

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 Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Thème

*Maintenance prédictive de l'état d'un groupe moteur-
engrenage-pompe*

Présenté par :

Mr.FEREDJ Houssem

Mr.LOUNICI Smail

Devant le jury composé de :

Président Mr AMRI. A

Encadreur Mr IMAOUCHEN Yacine

Examineur Mr AIT MOKHTAR

Année Universitaire 2018/2019

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, ces conseils, et sa disponibilité à tout moment de besoin d'orientation.*

Toutes nos reconnaissances pour vous.

Aux membres de jury, pour accepter 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.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

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

A mes frères : Yassine, Sofiane, Ramdane, Billal.

A ma sœur : fayza.

Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (Islem, Hichem bouchaar, milate, Fateh amalal, Djalal, Zako, Papou et les résidents de Bloc H) et à mon cher ami Nadjim et toute la promotion 2018/2019, Electromécanique.

L.Smail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

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

A mes frères : Nadjib et Lamine

A mes soeurs

A mes neveux : moumouh, ghilas et melissa

A toute la famille FEREDJ et A toute mes amis

A toute la promotion 2018/2019, Électromécanique.

F. Housseem

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Constituantes et défaillances d'une machine tournante

Introduction	3
---------------------------	----------

1. Les machines tournantes	3
---	----------

1.1. Définitions générales	3
----------------------------------	---

1.2. Le rotor	4
---------------------	---

1.3. La structure	4
-------------------------	---

1.4. Les liaisons	4
-------------------------	---

2. Eléments constitutif de groupe moteur pompe réducteur	5
---	----------

2.1. Moteur	5
-------------------	---

2.2. Pompe	6
------------------	---

2.2.1. Définition	6
-------------------------	---

2.2.2. Les éléments constitutifs	6
--	---

2.3. Réducteur	7
----------------------	---

2.3.1. Définition	7
-------------------------	---

2.3.2. Les différents types de réducteurs	7
---	---

3. Défaillance des machines tournantes	7
---	----------

3.1. Définition de la défaillance selon NF X 06-501	7
---	---

3.2. Degrée de la défaillance	8
-------------------------------------	---

Conclusion	9
-------------------------	----------

Chapitre II : Défaillances des machines tournantes

Introduction	10
---------------------------	-----------

1. Défaillances des machines tournantes	10
--	-----------

1.1. Les défauts des engrenages	11
---------------------------------------	----

1.1.1. Défauts généralisés	11
----------------------------------	----

1.1.2. Défauts localisés	12
1.2. Roulement	13
1.3. Arbres	15
1.3.1. Balourd d'origine mécanique	16
1.3.2 Balourd d'origine thermique	16
1.4. Accouplement	16
2. Autres défaillances	17
2.1. Défaillances des courroies	17
2.2. Défaillance Au stator	17
2.3. Défaillance Au rotor	18
Conclusion	20

Chapitre III : Diagnostic par l'analyse vibratoire

Introduction	21
1. L'analyse vibratoire	21
1.1. Définition	21
1.2. Objectif de l'analyse vibratoire	21
2. Méthodes d'analyse des vibrations	22
2.1. Analyse dans le domaine de temps	22
2.1.1. Les indicateurs classiques	22
2.1.2. Les indicateurs modernes	23
2.2. Analyse dans le domaine fréquentiel	24
2.2.1. Analyse spectrale	24
2.2.2. La transformée de Fourier	24
2.2.3. Analyse d'enveloppe	25
2.2.4. Analyse cepstrale	26
2.3. Analyse dans le domaine temps-fréquence	27
2.3.1. Analyse temps-fréquence	27
2.3.2. En se basant sur la STFT	27
2.3.3. En se basant sur les ondelettes	27

3. Simulation de quelques signaux vibratoires	29
3.1. Simulation d'une somme de signaux sinusoïdaux	29
3.2. Simulation de signal modulé en amplitude	30
3.3. Simulation de signal de roulement	31
3.4. Simulation de signal engrenage	33
Conclusion	34

Chapitre IV : Diagnostic vibratoire des machines tournantes

(Moteur, pompe et engrenage)

Introduction	35
1. Diagnostic défaut moteur	35
1.1. Description de la machine étudiée	35
1.2. Diagnostic des défaillances au Stator	36
1.2.1. Machine saine (sans défaut)	36
1.2.2. Court-circuit d'un certain nombre de spires	37
1.2.3. Analyse spectrale	37
1.3. Diagnostic des défaillances au rotor (cas de barre cassée)	38
1.3.1 Analyse spectrale	38
1.4. Comparaison des trois spectres des signaux de mesures	39
2. Diagnostic des défauts mécaniques (roulement et engrenage)	39
2.1. Défaut roulement	39
2.1.1. Bancs d'essai de l'ÉTS	39
2.1.2. Analyse en présence de défaut	40
2.2. Défaut engrenage	41
2.2.1. Banc d'essai du CETIM	41
2.2.2. Cas sans défaut	42
2.2.3. Cas avec défaut	42
2.2.4. Comparaison des spectres résultants	44

3. Diagnostic spectral d'une pompe centrifuge sans défaut	44
3.1. Description de la pompe centrifuge étudiée	44
3.2. Le spectre fréquentiel des organes mesurés sur une pompe	45
Conclusion	48
Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Localisation des défauts dans les systèmes de transmissions à engrenage [8]
..... 10

Tableau (IV.1) : Paramètre des tests et de la machine utilisée 36

Tableau (IV.2). Les défaillances électriques simulées sur la machine asynchrone 37

