glissante (TFFG), opération à partir de laquelle est déterminé le Spectrogramme, l'analyse temps-échelle basée sur les ondelettes a été l'objet de plusieurs recherches, d'où l'on trouve la transformée en ondelettes continues, paquets d'ondelettes et récemment la Synchronosqueezing.

Dans ce chapitre, sont décrit les principes et les applications de ces techniques d'analyse dans le cadre de diagnostic vibratoire automatisé des machines tournantes. Nous nous intéressons, en particulier, à celles que nous allons utiliser pour traiter les signaux de mesures dans le chapitre 4. Notons ici que les signaux à traiter par ces méthodes, sont des signaux échantillonnés (numériques), mesurés sur des machines réelles.

2. Analyse dans le domaine temporel

2.1. Les indicateurs scalaires

Les indicateurs scalaires associent à un signal, le plus souvent observé sous sa forme

temporelle en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire. Plusieurs indicateurs sont utilisés dans la maintenance conditionnelle des machines tournantes : la valeur efficace ou RMS (Root Mean Square), la valeur crête ou une combinaison de ces deux paramètres représentés par le kurtosis et le facteur de crête.

A partir de cette définition plusieurs points peuvent être dégagés :

- Les indicateurs scalaires sont calculés à partir d'un signal temporel, la grandeur représentative de ce signal doit être minutieusement choisie. Pour les roulements on choisira l'accélération, le plus souvent utilisée ;
- La durée d'analyse doit être suffisamment grande pour contenir l'information cherchée, elle doit contenir au minimum plusieurs dizaines de tours ou plusieurs périodes de répétition des forces impulsives induites par le défaut. Le plus souvent en pratique, deux périodes sont assez suffisantes ;
- Un indicateur scalaire est un nombre, donc sa valeur doit être significative d'un état de dégradation du système ou au moins comparable à des valeurs de référence.

L'approche la plus simple pour l'utilisation des indicateurs scalaires consiste au calcul de la valeur efficace, appelée encore RMS (Root Mean Square) [1].

➤ Valeur efficace :

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculée comme montré par l'équation (1.1) :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} s_k(k)^2} \quad (1.1)$$

Ou N_e : représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal
 s_k : le signal

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation du RMS c'est qu'il donne généralement une alarme assez tardive, notamment pour le cas des défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées [2].

➤ **Facteur crête :**

Le facteur crête Fc est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer de plus près le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet un dépistage plus précoce des défauts en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace, comme montré par l'équation (1.2).

$$Fc = \frac{\text{valeur crête}}{RMS} = \frac{\sup |S(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} S_k(k)^2}} \quad (1.2)$$

Le facteur crête suit une distribution normale [2], sa valeur varie en générale entre 3 et 6, pour un fonctionnement sans défaut et peut aller au-delà de 6 dès l'apparition d'une défaillance.

D'autres indicateurs ont été développés sur la base du facteur crête, tels que le facteur k , en multipliant la valeur crête par la valeur efficace ou la valeur crête à crête, mesurant l'écart entre les amplitudes des pics supérieur et inférieur [2].

➤ **Kurtosis :**

Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre.

$$kurtosis = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_k(t) - \bar{S})^4}{[\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_k(t) - \bar{S})^2]^2} \quad (1.3)$$

Avec \bar{S} la valeur moyenne qui est en soit même un indicateur scalaire, son expression est :

$$\bar{S} = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} S_k \quad (1.4)$$

Le Kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Le Kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale. Pour être plus efficaces le Kurtosis et le facteur crête sont calculés dans certaines bandes fréquentielles où l'effet engendré par les dégradations est plus visible [2].

2.2. Le moyennage temporel synchronisé

Le moyennage temporel synchronisé (MTS) représente une autre approche très populaire dans le domaine temporel. L'idée générale de MTS consiste à découper le signal

vibratoire en segments de même longueur et d'effectuer une moyenne d'ensemble sur ces segments afin d'éliminer ou réduire le bruit [3], elle est donnée par.

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(t + nT), \quad 0 \leq t < T \quad (1.5)$$

Ceci peut être modélisé comme la convolution du signal $S(t)$ avec un train de N fonctions déplacées par des multiples entiers de la durée de période T .

2.3. Les Modèles paramétriques

Les modèles paramétriques représentent d'autres approches appliquées dans l'analyse temporelle des signaux vibratoires, l'idée générale de ces méthodes est de représenter le signal temporel par un modèle paramétrique et d'extraire des indicateurs basés sur les paramètres de ce modèle. Indiquons cependant que cette modélisation est une modélisation de représentation, les paramètres ne sont pas liés à la physique du phénomène (boîte noire) [3]. Parmi les modèles couramment utilisés on trouve le modèle ARMA (*Autoregressive Moving Average*) d'ordre p, q et noté ARMA (p, q):

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + \varepsilon_t - b_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - b_q \varepsilon_{t-q} \quad (1.6)$$

Avec x_t : le signal temporel,
 a_i, b_i : les coefficients du modèle,
 p, q : l'ordre du modèle,
 ε : un bruit blanc de moyenne nulle.

Le modèle AR et le modèle MA représentent des cas particuliers du modèle ARMA avec $q=0$ et $p=0$ respectivement [3].

3. Analyse dans le domaine fréquentiel

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier (éq.1.7) qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence f , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.7)$$

Où

$X(f)$ est la transformée de Fourier.

T est la variable temps.

f est la variable fréquence.

3.1. La transformée de Fourier

La transformée de Fourier (TF) est l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine industriel. De par sa facilité de mise en œuvre et d'interprétation, cette représentation permet de connaître le contenu fréquentiel d'un signal temporel. Pour cette raison la transformée de Fourier a été largement utilisée dans le domaine de diagnostic des défauts pour localiser les fréquences caractéristiques de défauts. Dans la pratique, et plus particulièrement pour des signaux numériques, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (Fast Fourier Transform, FFT) [3], elle est définie par :

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (1.8)$$

Où

$X(K\Delta f)$: la transformée de Fourier discrète rapide,

t_e : la période d'échantillonnage du signal temporel,

n : le numéro de l'échantillon,

K : le numéro de la ligne fréquentielle,

Δf : l'intervalle entre deux raies fréquentielles,

N : le nombre d'échantillons prélevés.

3.2. Analyse d'enveloppe

Certains défauts d'organes mécaniques comme les roulements produisent des modulations de phase (ou fréquence) et d'amplitude. Le phénomène de modulation de phase provoque dans le spectre des bandes latérales autour des fréquences principales du système (fréquence d'engrènement et harmoniques par exemple). Le spectre est un outil permettant d'identifier l'espacement en fréquence séparant ces bandes, et donc l'origine de l'anomalie.

Cependant, une autre technique existe, permettant un diagnostic plus précoce, il s'agit de l'analyse d'enveloppe, opération de démodulation de phase consistant à isoler les fréquences modulantes.

L'importance de la démodulation d'amplitude et de phase dans le domaine de détection précoce d'avaries mécaniques a été démontrée. La technique présentée ici avec utilisation de

la transformée d'Hilbert, est une des techniques de démodulation de fréquence, la plus utilisée dans le domaine de recherche de défauts de roulements.

L'étude du signal enveloppe permet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure. Elle consiste à filtrer le signal autour d'une fréquence de résonance identifiable sur le spectre, et à en rechercher la modulation provoquée par la répétition des forces générées par le défaut recherché. La détermination des fréquences de modulation, donc des taux de répétition des chocs, associée à la connaissance de la cinématique de l'installation, permet de localiser l'origine du défaut de façon précoce et rapide, même lorsque l'effet du défaut est noyé dans un bruit de fond.

Cette technique est très utilisée dans le diagnostic des défauts de type choc, mêmes pour de faibles vitesses, puisque les défauts ne sont pas recherchés dans la plage des basses fréquences du spectre mais autour de porteuses, dont les fréquences peuvent se situer à des centaines de fois la fréquence de rotation.

La démarche numérique de calcul de l'enveloppe est la suivante (**Fig.1.1**). On applique la Transformée de Fourier au signal temporel. Le spectre ainsi défini permet d'isoler les résonances du système. Le signal temporel est filtré passe-bande afin d'obtenir un spectre réduit autour de la fréquence principale du système, puis on applique la Transformée d'Hilbert. Par Transformée inverse de Fourier, on obtient le signal enveloppe temporel. Ce signal est rarement directement employé comme outil d'analyse, on utilise plutôt le spectre enveloppe.

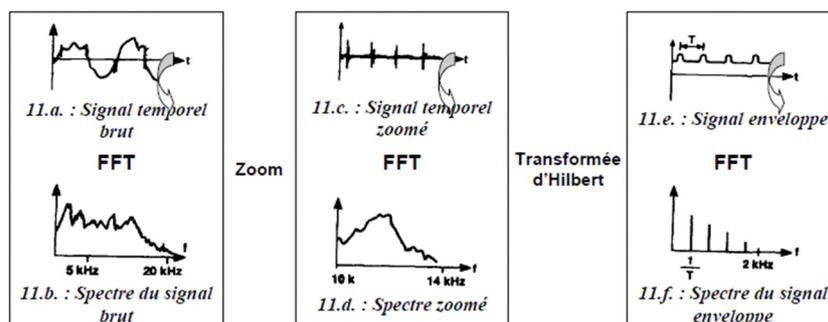


Figure (1.1) : principe de calcul de l'enveloppe [4]

L'analyse d'enveloppe filtre les basses fréquences de rotation du signal complexe. Les composantes répétitives de hautes fréquences sont amplifiées et converties en spectre tandis que le bruit de la machine est réduit avec un rapport signal-bruit significatif. Si des vibrations

apparaissent dans le spectre enveloppe qui est lié aux fréquences de défaut du roulement, on peut en déduire qu'un défaut se développe [4].

La technique la plus utilisée dans le domaine de recherche des défauts se base sur la Transformée de Hilbert (TH).

$$H[x(t)] = \tilde{x}(t) = \pi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1.9)$$

La TH peut déterminer l'amplitude instantanée et la fréquence instantanée selon l'expression donnée par [7] :

$$z(t) = x(t) - iy(t) = x(t) + i\mathcal{H}[x(t)] = Ae^{i\varphi(t)} \quad (1.10)$$

Où $\mathcal{H}[x(t)]$ est la transformée de Hilbert de $x(t)$, $A(t)$ est l'amplitude instantanée (enveloppe, magnitude) et $\varphi(t)$ est la phase instantanée.

4. Analyse temps – fréquence

En utilisant les deux représentations d'un signal vibratoire dans les deux domaines précédents, plusieurs indicateurs peuvent être obtenus. Mais quand le contenu spectral du signal change dans le temps, les indicateurs extraits dans un seul domaine (temporel ou spectral) ne sont pas suffisants pour représenter le signal. Plusieurs méthodes ont été proposées pour remédier à ce problème. La transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) ou spectrogramme, et la distribution Wigner–Ville (DWV), sont les distributions temps -fréquence les plus utilisées. Dans cette catégorie, il convient également de citer une récente méthode appelée le Kurtogramme.

4.1. La transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Le principe de cette représentation temps-fréquence est le suivant :

- Pour localiser en temps, on tronque le signal étudié, $x(\theta)$, n'en multipliant par une fonction $\alpha(\theta - t)$ nulle à l'extérieur du domaine

$$t - \frac{T}{2} < \theta < t + \frac{T}{2} \quad (1.11)$$

La fonction $\alpha(\cdot)$ Peut-être une fonction porte de durée T centrée sur l'instant t.

- On calcule ensuite la densité du signal tronqué. Cette densité est le module carré de la transformée de Fourier du signal tronqué.
- On obtient une fonction $S_x(t, \nu)$ des deux temps (t) et fréquence (ν) qui décrit la répartition de l'énergie du signal en temps et fréquence :

$$S_x(t, \nu) = |TF[a(\theta - t)x(\theta)]|^2 = \left| \int a(\theta - t)x(\theta)e^{-2\pi j\nu\theta} d\theta \right|^2 \quad (1.12)$$

Le paramètre essentiel, fixé par l'utilisateur, est la durée T du signal tronqué [5].