Tableau (IV.3) : Rapport hebdomadaire sur les tests de fatigue à CETIM [22] 42

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1) : Eléments d'une machine tournante [1] 3
Figure (I.2) : Vue éclaté de la machine asynchrone [2] 5
Figure (I.3) : Pompe (vue ouverte) [14] 6
Figure (I.4) : Photo d'un réducteur cylindro-conique [5] 7
Figure (I.5) : Dégradation du bien et durée de vie [6] 9

Chapitre II

Figure (II.1) : Différents types d'engrenage [9] 11
Figure (II.2) : Usure abrasive « engrenage » [8] 12
Figure (II.3) : Pitting ou piqûres « engrenage » [8] 12
Figure (II.4) : Écaillage ou spalling [8] 13
Figure (II.5) : Fissuration ou cracks « engrenage » [8] 13
Figure (II.6) : Grippage « engrenage » [8] 13
Figure (II.7) : Différents types de roulements [8] 13
Figure (II.8) : Quelques défaillances affectants les roulements [8] 15
Figure (II.9) : Défaut de courroie « Partie arrachée » [10] 17
Figure (II.10) : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone [11] 18
Figure (II.11) : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil [12] 19
Figure (II.12) : Types d'excentricité [13] 20

Chapitre III

Figure (III.1) : principe de calcul de l'enveloppe [19] 26
Figure (III.2) : (a) représenté le signal $S(t)$, (b) spectres de signal $S(t)$, (c) analyse d'enveloppe du signal et (d) spectre d'analyse d'enveloppe 29
Figure (III.3) : (a) signal modulé en amplitude et (b) son spectre le signal 30
Figure (III.4) : (a) signal et son enveloppe, (b) le spectre d'enveloppe de signal 31
Figure (III.5) : (a) signal roulement $Xr(t)$, (b) spectre du signal simulé, (c) spectre de son enveloppe, (d) signal d'enveloppe 32
Figure (III.6) : (a) signal engrenage $e(t)$, (b) spectre du signal, (c) spectre de son enveloppe, (d) signal enveloppe de $Xe(t)$ 33

Chapitre IV

Figure (IV.1) : Machine asynchrone utilisée 35

Figure (IV.2) : Analyse fréquentielle du signal sans défaut cc : (a) spectre de signal, (b) spectre d'enveloppe 37

Figure (IV.3) : Analyse fréquentielle du signal avec défaut de court-circuit : (a) spectre du signal, (b) spectre d'enveloppe 38

Figure (IV.4) : (a) Spectre du signal mesuré sur la machine avec une barre cassée au rotor, et (b) spectre d'enveloppe de ce signal 39

Figure (IV.5) : (A) Banc d'essai ÉTS de Montréal, (B) Défaut de bague extérieure du roulement [21] 40

Figure (IV.6) : Analyse spectrale du signal mesuré sur la machine en présence de défaut, (a) signal, (b) son spectre, (c) spectre de son enveloppe et (d) le zoom du spectre (c) 41

Figure (IV.7) : Photos d'une roue du banc du CETIM ;(A) sans défaut, et (B) avec défaut [22]41

Figure (IV.8) : Signal mesuré à l'absence de défaut : (a) signal, (b) son spectre et (c) spectre de son enveloppe 43

Figure (IV.9) : Signal mesuré dans le cas de défaut : (a) signal, (b) son spectre, (c) spectre de signal avec zoom, (d) spectre d'enveloppe et (e) zoom du spectre d'enveloppe 43

Figure (IV.10). Points de mesure des signaux vibratoires sur la pompe [23]..... 44

Figure (IV.11) : Analyse spectrale du signal mesuré au côté moteur (#1) : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre 46

Figure (IV.12) : Analyse spectrale du signal (#2) mesuré à l'entrée de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre 46

Figure (IV.13) : Analyse spectrale du signal (#3) mesuré à la sortie de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre 47

Figure (IV.14) : Analyse spectrale du signal (#4) mesuré sur la volute de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre 47

Liste des abréviations

AMRO : L'Analyse Multi Résolution en Ondelette.

FFT : La Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform).

Fc : Facteur Crête.

HHT : la Transformation de Huang-Hilbert.

RMS : Root Mean Square ou Valeur Efficace.

TFCT, STFT: Transformée de Fourier à Courte Terme (short-time Fourier transform).

TF : La transformée de Fourier.

TFFG : Transformée de Fourier à Fenêtre glissante.

TH : la transformée de Hilbert.

THT : la Transformation de Huang-Teager.

TO : La transformée d'ondelette.

TOC : La transformée en ondelettes continue.

TOD : Transformée en ondelettes Discrète.

WT : wavelet transform.

WVD : Wigner-Ville distribution.

Introduction générale

Les machines tournantes se composent d'ensemble d'organe combiné destinés à transformer une énergie ou à transmettre un mouvement. Les aspects diagnostic et détection de défaut de ces organes font partie intégrante et requièrent la mise au point de techniques de mesure, d'acquisition, d'analyse et d'aide à la décision. Le succès de ces techniques passe nécessairement par une bonne connaissance de la machine ainsi que de son comportement en présence d'un défaut interne.

La maintenance optimale des machines tournantes en fonctionnement a une importance vitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie de ces machines. Les différentes méthodes de surveillance sont : l'analyse des huiles, l'analyse de température, l'analyse vibratoire, ...etc. L'analyse vibratoire est la technique la plus utilisée pour réaliser une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts de différentes origines (mécanique, électrique, hydraulique...etc.). Ces travaux de maintenance ont une importance capitale du point de vue économique, ils permettent de passer d'une maintenance systématique à une maintenance conditionnelle plus efficace. L'analyse vibratoire est utilisée pour prévoir et détecter les pannes des équipements (maintenance préventive conditionnelle). Cette méthode est riche en information et son objectif principal est d'éviter les pannes des machines tournantes.