4.2. Le Kurtosis spectral et le Kurtogramme

Le kurtosis spectral [3] constitue un outil très utile pour caractériser les signaux non stationnaires, dans la plupart des études, cet outil est utilisé pour déterminer la largeur de la bande de fréquence de résonance lors du diagnostic des roulements par analyse d'enveloppe. La bande choisie est celle qui minimise le rapport signal- bruit (SNR : Signal to Noise Ratio). Le kurtogramme est défini comme une cascade du Kurtosis spectrale calculés avec plusieurs fenêtres glissantes [3]. Un exemple du kurtogramme est illustré sur la (**Fig.1.2**)

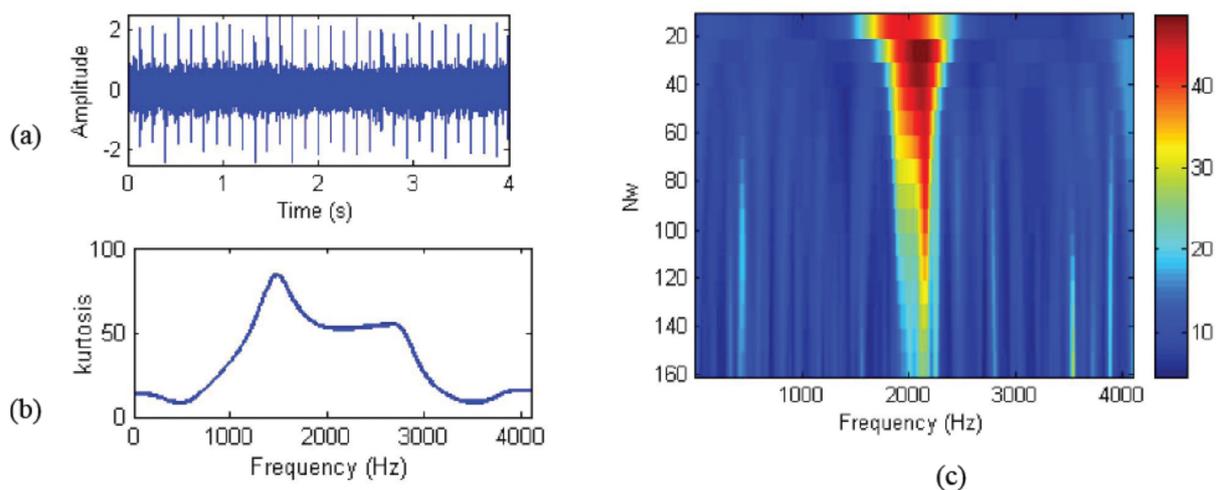


Figure (1.2) Exemple de kurtosis spectral et son Kurtogramme associé. (a) Signal simulé avec un SNR élevé (b) son Kurtosis spectral avec une longueur de fenêtres $N_w=16$ et (c) le kurtogramme associé [3].

5. Analyse temps-échelle

L'analyse temps-fréquence étudie la variation des caractéristiques fréquentielles dans le temps. Mais on peut également considérer la représentation temps-fréquence comme étant une projection du signal sur des fonctions de base fixes. D'autres approches pour l'analyse des signaux non stationnaires considèrent que les signaux non stationnaires sont des superpositions des composantes calculés des fonctions de base qui sont plus ou moins localisées dans le temps.

Les ondelettes continues sont mieux adaptées pour l'analyse temps-fréquence et pour la visualisation, tandis que les ondelettes discrètes sont très utiles en décomposition, compression et pour l'extraction des indicateurs [3].

5.1. La Transformée en Ondelettes Continue (TOC)

La TOC consiste à décomposer un signal en composantes élémentaires localisées à la fois

en temps et en fréquence. Cela s'effectue par translation (**Fig.1.3**) et dilatation (**Fig.1.4**) d'une ondelette analysante appelée ondelette mère. Les coefficients de la TOC d'un signal $x(t)$ au temps b et une dilatation a sont donné par la formule suivante (**Fig.1.5**) [6]:

$$X_{TOC} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1.13)$$

Où ' b ' est un paramètre de translation et ' a ' est un paramètre d'échelle qui mesure la dilatation ou la contraction de l'ondelette, $\psi(t)$ est l'ondelette mère, l'étoile indique le conjugué de la fonction. Chaque valeur de la transformée en ondelette X_{TOC} est normalisée par un facteur $1 / \sqrt{a}$.

La synthèse de $x(t)$ à partir des coefficients d'ondelettes est décrite par la formule :

$$x(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} X_{TOC}(a, b) \Psi_{a,b} \frac{da db}{a^2} \quad (1.14)$$

Avec c est une constante donnée par la condition d'admissibilité. La figure 1.5 montre la TOC du signal $x(t)$ (équation 1.13) cette figure montre deux fréquences (100Hz et 10Hz) à deux échelles différentes, trois impulsions dont deux correspondent aux impulsions du signal et troisième au temps 1s correspond au changement brusque des deux fréquences qui montre la discontinuité.

La transformée en ondelettes est constituée de deux grandes parties : la TOC et celui des ondelettes orthogonales et les paquets d'ondelettes (la transformée en ondelettes discrète).

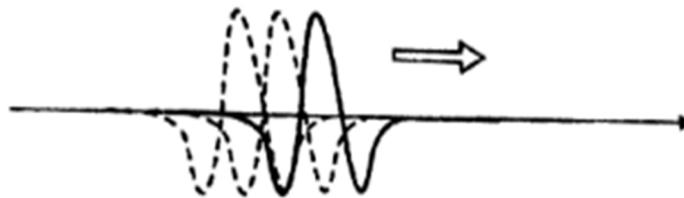


Figure (1.3) : Translation (changement de position) des ondelettes [12]

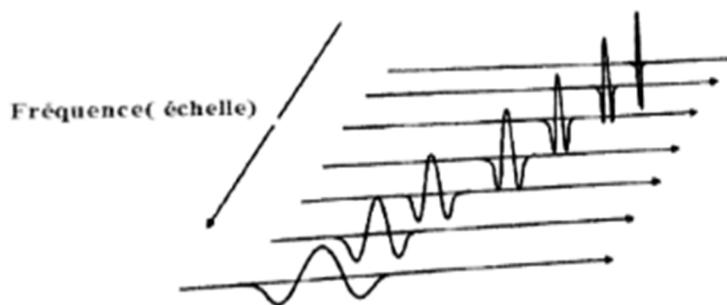


Figure (1.4) : Changement d'échelle (niveau) des ondelettes [6]

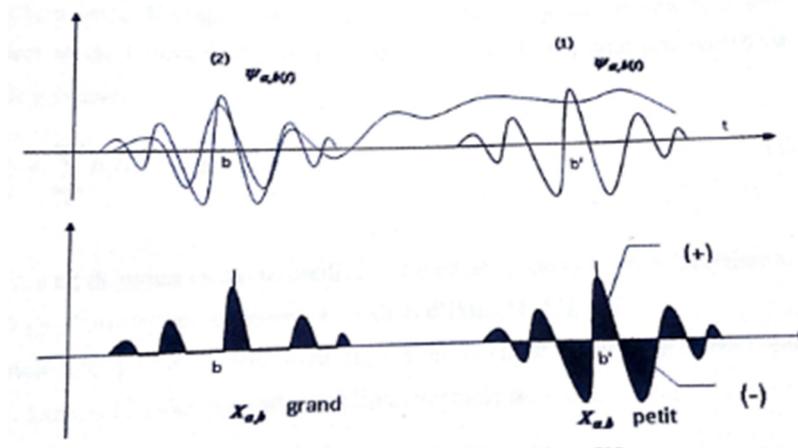


Figure (1.5) : Principe de la TO continue [6]

5.2. La transformée d'ondelettes discrète

Du point de vue fonctionnel, il s'agit de remplacer une représentation continue (a, b) par une représentation discrète [6]. Cela se fait en échantillonnant les coefficients de l'ondelette sur hyperbolique qui permet d'avoir une représentation non redondante et de numériser le traitement par ondelettes.

5.3. Les paquets d'ondelettes

Comme pour les transformées discrètes en ondelettes orthogonale, les paquets d'ondelettes nécessitent l'emploi d'ondelettes orthogonale [6]. Le principe de la décomposition en paquets d'ondelettes est de retirer le processus de décomposition d'un signal en approximation et en détail non plus uniquement sur les coefficients d'approximation.

6. La décomposition en mode empirique

La décomposition en mode empirique, EMD (Empirical Mode Decomposition) a été proposée par Huang [3] pour l'analyse des signaux non stationnaires.

Contrairement à la représentation temps-fréquence ou aux ondelettes, la base de décomposition de l'EMD est intrinsèque au signal.

Le signal en modes empiriques ou IMFs (Intrinsic Mode Functions).

La décomposition est locale, itérative, séquentielle et entièrement pilotée par les données.

Pour calculer les IMFs, la procédure est comme suit :

- Extraire les maxima et minima locaux du signal.
- Calculer les enveloppes supérieures et inférieures par interpolation.

- Calculer l'enveloppe moyenne locale $m(t)$ à partir des enveloppes supérieures et inférieures.
- Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée $h(t) = x(t) - m(t)$
- Si $h(t)$ est un IMF, le résidu est $r(t) = x(t) - h(t)$ et le nouveau signal sera.
 $x(t) = h(t)$.
- Si $h(t)$ n'est pas un IMF le nouveau signal sera $x(t) = r(t)$.

La propriété de l'EMD comme étant un filtre passe band, a été exploitée par [3] pour déterminer avec précision les IMFs qui contiennent les fréquences de résonance avant d'appliquer l'analyse d'enveloppe. Cette méthode a été comparée avec l'analyse classique de l'enveloppe pour la détection des défauts multiples de roulements.

7. Transformée SynchroSqueezing (SST)

Le SynchroSqueezing est une variante de la réallocation d'une représentation TF. Elle a été introduite tout d'abord par Maes [14-15], pour ensuite connaître un renouveau avec Daubeshies par le développement de la transformée SynchroSqueezing (SST) [7]. Le principe est de modifier le fonctionnement de la réallocation, de manière à obtenir une formule de reconstruction locale. La SST fait intervenir la phase et permet à la fois, d'obtenir une représentation TF concentrée, tout en autorisant la reconstruction des modes, ce qui lui a permis d'offrir des résultats attrayants pour la décomposition des signaux multi-composant. Nous aborderons le principe théorique de la SST basée sur la TOC telle qu'annoncée par Maes et Daubeshies. Dans le cas d'un signal sinusoïdal $x(t) = A \cos(\omega t)$, la formule devient :

$$W_x(t, a) = \frac{A\sqrt{a}}{4\pi} \hat{\psi}^*(a\omega) e^{it\omega} \quad (1.15)$$

Si l'énergie de la transformée de Fourier de l'ondelette $\hat{\psi}(\xi)$ est concentrée autour de $\xi = \omega_0$, alors sur le plan temps-échelle, la transformée en ondelettes continues $W_x(t, a)$ du signal (t) devrait se concentrer tout au long de la ligne horizontale $a = \omega_0/\omega$, tandis qu'en réalité, son énergie sera distribuée autour de cette ligne, engendrant par cela des interférences. Pour des signaux à fréquence constante, cette interférence se produit uniquement sur la dimension échelle, sans mettre la dimension du temps en confusion. Malgré que $W_x(t, a)$ s'étale autour de l'échelle a , sa forme dans le temps t reste focalisée sur la fréquence exacte ω , sans se préoccuper de la dimension échelle a . Donc, pour n'importe quel point dans le plan temps-échelle (t, a) , si $W_x(t, a) \neq 0$, la fréquence angulaire peut être calculée par :

$$\omega_x(t, a) = \frac{-i}{W_x(t, a)} \frac{\partial W_x(t, a)}{\partial t} \quad (1.16)$$

Dans le but de supprimer ces interférences au long de l'échelle, et se rapprocher d'une TFR instantanée idéale, la SST utilise une formule de reconstruction intégrale, pour produire une représentation similaire tout en étant inversible, ce qui n'est pas le cas de la réallocation. L'opérateur SynchroSqueezing est donné par :

$$T_x(t, \omega_1) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{a_k} W_x(t, a_k) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \quad (1.17)$$

Avec a_k varie en satisfaisant la relation : $| (t, a_k) - \omega_l | \leq \Delta\omega/2$, ω_l est la $l^{\text{ème}}$ fréquence angulaire discrète, a_k est le $k^{\text{ème}}$ point d'échelle discret. $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$ et $(\Delta a)_k = a_k - a_{k-1}$.

8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des travaux touchant à l'analyse des signaux vibratoire en vue de diagnostic de défauts dans les machines tournantes. Les indicateurs statistiques tels que la moyenne, la valeur efficace, le Kurtosi...etc., permettent une première appréciation de l'état vibratoire d'une machine ou d'une installation. Malheureusement, ils trouvent leur limite pour un diagnostic précis identifiant la nature de défaut et surtout la localisation de l'élément défaillant dans la machine.

Les méthodes avancées de diagnostics tels que la transformée de Fourier, et l'analyse d'enveloppe, donnent des résultats encourageants quand il s'agit de découvrir l'existence de défauts dans les machines tournantes. Il est à noter que l'analyse d'enveloppe est l'outil le plus approprié à l'analyse des signaux de roulements. Ces signaux sont caractérisés par de faibles fréquences, et ces derniers sont généralement modulés par les fréquences de résonance de la structure. Cependant, ces méthodes offrent peu d'information sur la localisation tant dans l'espace que dans le temps de ces défauts. Ce problème a été cerné par le développement des techniques d'analyse du signal dans le domaine temps-fréquence tels que la Transformée de Fourier à fenêtre glissante, et le kurtosis spectral.

Les deux variantes de la transformées en ondelettes (TOC, TOD), et les paquets d'ondelettes ont été largement utilisées dans le domaine de diagnostic des défauts dans les machines tournantes grâce à leurs aptitudes de traiter des signaux non stationnaires, où beaucoup plus d'informations aidant au diagnostic apparaissent.

Chapitre II

Diagnostic vibratoire d'une machine électrique tournante

1. Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance à priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Au cours de leur durée de vie, les machines électriques tournantes sont bien souvent soumises à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à un certain nombre de défaillances. Ces défaillances peuvent évidemment concerner les différents sous-systèmes des entraînements électriques.