L'objectif de ce projet est d'implémenter des méthodes de diagnostic de pannes, basées sur le traitement du signal et l'analyse vibratoire pour la surveillance des machines tournantes. Le travail est organisé en quatre chapitres.

Nous consacrons le premier chapitre à des constituantes principales ainsi les différents cas et degrés de défaillances des machines tournantes (groupe moteur, pompe et réducteur).

Le deuxième chapitre mentionne quelques-uns des organes les plus importants et les plus courants dans les machines tournantes, ainsi que les plus importantes défaillances qui peuvent les atteindre (engrenage, roulement, arbre, stator, rotor...).

Le troisième chapitre rappelle les principales méthodes de traitement des signaux vibratoires utilisé dans la détection des défauts dans les machines tournantes dans les trois domaines temporels, fréquentiel et temps-fréquence ainsi les techniques d'exploitations. Ensuite, il présentera une étude sur des signaux simulés sur MATLAB qui reflètent le mouvement vibratoire de quelques éléments mécaniques (engrenage, roulement).

Pour finir, le quatrième chapitre exhibe les résultats obtenus lors d'exploitation des méthodes d'analyse présentés dans les chapitres précédents. Cela concerne plusieurs signaux de mesures réelles qui décrivent les états de certains organes électromécaniques d'une machine tournantes. 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.

Chapitre I

Constituantes et défaillances d'une machine tournante

(Moteur, pompe et engrenage)

Introduction

Malgré l'accélération technologique surtout dans le domaine industriel, les machines tournantes conservent toujours leurs places et leur poids dans les installations. Et pour cela il faut développer et améliorer la fonctionnalité et la capacité de prévision des défauts pour éviter de causer des arrêts non programmés sur notre machine ce qui est synonyme de perte de productivité. Cette connaissance permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine et d'éliminer les éventuels défauts et par conséquent d'augmenter la durée de vie des machines et d'assurer leur régularité de fonctionnement, dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux différents types de défaillances pouvant se passer au niveau des machines tournantes après avoir constitution de ces machines.

1. Les machines tournantes

1.1. Définitions générales

« Une machine est un ensemble des pièces mécaniques, hydrauliques ou électriques concourant à exercer une ou plusieurs fonctions données et, en particulier, l'application d'une force modulée ou non, destinée à vaincre une résistance ou à assurer un mouvement avec ou sans transmission de Force ».

Les machines tournantes sont des systèmes dans lesquels on peut distinguer : un rotor, une structure et des liaisons [1].

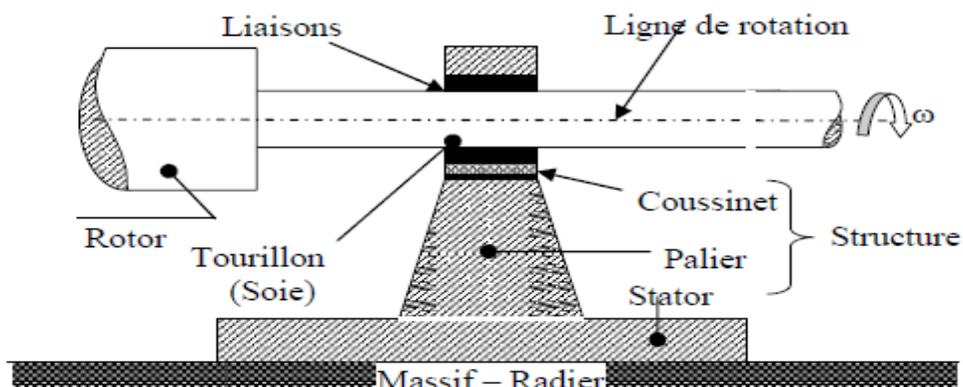


Figure (I.1) : Eléments d'une machine tournante. [1]

1.2. Le rotor

Est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation définie en fonction de l'état mécanique de ce dernier, en général distincte d'un axe (ligne droite).

Le rotor fabriqué avec plusieurs matériaux (acier, cuivre, bois, plastique...) réalise une Fonction bien définie :

(Manipulation fluide, de solide, parcours dans un champ électromagnétique...etc.) [1].

1.3. La structure

La structure non rotative comprend les éléments essentiels suivants :

- **Les coussinets** : ils sont de faible dimension au droit des tourillons des rotors. Des bagues, Peuvent être substituées aux coussinets (roulements).
- **Les paliers** : relient les coussinets (bagues) au stator.
- **Le stator** : (enveloppe de la machine) il contient les éléments essentiels, à savoir les circuits Magnétiques dans les machines électriques, les ailettes pour les turbomachines.
- **Le massif** : il peut prendre des formes beaucoup plus variées que celles des systèmes Terrestres.

Dont les massifs sont liés au radier.

- **Le radier** : c'est un élément spécifique au système. Il assure la liaison entre le massif et le sol et a pour mission de diminuer les pressions exercées au sol dans des limites acceptables.

C'est par lui que les séismes perturbent les machines tournantes [1].

1.4. Les liaisons

Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage des rotors.

Les liaisons sont classées dans trois ensembles : à fluide, à roulements, magnétique.