Dans ce chapitre est en première lieu de mentionner les différents types de défauts dans une machine tournante (roulement, rotor, stator, ...) puis détecter des différents défauts (court-circuit des spires au stator, barre rotorique cassée, roulement défectueux).

Un intérêt particulier a été donné dans ce travail à l'analyse vibratoire comme source d'information vue, par la plupart, comme la technique la plus globale pour la surveillance des machines tournantes.

2. Les différents défauts d'une machine tournante

2.1 Au stator

Les défauts statoriques regroupent principalement les défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court-circuit entre phases, ou court-circuit entre spires. Ils commencent généralement par un court-circuit entre spires, avant d'évoluer vers des défauts plus graves.

Une des principales causes de ces défauts est la dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage. Le courant, dans les spires court-circuitées, atteint des valeurs énormes et l'augmentation de la température qui en suit entraîne la destruction de tous les

isolants et par conséquent la défaillance complète de la machine [8]. La (Fig.2.1) représente deux exemples de dégâts provoqués par le défaut de court-circuit au stator.



Figure (2.1) Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone [8].

Ces défauts sont généralement facilement détectables tant les effets qu'ils engendrent, sur les courants de phase notamment, sont importants. Les défauts de court-circuit entre spires, quant à eux, sont plus difficilement perceptibles à travers la seule observation directe des courants de ligne, ce qui augmente les difficultés liées à leur détection.

2.2 Au rotor

Contrairement aux défauts statoriques, les défauts au rotor dépendent du type de la machine considérée, parmi lesquels on peut citer les plus importants :

❖ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

La présence d'un défaut de rupture ou de casse d'une portion d'anneau de court-circuit crée un déséquilibre dans la répartition des courants dans les barres rotoriques [9]. Ceci implique une modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la casse de barres.

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Fig.2.2).

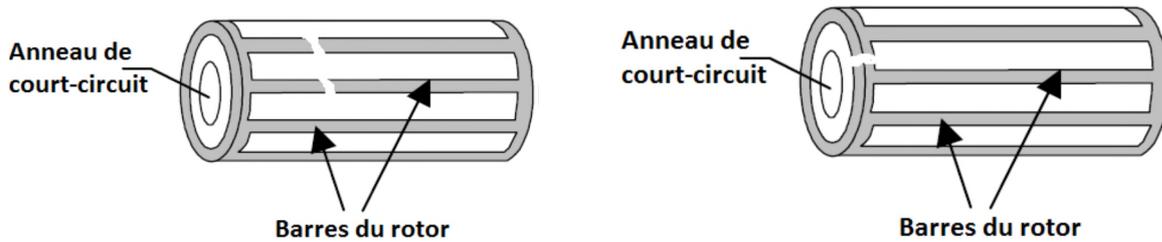


Figure (2.2) : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit [9].

❖ Défaut d'excentricité

Trois catégories d'excentricité peuvent être identifiées dans la littérature et sont illustrées dans la (Fig.2.3) [10] :

- Excentricité statique (Fig.2.3(a)) : le rotor est déplacé du centre de l'alésage du stator mais il tourne toujours autour de son axe. Elle est due généralement soit à une imperfection de l'alésage du stator, soit à un mauvais positionnement du rotor ou du stator à l'étape de mise en service.
- Excentricité dynamique (Fig.2.3(b)) : le rotor est positionné au centre de l'alésage du stator mais il ne tourne plus autour de son axe. Ce type peut être provoqué par divers facteurs tels que l'usure des roulements, les résonances mécaniques à la vitesse critique et le désalignement.
- Excentricité mixte (Fig.2.3(c)) : la combinaison des deux cas cités précédemment

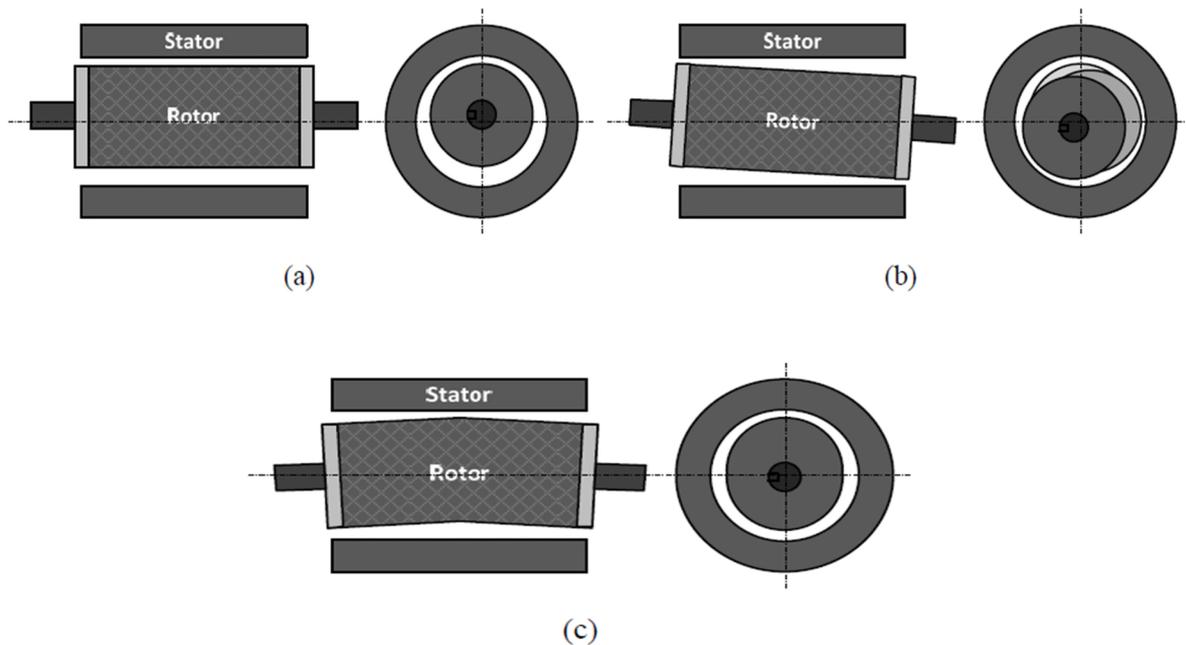


Figure (2.3) : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte

2.3. Défauts de roulement

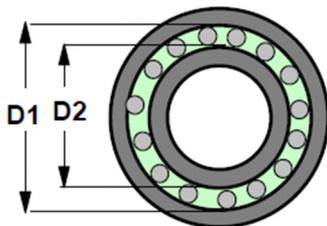
Par définition, la durée de vie d'un roulement est une donnée statistique caractérisant le nombre de tours qu'il peut être effectué en étant soumis à une contrainte spécifique.

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 [11].



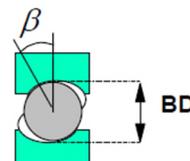
Figure (2.4) : Quelques défaillances affectant les roulements [11]

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



$$D_p = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

n = nombre de billes
 fr = fréquence de rotation



$$F_{bext}(Hz) = \frac{n}{2} f_r (1 - \frac{De}{Dp} \cos \beta) \quad (2.1)$$

$$F_{bint}(Hz) = \frac{n}{2} f_r (1 + \frac{De}{Dp} \cos \beta) \quad (2.2)$$

$$F_{bille}(Hz) = \frac{Dp}{2De} f_r [1 - (\frac{De}{Dp} \cos \beta)^2] \quad (2.3)$$

$$F_{cage} = f_{outer}(Hz) = \frac{1}{2} f_r (1 - \frac{De}{Dp} \cos \beta) \quad (2.4)$$

Avec

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

De : diamètre des billes.

Dp : le diamètre moyen du roulement.

β : 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).

3. Détection de quelques défauts

Dans cette partie, la mesure de vibrations est effectuée sur la machine asynchrone pour trois conditions différentes, à savoir le cas où la machine est : saine (son défaut) et machine avec défaut de court-circuit ou bien avec une barre cassée au rotor.

3.1. Description de la machine étudiée

Afin de tester la consistance de la théorie présentée dans la section précédente sur un cas réel, nous disposons d'un banc d'essai constitué principalement par une machine asynchrone de test reconstruite de façon à avoir accès à un certain nombre de spires sur le bobinage de deux phases, ce qui modifie sa plaque à borne. C'est une machine asynchrone triphasée à deux paires de pôles, d'une puissance de 3 kW, alimentée directement par le réseau électrique du laboratoire (230 volts, 50 Hz). La machine, avec stator et rotor séparés, est présentée sur la (Fig.2.5).



Figure (2.5) : Machine asynchrone utilisée

Les caractéristiques du banc d'essai avec les paramètres de la machine sont Tableau II.1

Tableau 2. 1 : Paramètres des tests et de la machine utilisée

Puissance	3 kW
Nombre de spires de chaque phase	392 (196*2)
Nombre de paires de pôles p	2
Nombre d'encoches	36
Nombre de barres	24
Fréquence du secteur f_s	50 Hz
Fréquence de rotation f_r	24.84 Hz
Fréquence d'échantillonnage	10 kHz

3.2. Machine saine (sans défaut)

Dans ce test, le signal mesuré sur la machine asynchrone de test qui est en bon état est traité par les trois méthodes.

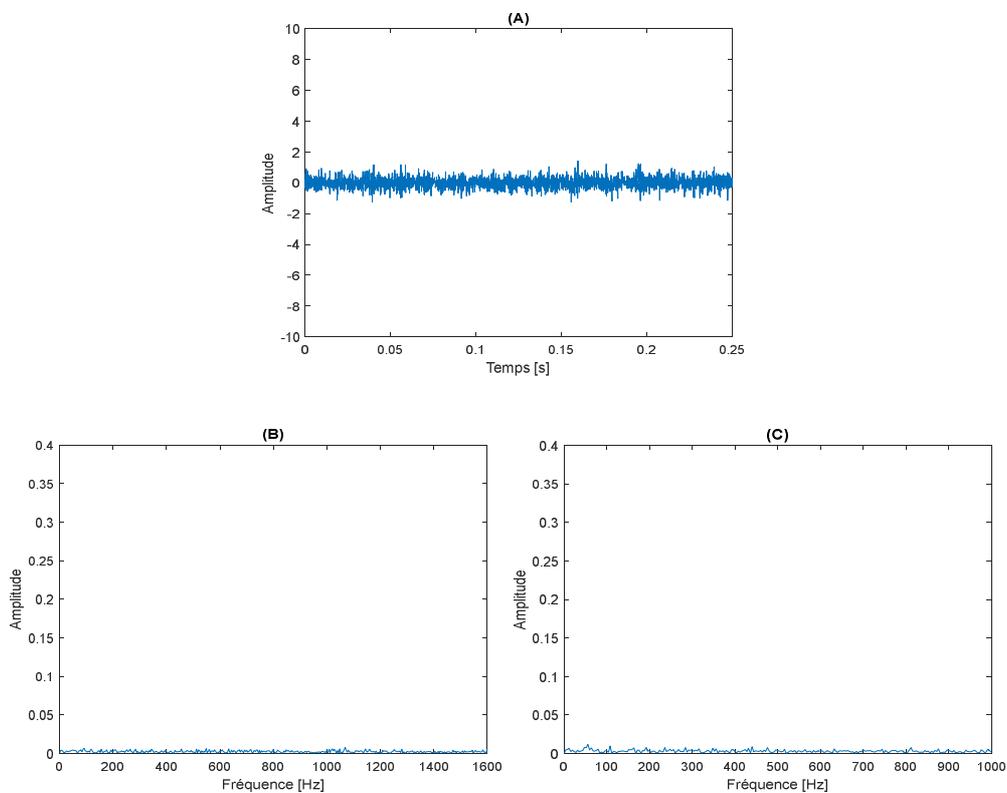


Figure 2.6 : Analyse spectrale du signal de la machine saine, (B) spectre du signal, et (C) spectre de son enveloppe.

En premier lieu, Analyse spectrale du signal de la machine saine et l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe du signal mesuré ont donné les spectres des Figures 2.6 (A, B et C) respectivement. Comme prévu, les spectres des deux méthodes montrent qu'il n'existe aucune composante fréquentielle caractéristique d'un défaut quelconque.

3.3. Machine avec défaut de court-circuit

Le signal de vibrations mesuré lors de la présence de défaut d'une portion de spires en court-circuit au stator, est analysé et représenté sur la **Fig.2.7**. L'analyse spectrale du signal fig.2.7 (a) montre des pics d'amplitude espacés de 2 fois la fréquence d'alimentation (100Hz).