- **Les liaisons fluides** : ce sont les paliers lisses, en fait c'est l'huile de lubrification qui Constitue la liaison entre le rotor et le coussinet. Pendant le fonctionnement, des rotors montés sur des paliers lisses, c'est à l'huile de lubrification (de grande viscosité) d'apporter plus d'amortissement indispensable au fonctionnement tranquille des machines tournantes.
- **Les liaisons à roulements** : la bague intérieure est montée sur le rotor et la bague extérieure. Dans le palier la liaison s'organise par un épilâmes entre les billes et les bagues figure (I.2) [1].

- **Les liaisons magnétiques** : sont utilisées dans les machines-outils, les machines des satellites, celles de la médecine, les volants d'inertie embarqués pour la restitution d'énergie.

2. Eléments constitutif de groupe moteur pompe réducteur

2.1. Moteur

La fonction de ce système est d'assurer la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique avec un niveau de performances donné. Si la fonction de ce système n'est plus assurée, avec ces performances, suite à un incident quelconque, le système est alors jugé défaillant [2].

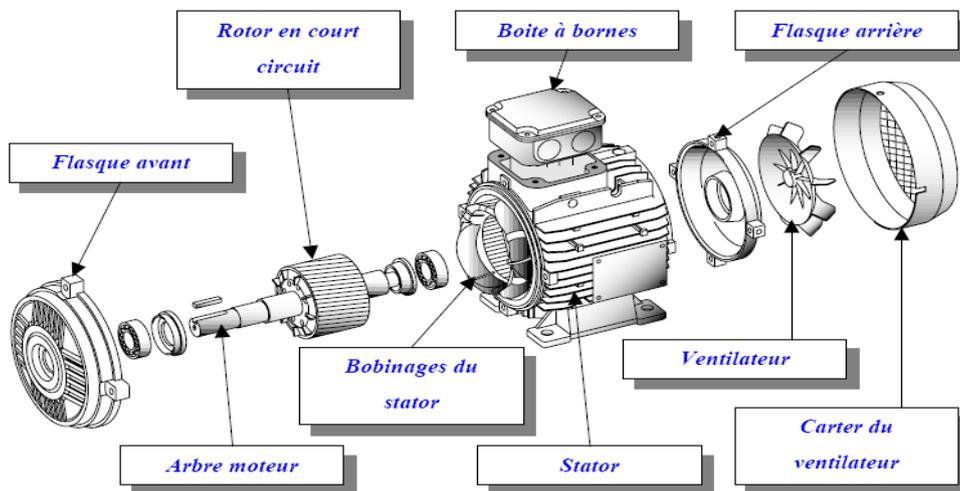


Figure (I.3) : Vue éclatée de la machine asynchrone [2].

- **Le stator** : c'est la partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique. Il se compose de quatre éléments : Carter, Boite à bornes, Conducteurs et circuit magnétique [2].
- **Le rotor** : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique. On distingue deux types de rotor à cage d'écureuil et rotor bobiné. Il est composé de cinq éléments : Ventilateur, Paliers, Conducteurs, Arbre et Circuit magnétique [2].

2.2. Pompe

Dans notre cas, nous choisir la pompe centrifuge :

2.2.1. Définition

La pompe centrifuge est une machine tournante qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge le liquide à la périphérie sur la volute figure (I.4). A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice [3].

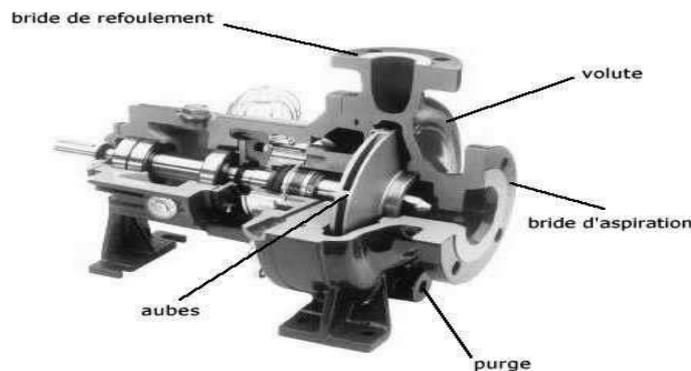


Figure (I.4) : Pompe (vue ouverte) [14].

2.2.2. Les éléments constitutifs

Les pompes centrifuges sont de construction très simple en version de base, elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute [4].

Ces machines se composent donc :

- D'un distributeur.
- D'une roue.
- Tubulure de refoulement.
- Collecteur à volute.
- Anneaux d'usure.
- D'un corps de pompe.
- Tubulure d'aspiration.
- Système Étanchéité.
- Arbre et chemises.
- Coussinets.

2.3. Réducteur

2.3.1. Définition

Le réducteur est un ensemble d'organes mécaniques comprenant un générateur de puissance

(moteur), des engrenages, des mécanismes entraînés (accouplements, frein), des structures servant de support (arbres, paliers) généralement incorporés dans un carter. Chacun des composants influe sur le comportement dynamique du réducteur [5].



Figure (I.5) : Photo d'un réducteur cylindro-conique [5].

2.3.2. Les différents types de réducteurs

On trouve trois types de réducteurs :

- Les réducteurs à train d'engrenage ordinaire
- Les réducteurs poulies / courroies
- Train épicycloïdal [5].

3. Défaillance des machines tournantes

3.1. Définition de la défaillance selon NF X 06-501

C'est la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. L'ensemble est indisponible Suite à la défaillance [6].

3.2. Degré de la défaillance

a) En fonction de la rapidité de la manifestation

- **Défaillance progressive** : défaillance qui aurait pu être prévue par un examen ou une surveillance.
- **Défaillance soudaine** : défaillance qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance.

b) En fonction du degré d'importance

- **Défaillance partielle** : défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.
- **Défaillance complète** : défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.
- **Défaillance intermittente** : défaillance d'un dispositif pour une période de temps limité, après laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir la fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure. De telles défaillances sont souvent répétitives.

c) Par combinaison des concepts précédents

- **Défaillance catalectique** : défaillance à la fois soudaine et complète.
- **Défaillance par dégradation** : défaillance à la fois progressive et partielle à la longue de telles défaillances peuvent devenir de défaillances complètes.

d) En fonction des causes

- **Défaillance due à une faiblesse inhérente** : défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données du Dispositif (faiblesse due à la conception ou à la réalisation du dispositif).
- **Défaillance due à un mauvais emploi** : défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du dispositif.
- **Défaillance première** : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif.
- **Défaillance seconde** : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre dispositif [7].

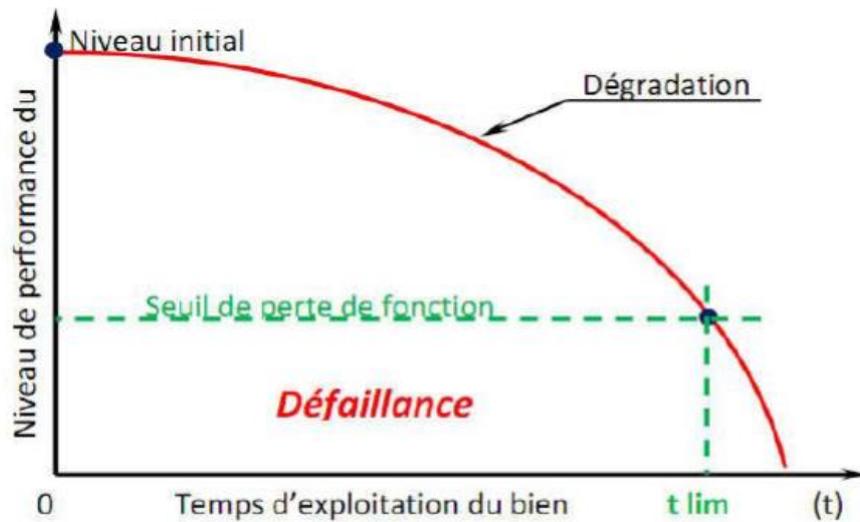


Figure (I.6) : Dégradation du bien et durée de vie [6].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons identifié les principaux éléments de constitution ainsi les différents cas et degrés de défaillances des machines tournantes (groupe moteur, pompe et réducteur).

Il apparaît que le dysfonctionnement d'une machine tel que les vibrations, la température, les déformations et bruit revient à la défaillance de l'un ou plusieurs pièces de sa constitution et sur cette lancée que nous nous intéressés lesquelles on reviendra plus en détail dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Défaillances des machines tournantes

Introduction

Les machines tournantes jouent un rôle vital dans la production. Pour éviter des arrêts de production, il faut surveiller en permanence ces équipements et “traquer” tous les signes précurseurs de défauts avant qu’il ne soit trop tard. Pour cela, il existe une grande variété de techniques d’analyse. L’analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu’elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d’apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d’alignement, un roulement usé ou endommagé...

Dans ce qui suit nous allons voir quelques-uns des organes les plus importants et les plus courants dans les machines tournantes, ainsi que les plus importantes défaillances qui peuvent les atteindre.

1. Défaillances des machines tournantes

Une machine tournante n’est en faite qu’un jeu de mécanismes mobiles entre eux, et d’organes combinés dans le but d’effectuer une tâche précise, transformer une énergie, transmettre un mouvement . . . etc. Une panne dans une machine tournante n’est que la résultante d’une avarie ou d’une suite d’avarie sur l’un ou plusieurs de ses organes. Les statistiques montrées dans le tableau II.1 expriment les causes de défaillances et les localisations de défauts dans les systèmes de transmission de puissances par engrenage. [8]

Localisation des défauts	Pourcentage
Denture	60
Paliers	19
Arbres	10
Carters	7
Autres	4

Tab (II.1) : Localisation des défauts dans les systèmes de transmissions à engrenage. [8]

1.1. Les défauts des engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (figure II.1) :

- Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont par parallèles).
- Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque). [9]



Figure (II.1) : Différents types d'engrenage. [9]

On distingue principalement deux catégories de défauts pouvant atteindre un jeux d'engrenage, les défauts généralisés et localisés.

1.1.1. Défauts généralisés

a) Usure abrasive : Phénomène présent sur une grande partie de la denture se caractérisant par un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces en contact. Le développement de cette usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. Elle peut être normale, inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et progressant lentement, ou anormale lorsque le lubrifiant est pollué de particules abrasives ou corrosives. Elle conduit à un mauvais fonctionnement voir à une mise hors service.

b) Pitting ou piqûres : Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents. Se produisant surtout sur des engrenages en acier de construction relativement dur. Cette avarie peut apparaître à la suite de légers désalignements d'axes par exemple, à cause de surpressions locales.



Figure (II.2) : Usure abrasive « engrenage ». Figure (II.3) : Pitting ou piqûres « engrenage ».