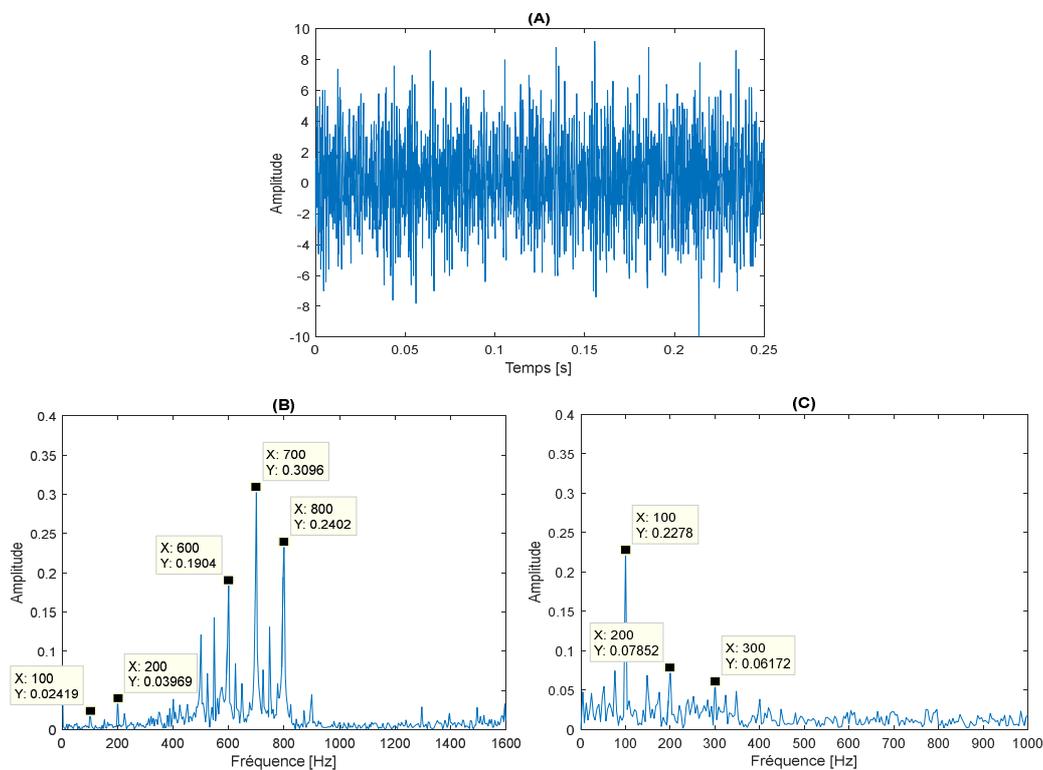


Figure (2.7) : (A) analyse fréquentielle du signal avec défaut cc ; (B) spectre du signal, et (C) spectre de son enveloppe

Deux harmoniques de la fréquence $Fd = 2fs$, ainsi que des bandes latérales espacées de la fréquence de rotation Fr sont présentes sur ce spectre. La démodulation du signal par analyse d'enveloppe de la **Fig.2.7(C)** offre un pic d'amplitude plus importante à la fréquence de défaut $Fd = 2f$. Le spectre d'enveloppe montre deux autres harmoniques de la fréquence de défaut qui est susceptible d'augmenter en amplitude avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit.

3.4. Barre de rotor cassée

Le signal mesuré avec une barre cassée au rotor est analysé dans le domaine fréquentiel et les spectres résultants sont présentés sur la (Fig.2.8). En examinant le spectre du signal de défaut, une modulation de la fréquence de rotation est apparue autour de la fréquence d'encoche $F_{enc} = NrFr = 596,16 \text{ Hz}$. De plus, trois harmoniques de la fréquence $Fd=2fs=100\text{Hz}$ sont présents sur ce spectre avec des amplitudes très importantes.

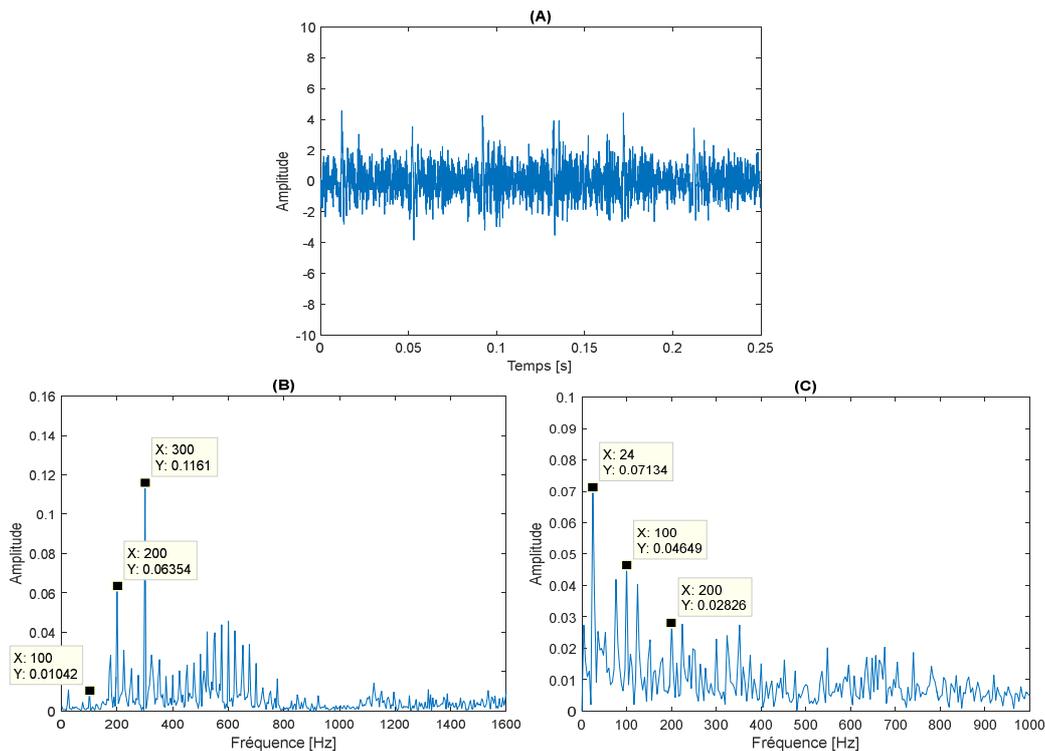


Figure (2.8) : Analyse fréquentielle du signal avec défaut ; (B) spectre du signal, et (C) spectre de son enveloppe

La démodulation du signal par analyse d'enveloppe donne des harmoniques de la fréquence de rotation Fr , ce qui indique un déséquilibre des forces induites par une asymétrie du champ électromagnétique tournant suite à l'introduction du défaut de la barre rotorique cassée.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux défauts apparaissant dans les machines électriques tournantes (roulement, rotor, stator), puis nous avons étudié plusieurs signaux qui décrivent les états de défaillance de certains organes électromécaniques d'une machine asynchrone. Et la manière d'analyser les signaux vibratoires en utilisant les deux méthodes pour la détection de défauts à savoir ; l'analyse de Fourier et l'analyse d'enveloppe. Pour l'analyse spectrale elle se déroule à partir des signatures de chaque défaut elle est basée sur la comparaison entre signatures au cours du temps. Tandis que l'analyse d'enveloppe démodule le signal et nous renseigne clairement sur la présence de défauts en indiquant les

fréquences qui les caractérisent sans prendre en compte les fréquences liées à la résonance du système complet.

Chapitre III

Recherche de la fréquence instantanée

1. Introduction

Un défaut dans une machine électrique tournante est caractérisé par une fréquence spécifique dans le spectre d'une mesure vibratoire sur cette machine cela est relativement facile à détecter par les méthodes d'analyse spectrales. Cependant, la machine est souvent soumise à des variations de charge ou de vitesse de rotation, ce qui provoque des fluctuations ou des ambiguïtés sur les composantes fréquentielles caractéristiques du défaut, et cela rend leur détection difficile voire même impossible. Une manière simple pour la détection de cette anomalie est de chercher l'amplitude et la fréquence instantanées liées au défaut. Dans le premier chapitre nous avons énuméré la panoplie des méthodes utilisées pour palier à cette anomalie et dans ce chapitre nous allons les mettre en œuvre afin d'évaluer leurs capacités à déceler la fréquence et l'amplitude caractéristique du défaut en particulier lorsque la vitesse de rotation de la machine est variable. Il suffit donc de suivre l'évolution de la fréquence du défaut en fonction du temps, ce qui donne une représentation temps-fréquence (RTF).

2. Signal analytique

Un signal analytique (SA), est un signal qui n'a pas de composantes fréquentielles négatives. Il est à mettre en opposition avec un signal sinusoïdal réel (ex : $\cos(\omega t)$) dont le spectre est constitué de ω et $-\omega$. En temps continu, le signal analytique $Z(t)$ s'écrit :

$$Z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} z(\omega) e^{j\omega t} . d\omega \quad (3.1)$$

Où $Z(\omega)$ est le coefficient complexe (amplitude et phase) d'une sinusoïde complexe de fréquence positive ($e^{j\omega t}$).

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

$$Ae^{j(\omega t + \varphi)} = A \cos(\omega t + \varphi) + jA \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

Pour les signaux plus compliqués, qui sont exprimables par une somme de plusieurs sinusoides, nous pouvons utiliser la transformée de Hilbert qui déphase chaque composante d'un quart de période [12].

3. Fréquence instantanée et amplitude instantanée :

Pour calculer les caractéristiques instantanées (fréquence et amplitude) d'un signal réel $X(t)$, il est possible d'utiliser le signal analytique $Z(t)$ associée à $X(t)$:

$$z(t) = x(t) + i.Y(t) = a(t).e^{i\theta(t)} \quad (3.3)$$

Où $Y(t)$ est la transformée de Hilbert de $X(t)$, définie par :

$$H\{x(t)\} = Y(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (3.4)$$

Dans (2.3) $a(t)$ correspond à l'amplitude instantanée de $Z(t)$:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + Y^2(t)} \quad (3.5)$$

Et $\theta(t)$ est la phase instantanée :

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \quad (3.6)$$

La fréquence instantanée de $Z(t)$, et donc de $X(t)$, n'est autre que la dérivée de la phase instantanée :

$$w = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Le calcul de la fréquence instantanée par cette technique a des limitations théoriques : il n'est applicable qu'aux signaux qui peuvent se représenter par une fréquence unique à chaque instant. L'estimation de l'amplitude instantanée et la fréquence instantanée d'un signal par la transformée de Hilbert est schématisée dans la **Figure (3.1)** [13].

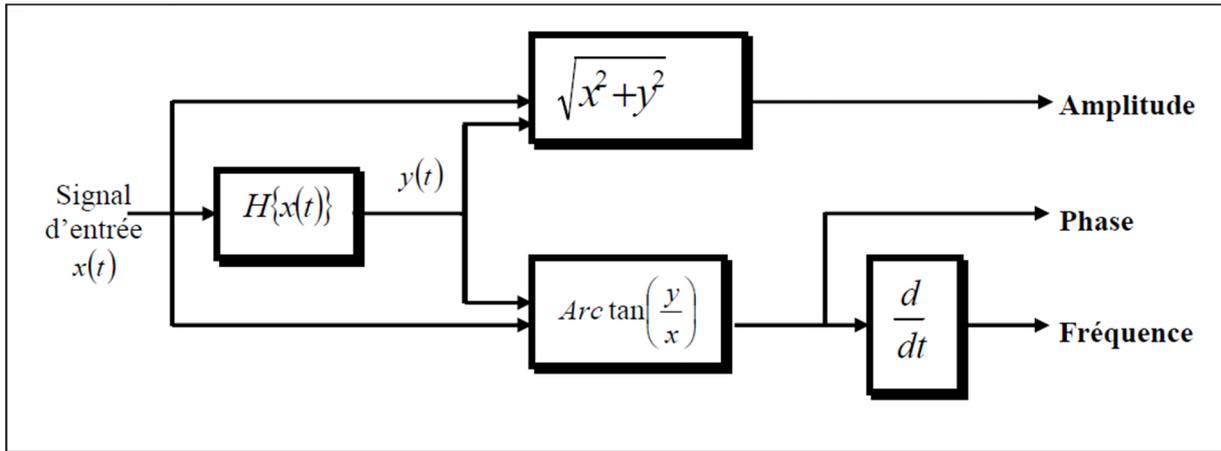


Figure (3.1) : Principe d'estimation de la fréquence instantanée via le signal analytique.

4. Estimation de la fréquence instantanée par simulation

4.1. Signal modulé simple

Soit le signal mono-composant $x(t)$ donné dans la formule (3.8) avec $\omega_a = \pi/128$ et $\omega_m = 0.5\pi/6$, et $\omega_f = \pi/64$.

$$x(t) = (1 + 0.5 \cos(\omega_a \cdot t)) \cos(\omega_m \cdot t + 2 \cdot \sin(\omega_f \cdot t)) \quad (3.8)$$

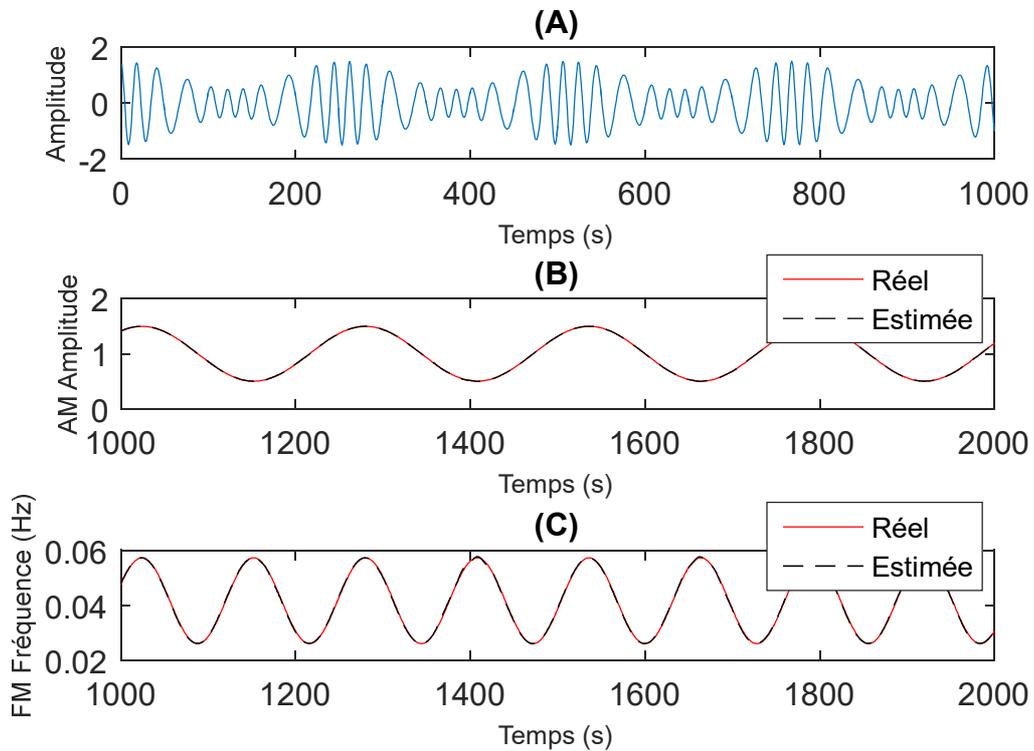


Figure (3.2) : (A) représente le signal $x(t)$ en fonction de temps, (B), (C) présente le comportement de l'amplitude instantanée (AI) et la fréquence instantanée (FI) et leur estimation.