[8]

1.1.2. Défaits localisés

a) **Écaillage** : Se manifestant par des trous moins nombreux que ceux du pitting, mais plus Profonds et plus étendus. Les dégradations sont produites par fatigue en sous-couche, au point de cisaillement maximal. Ce phénomène rencontré le plus souvent dans les engrenages Cémentés, évolue très rapidement vers la rupture, sans passer par une phase d'usure.

b) **Fissuration** : Généralement au pied de la dent, elle progresse à chaque mise en charge. Son apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent, du côté de la dent en traction.

c) **Grippage** : Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures. Le grippage est favorisé essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact.

[8]



Figure (II.4) : Écaillage ou spalling.



Figure (II.5) : Fissuration ou cracks « engrenage ».



Figure (II.6) : Grippage « engrenage ». [8]

1.2. Roulement

Le roulement, organe de base pouvant assurer à lui seul plusieurs fonctions parmi lesquelles la liaison mobile en rotation avec un minimum de frottement entre deux éléments, tout en supportant des charges radiales ou axiales plus ou moins importantes, il peut être aussi utilisé pour assurer un positionnement précis de l'arbre, et corriger des défauts d'alignement. Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques, une bague intérieure et une bague extérieure, comportant des chemins de roulement.
- Des corps roulants, billes, rouleaux ou aiguilles, permettant la rotation des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les éléments roulants.

Les principaux types de roulements sont illustrés dans la figure II.7.

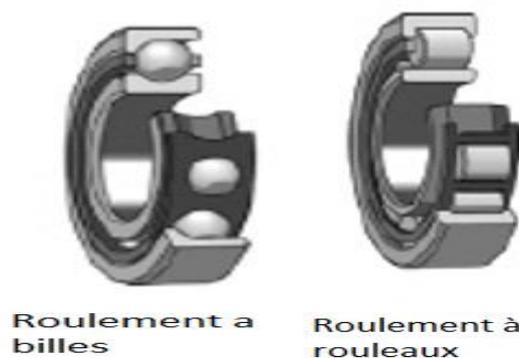


Figure (II.7) : Différents types de roulements. [8]

Les aspects de ces détériorations se manifestant dans la plupart des cas par un arrachement de matière plus ou moins important, sont décrits comme suit :

a) Écaillage : Se caractérise par des traces de fissuration et d'arrachement de fragments de matière.

b) Grippage : En plus de l'arrachement de matière, des traces brunes dues à l'échauffement, des déformations de corps roulants, et des micros fusions peuvent apparaître.

c) Empreintes de corps roulants :

- Par déformation : Des empreintes des corps roulants apparaissent avec un fond brillant, on y retrouve les traces de la rectification mais sans traces d'usure.
- Par abrasion : Dans ce cas les empreintes peuvent ne pas correspondre à l'écartement des corps roulants. L'enlèvement de matière cette fois par usure due à la vibration sans rotation du Roulement (faux effet Brinell), ce défaut peut apparaître sur des machines jamais mises en marche.

d) Usure généralisée : apparaissant sur des corps roulants, des pistes et des cages (teinte grise), due à l'intrusion d'une particule abrasive.

e) Cratères et cannelures : Les premiers sont caractérisés par des piqûres à bords nets liées en chapelet et sont propres aux roulements à billes, quant aux cannelures propres aux roulements à rouleaux, sont caractérisées par une succession de plages étroites parallèles.

f) Coups, fissures, cassures : Se manifestant avec des traces visibles d'outils, et des ruptures des bagues.

g) Corrosion de contact : Se manifestant avec des taches d'oxydation sur l'alésage, le diamètre extérieur et les faces d'appui du roulement.

h) Coloration : Due à une oxydation localisée ou généralisée elle se manifeste avec une coloration des chemins de roulement et des corps roulants.

i) Détérioration des cages : se manifestant sous plusieurs formes : déformation, usure ou rupture des cages. [8]



Figure (II.8) : Quelques défaillances affectant les roulements a- Usure généralisée b- Cage détériorée c- Corrosion d- Présence de cratère e- Ecaillage f- Fissure ou cassure g- Grippage h- Traces d'empreintes. [8]

1.3. Arbre

L'arbre dans une machine tournante est un organe de transmission assurant le mouvement de rotation, supporté par un ou plusieurs paliers selon la configuration de la ligne d'arbre.

L'arbre sert de soutien et d'élément de liaison pour les autres organes de la machine. L'ensemble des éléments tournants, assemblés sur l'arbre est appelé rotor.

Les défauts d'arbres tournants, et plus globalement de rotors sont assez courants dans les machines tournantes. En réalité, il est pratiquement impossible de réaliser un centrage parfait de tous les éléments d'un rotor, ce qui est une cause d'une des plus récurrentes défaillances sur une machine tournante, le balourd.

Un balourd peut avoir comme initiateur plusieurs origines : défauts d'usinage, d'assemblage des rotors ou de montage. Les rotors peuvent aussi se déformer sous l'influence d'un échauffement dissymétrique. Quelques phénomènes pouvant causer l'apparition de balourd, sont décrits comme suit :

1.3.1. Balourd d'origine mécanique

a) Perte de matière « ailette, rupture d'une aube, etc » : Un balourd peut être provoqué par une perte de matière, par exemple par la perte d'une ailette ou la rupture d'une aube. On observe alors une élévation instantanée des niveaux de vibrations.

b) Fluage : Un balourd peut être aussi observé suite à un phénomène de fluage créant une déformation permanente de l'arbre et générant des vibrations élevées. Ce phénomène est souvent rencontré après une période d'arrêt prolongée de la machine.

c) Érosion, dépôt de matière : L'érosion des aubes conduit, dans la plupart des cas, à la création d'un balourd. Le balourd se manifeste alors avec une évolution lente des vibrations à la fréquence de rotation.