La figure 3.2(A) représente le signal $x(t)$ en fonction de temps, et les figures 3.2(B) et 3.2(C) représente respectivement le comportement de l'amplitude instantanée (AI) et la fréquence instantanée(FI) du signal. Ainsi une approche basée sur la transformé de Hilbert(HT) permet en général une bonne estimation de la fréquence et l'amplitude instantanées d'un signal modulé (avec variation de l'amplitude et fréquence dans le temps) par rapport au calcul réel.

On voit que l'estimation de l'amplitude instantanée (AI) et la fréquence instantanée (FI) sont bien similaires à celles du signal réel. Les courbes estimées de l'amplitude et de la fréquence en fonction du temps, sont collées aux courbes calculées par déduction mathématique.

4.2. Signal multi-composantes

Dans cette partie nous allons simuler un signal multi-composante qui est défini par :

$$s(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) \quad (3.9)$$

Les composantes de signal $s(t)$ étudié dans cette partie sont données par (3.10) :

$$\begin{cases} s_1 = \cos(\pi t + \sin(2\pi t/10)) \\ s_2 = (1 + 0.5 \cos(2\pi t/5)). \cos(2\pi \cdot 1.5t) \end{cases} \quad (3.10)$$

La somme des deux signaux constitue le signal $s(t)$:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (3.11)$$

Les figures 3.3(A) et (B) montrent la représentation temps-fréquence du signal traité avec la Transformée en ondelettes (TO) et la Transformée SynchroSqueezinge (SST) respectivement.

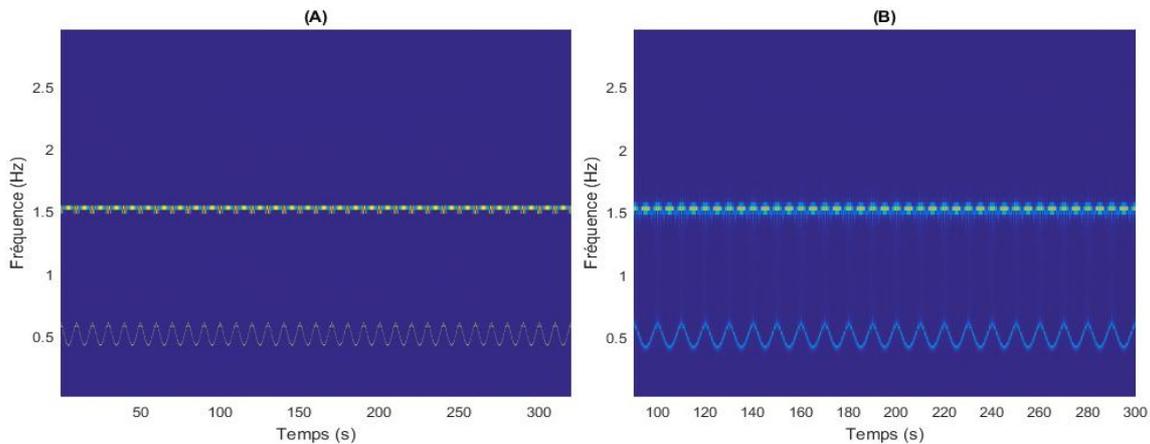


Figure (3.3) : TFR de signal $s(t)$: (A) transformée en ondelettes, (B) transformée SynchroSqueezinge.

Il est clair que la SST de la Figure 3.3(B) engendre des lignes bien plus concentrées dans le plan temps-fréquence et montre les deux composantes bien séparées et clairement tracées.

4.3. Signal de roulement avec défaut

4.3.1. Cas avec vitesse de rotation constante

Nous avons un signal $s(t)$ simulé de défaut d'un roulement (qui engendre les chocs excitant les résonances du système). Ce signal est décrit par :

$$s(t) = \sin(2\pi \cdot 800t) \cdot e^{-b\tau} \quad (3.12)$$

Avec $\tau = \text{mod}(t, 1/f_d)$ qui est le reste de division de t sur $1/f_d$ avec la fréquence de défaut $f_d = 103\text{Hz}$ et $b = 555$ (coefficient d'amortissement).

Cette fonction représente les chocs répétitifs induits par les défauts de roulement ; avec une fréquence d'échantillonnage de $f_e = 16384\text{Hz}$. Et la fréquence de modulation $F_{res} = 800\text{Hz}$ représente la fréquence de résonance.

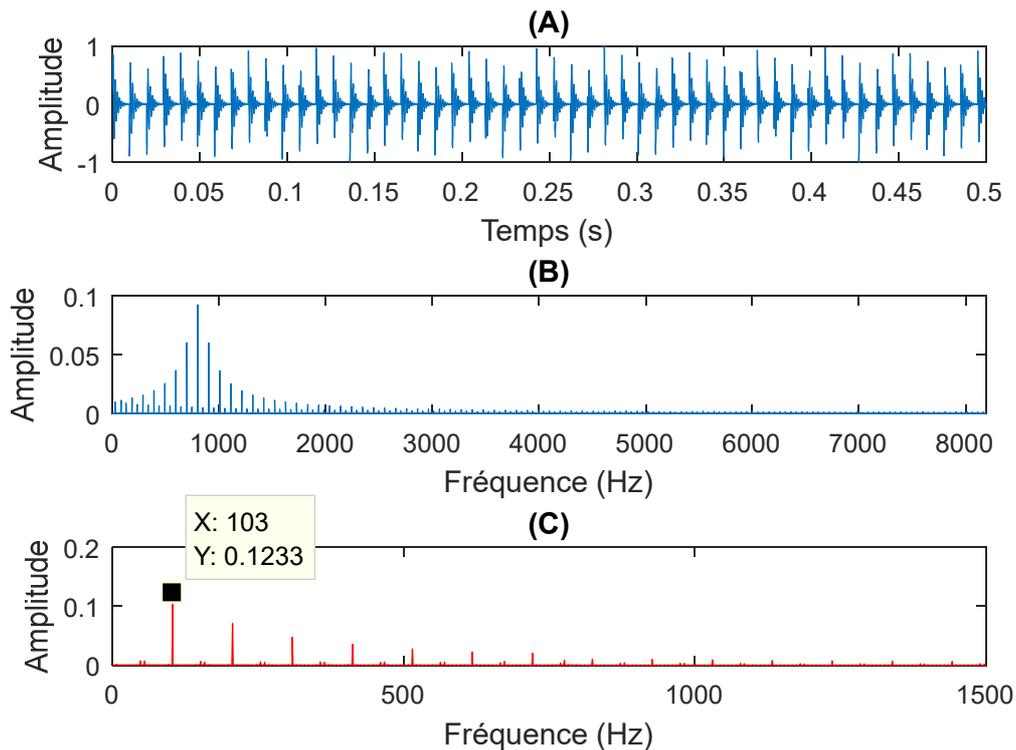


Figure (3.4) : (A) signal d'un défaut de roulement simulé, (B) spectre du signal simulé, (C) spectre de son enveloppe.

Sur la figure 3.4(A), il est montré le signal $s(t)$ dans le domaine temporel où l'on remarque des chocs espacés par des périodes de temps constantes ce qui correspond au défaut. Les figures 3.4(B) et 3.4(C) représentent le spectre de signal et le spectre de son enveloppe respectivement. Le spectre du signal montre une bande de raies spectrales autour de la

fréquence de résonance de la structure de la machine par rapport aux chocs répétitifs. Tandis que le spectre d'enveloppe donne la fréquence caractéristique de défaut 103 Hz et plusieurs de ses harmoniques (multiples). Ce qui indique que l'analyse d'enveloppe réussie très bien à déceler le défaut dans ce cas.

Les figure 3.5(A) et 3.5(B) montrent la RTF du même signal $s(t)$ traité avec les deux méthodes (la TO et la SST) respectivement.

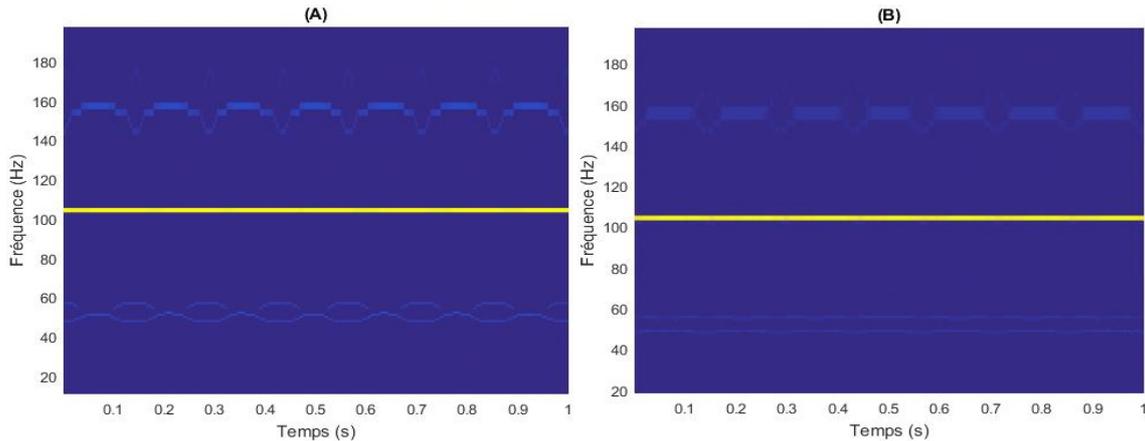


Figure (3.5) : TFR de signal $s(t)$: (A) transformée en ondelettes, (B) transformée SynchroSqueezing.

Le premier mode correspond à une raie à 103 Hz (égale à la fréquence du défaut), ceci signifie donc que le maximum d'énergie est associé à cette composante. Le défaut est donc mis clairement en évidence par ses deux méthodes. L'évolution de la fréquence au cours du temps peut être suivie avec grande facilité. Dans le cas présent, la fréquence reste constante tout au long de l'échantillon, ceci provient du fait que la vitesse ne varie pas au cours du temps.

4.3.2. Cas avec vitesse de rotation variable

Dans cette partie nous avons simulé le même signal $s(t)$ de roulement avec une vitesse de rotation variable $f_r = 4.3t^2 + 10t + 12$, d'où la variation de la fréquence de défaut :

$$f_d = 4.12f_r$$

Sur la figure 3.6(A) est représenté le signal $s(t)$ dans le domaine temporel où on remarque des chocs espacés par des périodes de temps différentes ce qui correspond au défaut et la vitesse de rotation qui varie. Les figures 3.6(B) et 3.6(C) représentent le spectre du signal et le spectre de son enveloppe respectivement. Il est clair que dans ce cas ce n'est plus facile de distinguer la fréquence caractéristique de défaut à cause de la variation de vitesse de rotation.