1.3.2 Balourd d'origine thermique

a) Déformation des rotors : Un balourd peut se manifester suite à une déformation dissymétrique du rotor sous l'effet de contraintes thermiques, ceci se produit lorsque les rotors ne sont pas homogènes, ou lorsque la température n'est pas répartie de façon uniforme.

b) Glissement et dilatation contrariée des bobinages de machines électriques :

Un balourd peut se manifester aussi suite à une mauvaise dilatation du bobinage provoquant une torsion du rotor, ce qui produit d'importants niveaux de vibration.

c) Dissymétrie d'arbres : la présence d'encoches ou de bobinage crée une dissymétrie de raideur et altère-le comportement d'un arbre. La position du centre de gravité dépend de la raideur de l'arbre, dans le cas d'une dissymétrie, la raideur varie en fonction de la rotation de l'arbre.

d) Fissuration transverse d'arbre :

Les fissures dans les matériaux sont très dangereuses pour les machines tournantes. Une détection précoce de ces fissures est primordiale avant une rupture totale aux conséquences souvent fatales.

De même que pour la dissymétrie d'arbre la présence de fissuration provoque une variation de raideur lors de la rotation. Pour différencier les deux cas, il est recommandé de surveiller l'évolution des amplitudes de vibration dans le temps, mais aussi l'apparition de pics à la moitié ou au tiers des vitesses critiques. [8]

1.4. Accouplement

Les accouplements sont des dispositifs de liaisons utilisés pour raccorder entre eux deux ou plusieurs rotors tout en transmettant le couple. Les accouplements permettent selon leurs types, des dilatations axiales de la machine, ou des déplacements radiaux. Chaque type possède une

gamme de puissances, de températures, et de jeux fonctionnels. Quelques défauts susceptibles de les atteindre, sont listés comme suit :

- Un mauvais centrage des plateaux ou un défaut de parallélisme (Accouplement à plateaux).
- Instabilités des lames de lubrifiant centrifugées et défauts de dentures (Accouplement à denture).
- Fléchissement des arbres dû à un mauvais glissement des dentures (Accouplement à denture).

2. Autres défaillances

2.1. Défaillances des courroies

La courroie est un organe de transmission d'un arbre moteur à un arbre récepteur. Bien que leur utilisation présente certains avantages par rapport à une transmission à engrenages « Moins de bruits et une usure moins importante », la transmission par courroies peut être cible d'une multitude de défaillances tels que ; une détérioration localisée (partie arrachée, défaut de jointure), des courroies trop détendues, un mauvais alignement des poulies ou bien une poulie excentrée. [10]



Figure (II.9) : Défaut de courroie « Partie arrachée ». [10]

2.2. Défaillance Au stator

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 bobi

conséquent la défaillance complète de la machine [11]. La (Fig.II.10) représente deux exemples de dégâts provoqués par le défaut de court-circuit au stator.



Figure (II.10) : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone. [11]

2.3. Défaillance au rotor

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 [12]. 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.II.11).

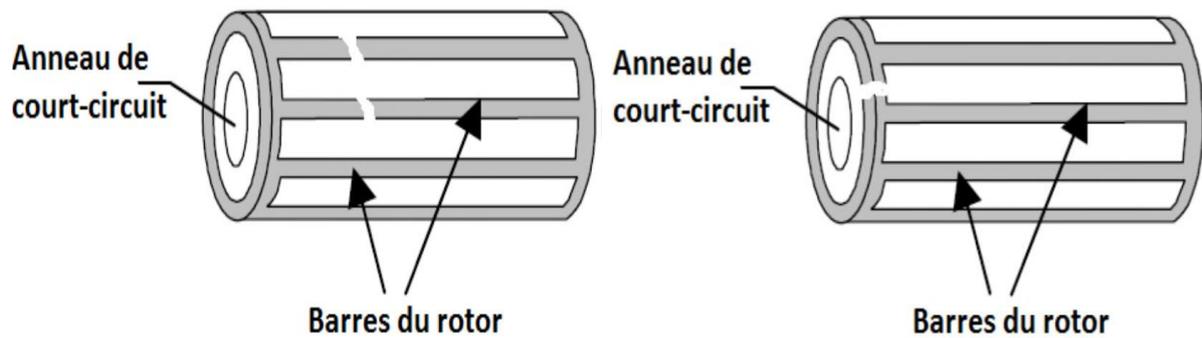


Figure (II.11) : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil ; (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit. [12]

- **Défaut d'excentricité**

Trois catégories d'excentricité peuvent être identifiées dans la littérature et sont illustrées dans la (Fig II.12) [13] :

- Excentricité statique (Fig II.12(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 II.12(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 II.12(c)) : la combinaison des deux cas cités précédemment.