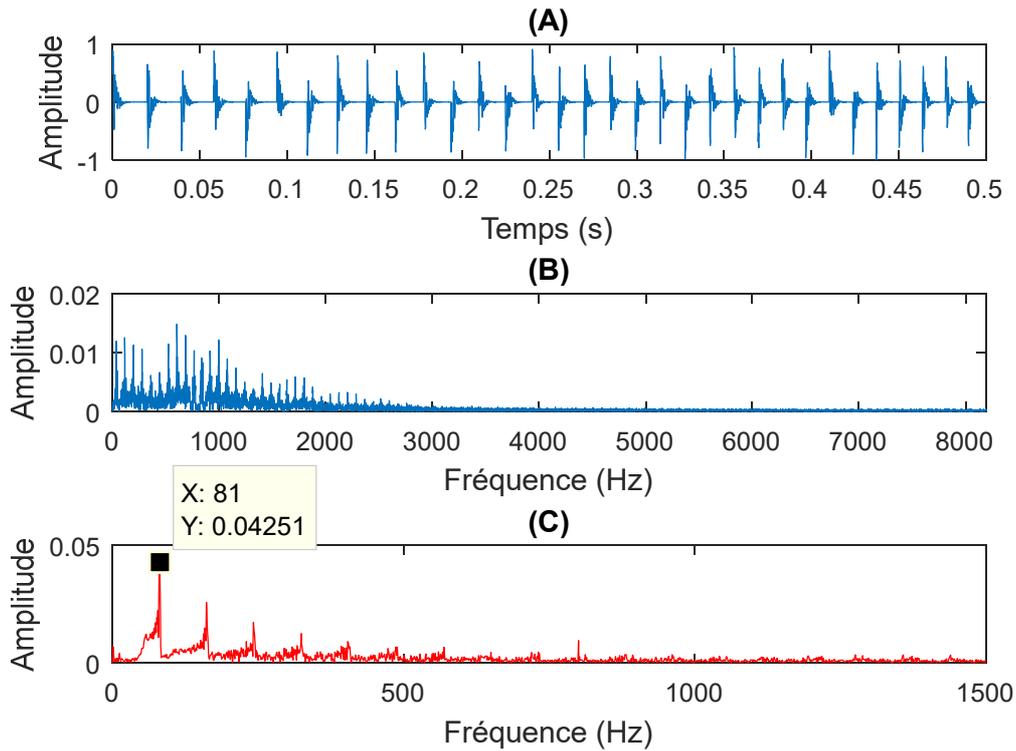


Figure (3.6) : (A) signal d'un défaut de roulement simulé, (B) spectre du signal simulé, (C) spectre de son enveloppe.

La figures 3.7 (A) et 3.8(B) montrent la RTF du signal $s(t)$ lors de la variation de vitesse et traité avec les deux méthodes TO et SST respectivement. On voit que la fréquence caractéristique de défaut de roulement varie et augmente au cours de temps entre deux fréquences 50 et 81 Hz.

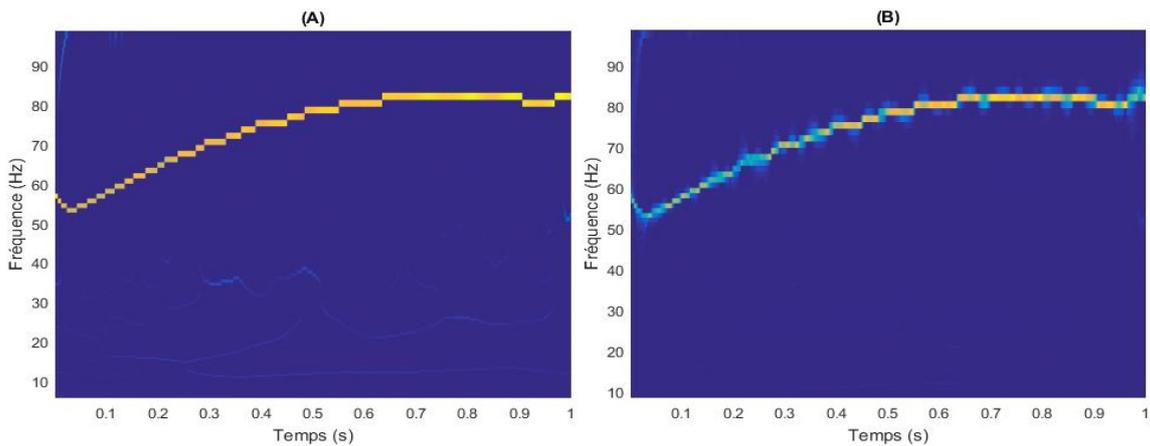


Figure (3.7) : TFR de signal $s(t)$: (A) transformée en ondelettes, (B) transformée SynchroSqueezing.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le comportement de la fréquence instantanée (FI) qui par définition suppose qu'à chaque instant il y a une seule et unique fréquence pour un signal mono-composante, et dans la première partie une approche permet en général une bonne estimation de ce signal avec la Transformé de Hilbert.

Après nous avons la représentation temps-fréquence du signal multi-composant traité avec les deux méthodes (Transformées en Ondelettes et SynchroSqueezing). Elles permettent de résoudre le problème de suivi de la fréquence instantanée sur le plan temps-fréquence.

Dans la deuxième partie nous avons vu le comportement de la fréquence instantanée d'un signal mesuré sur un palier à roulement avec défaut pour deux cas : avec une vitesse de rotation constante et variable.

Les deux méthodes TO et SST, décrites dans le but d'améliorer les représentations temps-fréquence et de pouvoir extraire les composantes existantes dans un signal et d'en choisir celles qui contiennent l'information recherchée, c'est-à-dire celles qui nous renseignent sur la fréquence caractéristique du défaut.

Chapitre IV

Application à la détection de défaut de roulement

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un suivi de l'état d'un roulement grâce à un banc d'essais dédié. Un roulement en tant qu'organe mécanique, sa fonction est de permettre la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. Il supporte et assure le guidage d'une charge tournante. L'application de l'analyse vibratoire permet de caractériser et de localiser les défauts dans les roulements et la capacité des méthodes proposées ici pour détecter la présence de défauts sur les roulements d'une façon précoce est évaluée par l'application sur les signaux réels selon la vitesse de rotation lorsqu'elle est constante ou variable dans le temps.

2. Bancs d'essai de l'ÉTS

Des signaux vibratoires utilisés dans cette partie pratique sont enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS de Montréal, représenté sur la (Fig.4.1). Il est constitué d'un arbre porté sur deux paliers à roulement et accouplé à un moteur électrique. Un disque comprenant un balourd est placé à l'autre extrémité de l'arbre comme charge radiale avec un ressort comme charge axiale. Les roulements utilisés sont à double rangée de billes (SKF, 1210 EKTN9). Les mesures ont été effectuées avec différents cas du roulement du palier T (test), normal ou avec un défaut de bague extérieure de différentes tailles. Tous les tests ont été déroulés avec une vitesse de rotation de l'ordre de 900 tr/min. Le système de collecte de données est composé par un accéléromètre référencé (352C34) qui est relié à l'analyseur PRO THOR (DT9837-13310) avec une fréquence d'échantillonnage de 48 000 Hz [6]. Les données de vibration ont été recueillies après par le collecteur Beta VIB.

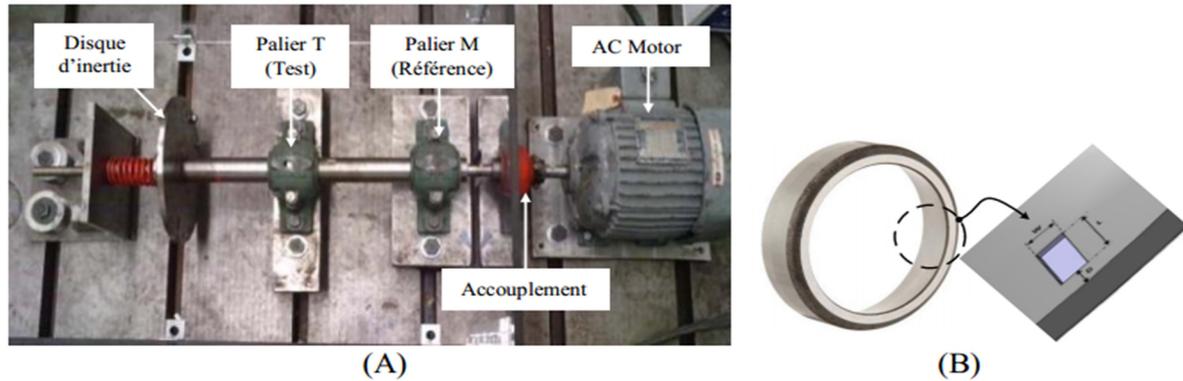


Figure (4.1) : (A) banc d'essai de l'ÉTS de Montréal, (B) défaut de bag extérieure de roulement

3. Cas où la vitesse de rotation est constante

3.1. Analyse en absence de défaut

Dans ce test, le signal mesuré sur le roulement de test qui est en bon état est traité par les quatre méthodes. Le signal, son spectre de Fourier, le spectre de son enveloppe sont affichés sur les Figures 4.2(A, B, et C) respectivement. Les Figures 4.2 (D et E) montrent la représentation sur le plan temps-fréquence du signal transformée par la TO et la SST respectivement. On constate que le spectre du signal ne détecte pas la présence du défaut puisqu'aucune information lié au défaut n'est indiquée. Sur le spectre d'enveloppe du signal, on constate l'apparition de pics d'amplitudes à la fréquence de rotation et quelques-uns de ces harmoniques, ce qu'explique l'absence de défaut.

Les deux représentations le plan T-F, nous donne un trait continu correspondant à la fréquence de rotation de 15Hz. Cela est expliqué par l'énergie du signal concentré sur la fréquence de rotation constante dans le temps. Le pic d'amplitude à la fréquence de rotation est lié aux vibrations naturelles créées par le mouvement de rotation de la machine.

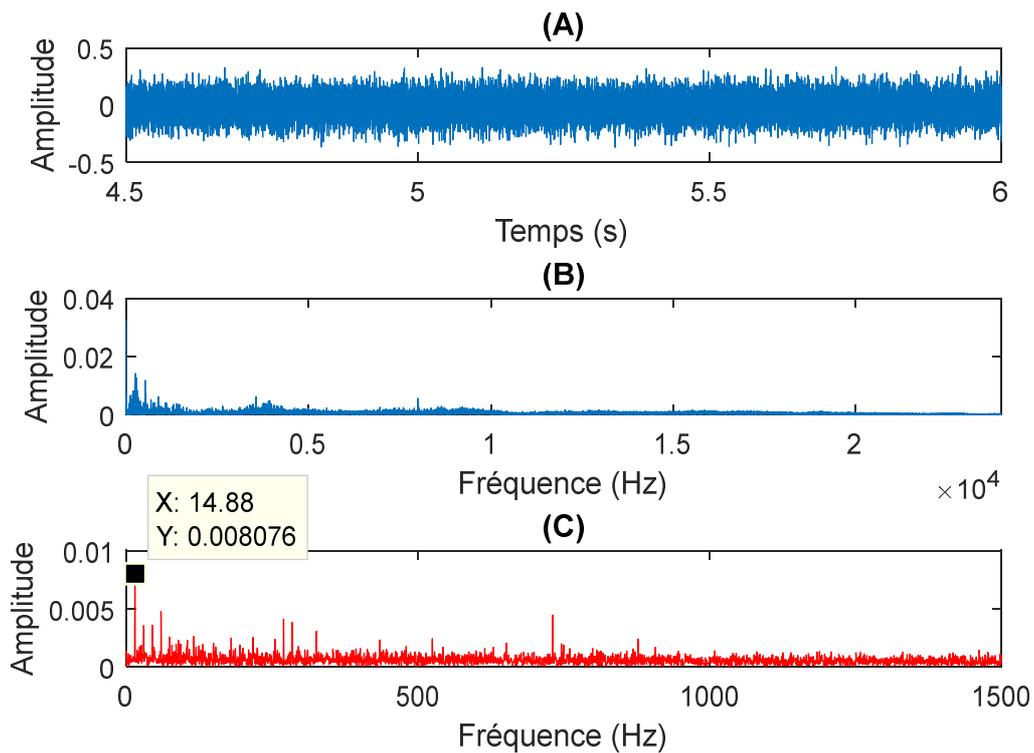


Figure (4.2) : Analyse spectrale du signal mesuré sur la machine avec une vitesse de rotation de 15 Hz en absence de défaut, (A) signal, (B) son spectre, et (C) spectre de son enveloppe

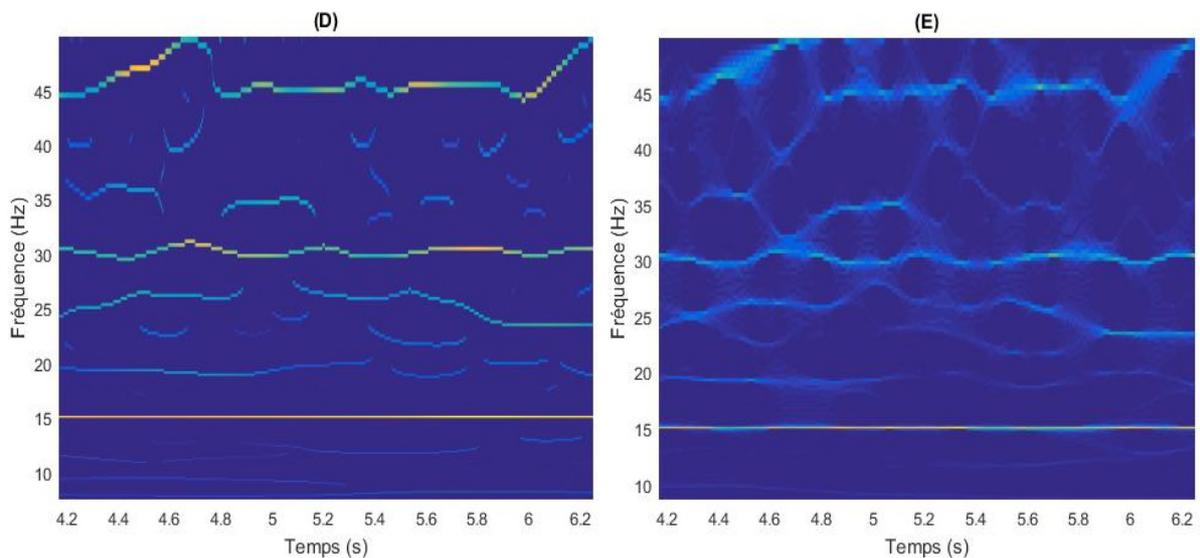


Figure (4.2) : TFR de signal : (D) transformée en ondelettes, (E) transformée Synchronizing

3.2. Analyse en présence de défaut

Dans ce test, le roulement sain dans le palier test est remplacé par un roulement ayant un défaut de bague externe et la mesure est effectuée à vitesse de rotation constante soit 15 Hz. Le signal, son spectre et le spectre de son enveloppe sont affichés sur les figures 4.3 (A, B et C) respectivement. Les figures 4.3 (D et E) est consacrée pour montrer les résultats du traitement

Chapitre IV : Application à la détection de défaut de roulement

du même signal en utilisant les deux transformées TO et SST. Toutefois, nous pouvons distinguer des harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut de roulement sur le spectre de l'enveloppe. Puisque nous constatons l'apparition des pics à la fréquence de 108.5Hz et ces harmoniques correspondant au défaut sur la bague extérieure.

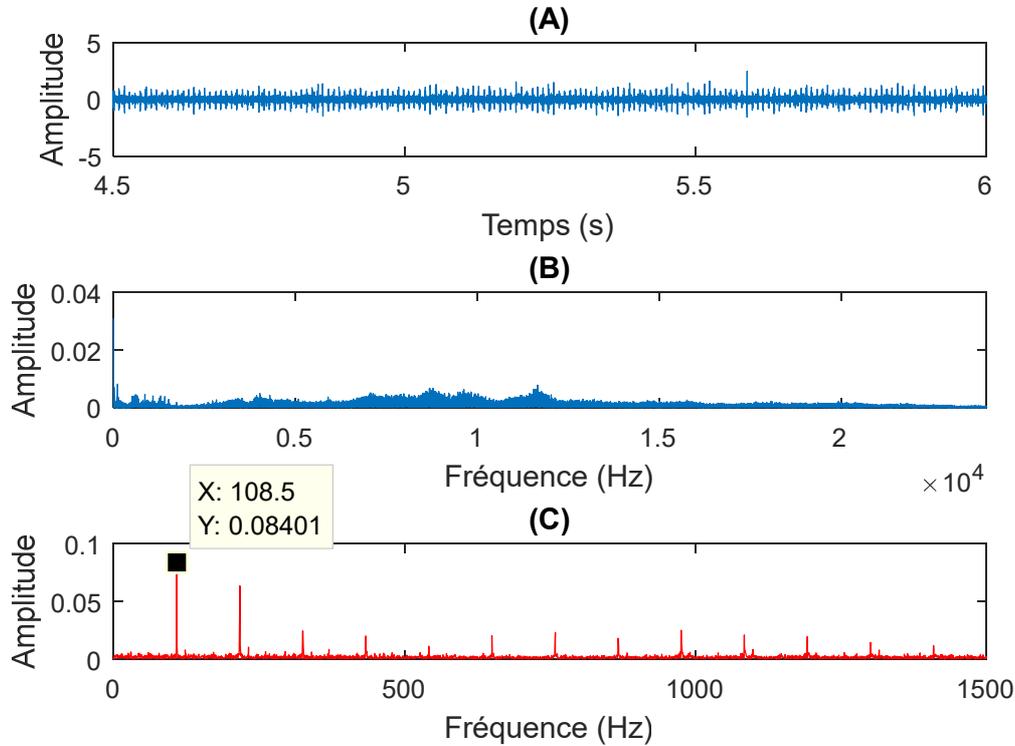


Figure (4.3) : Analyse spectrale du signal mesuré sur la machine avec une vitesse de rotation de 15 Hz en présence de défaut, (A) signal, (B) son spectre, et (C) spectre de son enveloppe

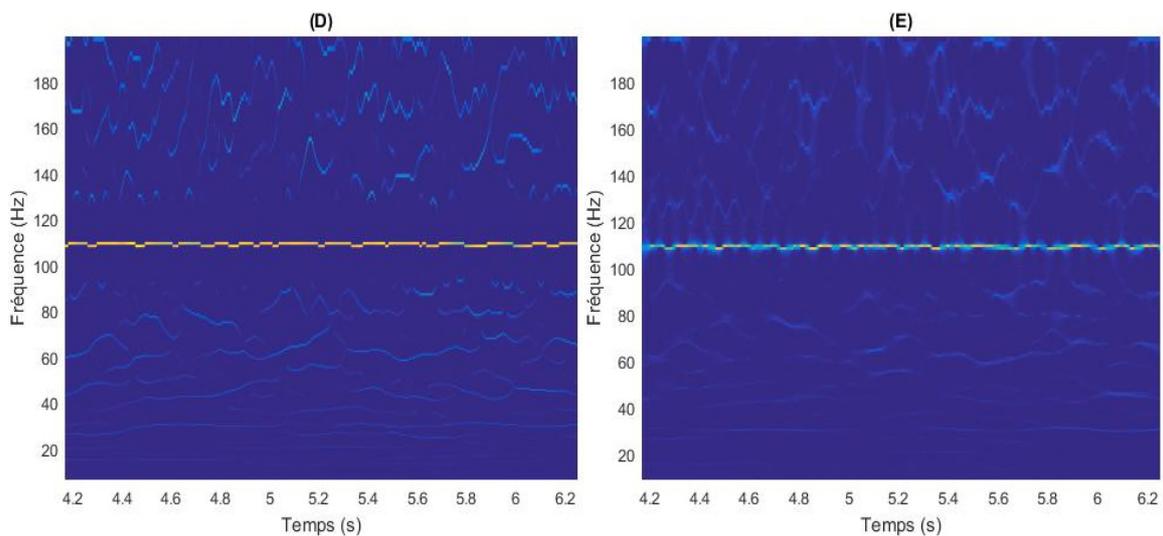


Figure (4.3) : TFR de signal : (D) transformée en ondelettes, (E) transformée Synchrosqueezing

Dans un côté, il est clair que la transformée Synchrosqueezing (SST) et la transformée en ondelettes (TO) engendrent des lignes bien plus concentrées dans le plan temps-fréquence qui

permet de lire clairement la fréquence caractéristique de roulement qui reste constante tout au long de temps de la mesure.

4. Cas où la vitesse de rotation est variable

4.1. Analyse au démarrage en présence de défaut

Dans cette partie on a mesuré le signal de vibration au démarrage progressif jusqu'à la fréquence de rotation de 20 Hz. Le signal, son spectre de signal et le spectre de son enveloppe sont affichés sur les figures 4.4(A, B et C) respectivement. Les figures (D et E) donnent la représentation en temps-fréquence obtenu par la transformée en ondelettes (TO) et la transformée Synchrosqueezing (SST) respectivement.

Ainsi, nous apercevons que l'analyse spectrale, par calcul du spectre de signal et le spectre de son enveloppe n'arrivent pas à détecter clairement la fréquence caractéristique de défaut de roulement. Tandis que les deux méthodes la TO et la SST montrent un trait correspondant à l'énergie du signal suivant l'augmentation de la fréquence du défaut engendrée par l'augmentation progressive de la vitesse de rotation. Ainsi, la variation périodique des chocs impulsifs créés par le défaut de roulement est ressentie instantanément.

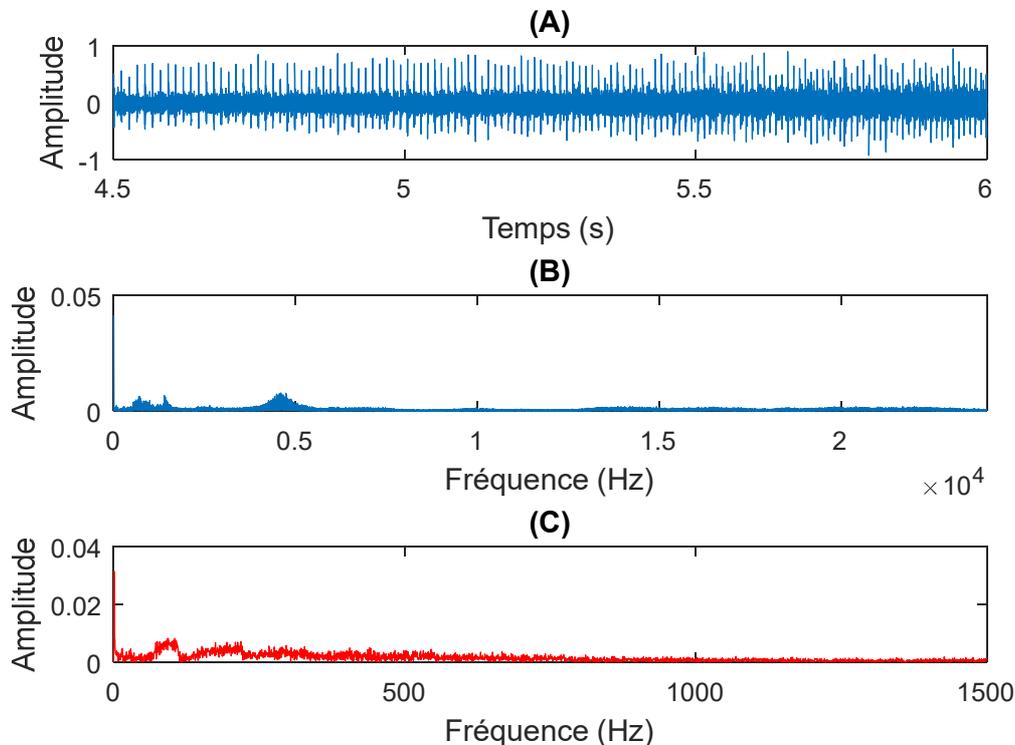


Figure (4.4) : Analyse spectrale du signal mesuré au démarrage progressif de la machine jusqu'à la vitesse de rotation 20 Hz en présence de défaut, (A) signal, (B) son spectre, et (C) spectre de son enveloppe

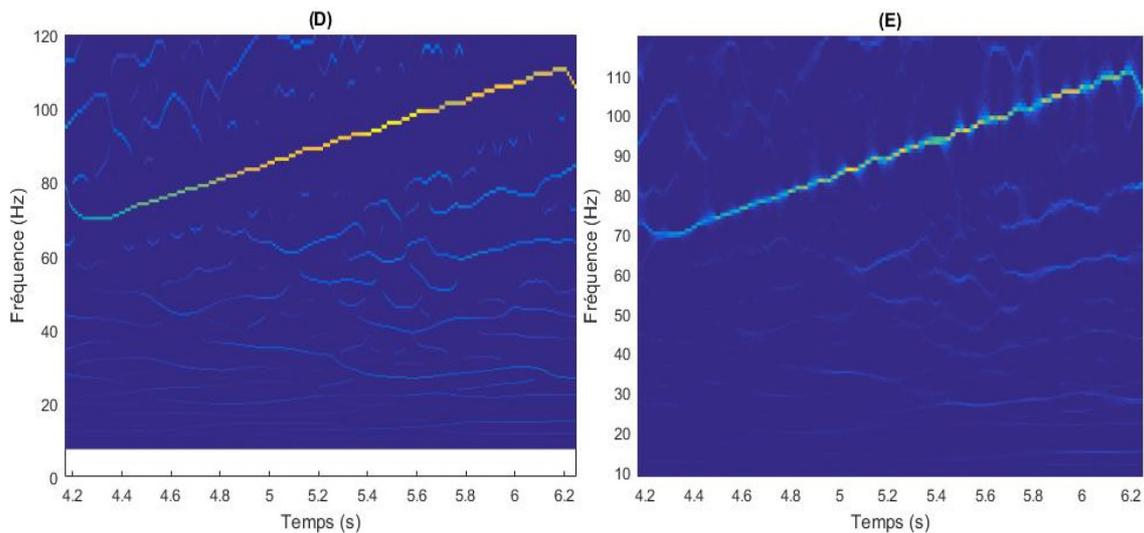


Figure (4.4) : TFR du signal : (D) transformée en ondelettes, (E) transformée Synchronosqueezing

4.2. Analyse à l'arrêt en présence de défaut

Dans cette dernière étape, le signal vibratoire est mesuré lors de l'arrêt de la machine qui tournait à partir fréquence de rotation 30 Hz jusqu'à l'arrêt total. Le signal, son spectre de signal et le spectre de son enveloppe sont affichés sur les figures 4.5(A, B et C) respectivement, et les figures 4.5(D et E) montrent la représentation TF obtenue par la transformée en ondelettes et la transformée Synchronosqueezing.

Le même constat que lors du démarrage progressif l'analyse spectrale par calcul du spectre du signal et de son enveloppe, il n'est pas aisé de repérer clairement la fréquence caractéristique du défaut de roulement.

Cependant, avec les deux autres méthodes, la transformée en ondelettes et la transformée Synchronosqueezing montrent bien l'évolution de la fréquence du défaut qui diminue en fonction du temps. Cela montre que la valeur de la fréquence du défaut diminue avec la diminution de la fréquence de rotation de la machine, et cela peut être suivi de manière instantanée.

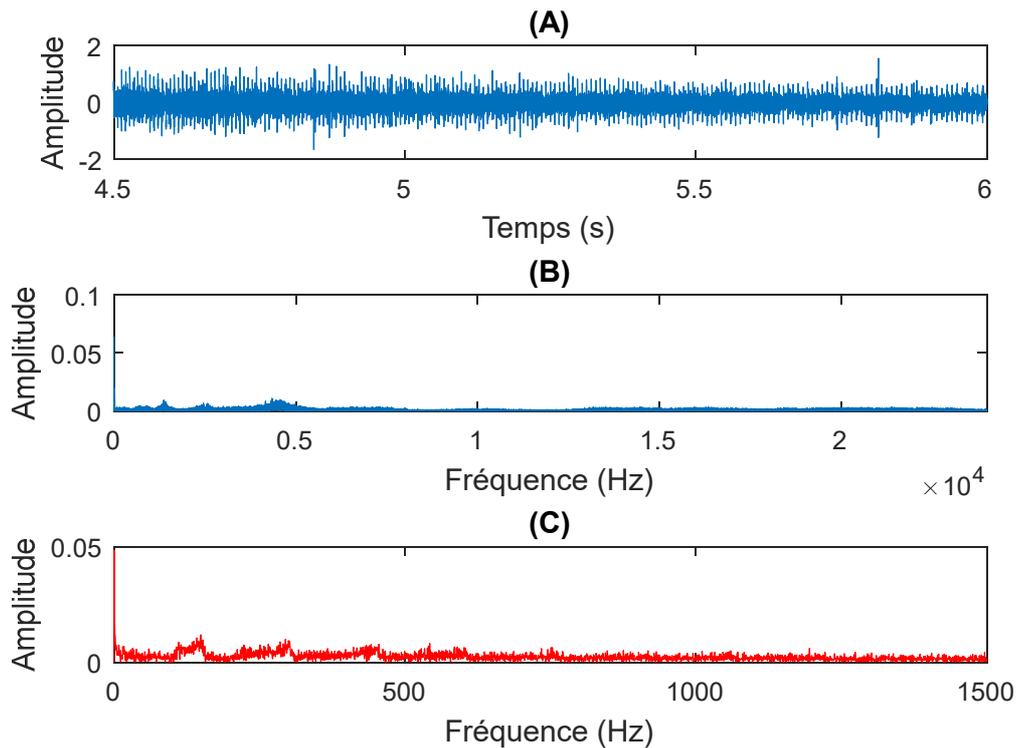


Figure (4.5) : Analyse spectrale du signal mesuré à l'arrêt progressif de la machine à partir de la vitesse de rotation de 30 Hz en présence de défaut, (A) signal, (B) son spectre, et (C) spectre de son enveloppe

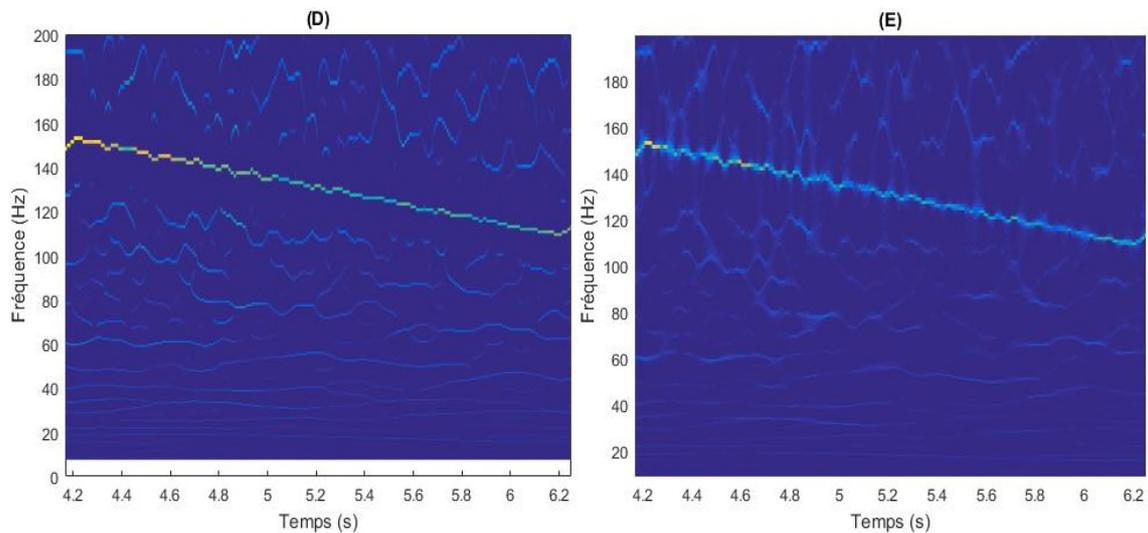


Figure (4.5) : TFR de signal : (D) transformée en ondelettes, (E) transformée Synchrosqueezing

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploité des mesures de signaux vibratoires pratiques afin de suivre l'état des roulements pour deux cas de vitesse de rotation, constante et variable, afin de détecter et caractériser les défauts. Ces signaux ont été obtenus sur le banc d'essai de l'ÉTS [6]. Dans le cas où la machine tourne à de basses vitesses, ce n'est pas évident de détecter un

Chapitre IV : Application à la détection de défaut de roulement

défaut de roulement surtout quand il s'agit d'un défaut naissant, ce qui est le cas étudié ici avec un défaut de l'ordre de 250 μm . Le défaut n'étant détectable qu'à un stade avancé de la dégradation, pourtant les approches proposées dans ce travail nous ont permis de bien suivre l'évolution instantanée de la fréquence de ce défaut.

Dans le cas de la vitesse de rotation constante, l'analyse d'enveloppe permet facilement de suivre l'état des roulements puisque la fréquence caractéristique du défaut reste constante pendant la période d'acquisition des signaux. Cependant, dans le cas de la vitesse de rotation variable, au démarrage ou à l'arrêt progressifs par exemple, la fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques varient pendant la période d'acquisition puisqu'elles dépendent de la vitesse de rotation.

Conclusion générale

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations ou de défaillances. Ces défauts influent sur la qualité du produit, et peuvent provoquer un arrêt immédiat d'une ou plusieurs machines. La plupart des techniques de diagnostic de défaut sont destinées à identifier les défauts d'une manière précise. Le diagnostic de défauts de ces machines s'appuie essentiellement sur la surveillance de symptômes liés à différentes conditions de dégradation. Ces symptômes peuvent être tirés et extraits de diverses sources d'informations, parmi lesquelles se trouve l'analyse vibratoire qui occupe une place prépondérante dans l'industrie. C'est dans cette démarche que nous nous sommes investis pour établir un diagnostic précoce de défaut de roulement qui un élément sensible dans une machine tournante. La proposition d'outils de traitement de signal était l'axe principal de cette étude qui consiste à suivre l'état des roulements pour différentes conditions de travail à savoir les variations de vitesse de rotation.

Pour aborder l'étude nous avons présenté, dans le premier chapitre, un état de l'art sur les différentes techniques utilisées pour l'analyse des signaux vibratoires. Cet état de l'art nous a permis d'avoir une direction de travail assez claire pour préparer les données nécessaires à la tâche de diagnostic. En plus, ce travail préliminaire permet de bien choisir les méthodes appropriées pour chaque type de défauts dans la partie expérimentale. En effet, certaines méthodes ne sont pas applicables à certains types de défauts et de conditions. Cette étape d'analyse constitue la première phase dans l'élaboration d'un système de diagnostic efficace.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes anomalies qui peuvent conduire à l'arrêt des machines tournante (rotor, stator et les roulements). Ensuite, nous avons étudié plusieurs signaux de mesures réelles qui décrivent les états de certains organes électromécaniques d'une machine asynchrone. L'analyse de ces signaux est effectuée par des outils classiques de traitement du signal vibratoire : calcul du spectre de Fourier et analyse d'enveloppe.

Dans le troisième chapitre, nous avons vu le comportement de la fréquence instantanée (FI) qui par définition suppose qu'à chaque instant il y a une seule et unique fréquence pour un signal quelconque, et dans la première partie plusieurs approches permettent en général une bonne estimation de ce signal avec la Transformé de Hilbert. Ainsi, pour des signaux multi-composante traité avec les deux méthodes ; Transformée en Ondelettes (TO) et Synchronosqueezing (SST) qui permettent de résoudre le problème de la variation de la fréquence

du défaut en représentant le signal dans le plan temps-fréquence. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons vu le comportement de la fréquence instantanée dans un signal qui simule un roulement avec défaut sur deux cas, avec une vitesse de rotation constante et variable et ce par son traitement avec les deux méthodes TO et SST.

Dans le dernier chapitre, nous avons d'abord présenté la base de données de vibrations enregistrées sur un banc d'essais de l'ÉTS (Montréal, Canada), lors de simulation de défaut de bague externe d'un roulement. D'abord, nous avons basé l'étude sur ces signaux en comparant les signaux enregistrés avec la vitesse de rotation constante et variable (démarrage et arrêt progressifs). Ensuite, nous avons traité ces signaux avec les techniques d'analyse présentées précédemment. Dans le cas de la vitesse de rotation constante, l'analyse d'enveloppe permet facilement de suivre l'état des roulements puisque la fréquence caractéristique du défaut reste constante pendant la période d'acquisition des signaux. Cependant, dans le cas de la vitesse de rotation variable, au démarrage ou à l'arrêt progressif par exemple, la fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques varient pendant la période d'acquisition puisqu'elles dépendent de la vitesse de rotation. Cela est mis en évidence par l'utilisation des deux méthodes de traitement du signal, la transformée des Ondelettes et la Synchronizing. La représentation du signal sur le plan temps-fréquence par ces deux méthodes permettent de résoudre le problème de « non stationnarité » et de « non périodicité », ainsi elles offrent une meilleure visibilité de la variation instantanée de la fréquence caractéristique du défaut dans le cas où la vitesse de rotation et/ou la charge sont variables pendant l'opération.

Références bibliographiques

- [1] O. Djebili “ Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des Composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de Contact De Roulement“ Thèse de doctorat, soutenue Le 26 Septembre 2013 à l’Université de Reims Champagne Ardenne.
- [2] I. Khelf, “Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l’intelligence artificielle” thèse de doctorat soutenue le 2013/1014 à l’université BADJ MOKHTAR – ANNABA.
- [3] Ziani Ridha “Contribution à l’analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques“, projet de fin d’études 2014/2015 à l’université Ferhat Abbas – Sétif l’institut d’optique et mécanique de précision.
- [4] C. Breneur. Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d’engrenages et de roulements. Thèse de Doctorat, INSA-Lyon, 2002.
- [5] Jean-Louis Lacoume mirepoix, Méthodes et Techniques De Traitement Du Signal 5ème Edition, le 4 aout 1995.
- [6] Y. IMAOUCHEN “ mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes” thèse doctorat soutenu le 24/11/2015 à l’université de Bejaia.
- [7] K. Mesaoudi et S. Slimani “ Outils D’analyse Et Diagnostic Des Défauts De Roulement Et D’engrenages” Mémoire Fin D’étude Soutenu Le 14/06/2015 à L’université De Bejaia.
- [8] S. Grubic, “A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, p. 4127-4136, 2008.
- [9] Toliyat, H.A., Lipo, T.A., "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 2, pp. 241– 247, Jun. 1995.

[10] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, and M. J. Roshtkhari, "Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4727–4739, 2009.

[11] Baptiste TRAJIN « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE. 2009.

[12] H. Sharabaty. « Diagnostic de somnolence d'un opérateur : analyse automatique des signaux physiologiques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2007.

[13] J-C. Cexus. « Analyse des signaux non-stationnaire par transformation de Huang, opérateur de Teager-Kaiser, et transformation de Huang-Teager (THT)», Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Décembre 2005.

[14] Maes S. Wastrum: wavelet derived generalized cepstrum, using the synchrosqueezed plane. In : Proc. Journées GdR TdSI, Temps-Fréquence, Ondelettes et Multirésolution, Lyon, 1994, pp. 27.1–27.4.

[15] Maes S., The synchrosqueezed representation yields a new reading of the wavelet transform. In: Proc. SPIE – Wavelet applications for Dual Use. – Orlando, 1995.

Résumé

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle de l'outil de production industrielle.

L'objectif de ce travail est étudié plusieurs signaux qui décrivent les états de défaillance de certains organes mécanique des machines tournantes. Apres nous avons basé l'étude sur ces signaux en comparant les signaux enregistrés avec la vitesse de rotation constante et variable

Pour atteindre cet objectif, présenter ce signal dans le plan temps-fréquence, avec les deux méthodes, Transformée en ondelettes (TO), et Transformée SynnchroSqueezinge (SST) ont été appliquées à l'analyse des signaux vibratoires simulés et réels de roulements sains et défectueux.

Vibration analysis is one of the means used to monitor the health of rotating machinery in operation. This is part of the conditional preventive maintenance of the industrial production tool.

The objective of this work is studied several signals which describe the states of failure of certain mechanical organs of the rotating machines. After we based the study on these signals by comparing the recorded signals with the constant and variable rotation speed

To achieve this objective, presenting this signal in the time-frequency plane, with the two methods, Wavelet Transform (TO), and SynnchroSqueezinge Transform (SST) were applied to the analysis of simulated and real vibratory signals of healthy bearings and defective.