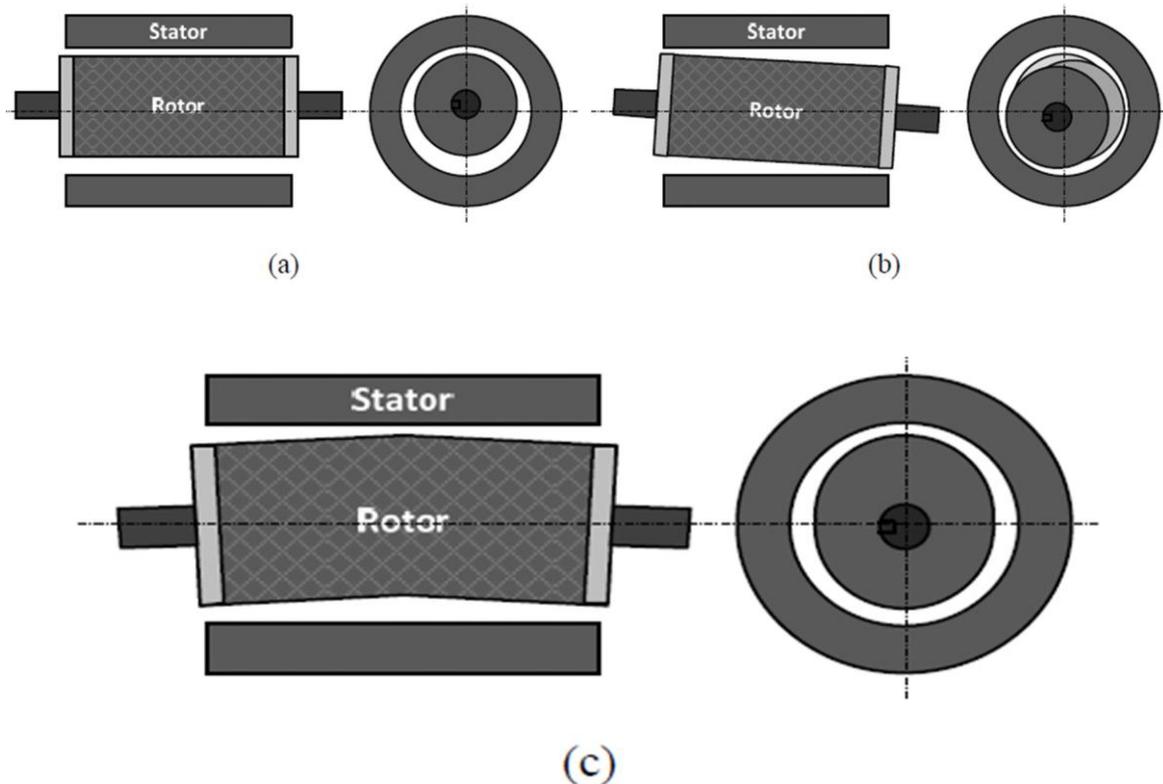


Figure (II.12) : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte [13]

Conclusion

Dans le deuxième chapitre nous avons cité les principaux défauts d'une machine tournante, on a écrit sur les organes les plus importantes et plus courants dans le domaine de maintenance des machines tournantes, ainsi que les plus importantes défaillances qui peuvent les atteindre. D'après la connaissance de ces défauts on peut diagnostiquer ces pannes à l'aide d'un matériel et des logiciels spécialisés ce qu'on appelle l'analyse vibratoire.

Chapitre III

Diagnostic par l'analyse vibratoire

Introduction

Actuellement, les techniques à base d'analyse vibratoire sont largement les techniques les plus célèbres dans le domaine de détection des défauts des machines tournantes.

En général, ils existent trois catégories de techniques de traitement du signal vibratoire pour le diagnostic de défauts des machines tournantes : les méthodes du domaine temporel, les méthodes du domaine fréquentiel et les méthodes temps-fréquence. Pour le domaine temporel, on trouve plusieurs techniques à savoir : RMS, facteur de crête, kurtosis. Dans le domaine fréquentiel, les techniques utilisées sont basées sur l'analyse spectrale, l'analyse d'enveloppe et l'analyse cepstrale. Les techniques d'analyse temps-fréquence les plus utilisées sont : STFT (short-time Fourier transform), WVD (Wigner-Ville distribution), WT (wavelet transform) et les techniques à base d'ondelettes.

L'analyse vibratoire est l'un des plus importants moyens de tests pour comprendre l'état de la machine. Le niveau et le comportement du signal vibratoire dépend des conditions internes de la machine tournante. L'analyse se fait par la comparaison avec une valeur de référence. En pratique après l'acquisition du signal vibratoire, on réalise quatre opérations : on détecte le problème s'il existe, on effectue une analyse pour diagnostiquer le problème, on localise et on règle le problème et finalement on confirme que le problème est réglé.

1. L'analyse vibratoire

1.1. Définition

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle [15].

1.2. Objectif de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs [16] :

- la détection des défauts.
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

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

2. Méthodes d'analyse des vibrations

2.1. Analyse dans le domaine de temps

2.1.1. Les indicateurs classiques

Basée sur les signaux temporels extraits des capteurs de vibration et filtrés sur certaines plages fréquentielles. Cette technique rapide, extrait des indicateurs, pour la plupart statistiques, résumant l'information contenue dans le signal et permettant de générer un repère. Le suivi d'évolution du repère donne une information plus ou moins précise et complète, sur son état de fonctionnement. L'utilisation de ces techniques donne une première information à partir des signaux, mais nécessite d'être accompagnée par des investigations plus poussées dans le cadre du diagnostic.

Une multitude d'indicateurs existent, plus ou moins performants et adéquats pour le dépistage de certaines défaillances plus que d'autres. Les indicateurs les plus utilisés sont décrits comme suit :

- **RMS**

La RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carré du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation (III.1) :

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2\right)} \quad (III.1)$$

Où :

N_e : Le nombre d'échantillons prélevés.

$S(t)$: Le signal

La RMS est un des premiers indicateurs utilisé 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. [8]

- **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 (III.2).

$$F_c = \frac{\text{valeur de crete}}{RMS} = \frac{\text{Sup}|S(t)|}{\sqrt{(\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2)}} \quad (\text{III.2})$$

Le facteur crête suit une distribution normale, 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. [8]

- **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, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie. Il est donné par la formule suivante (III.3) :

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2]^2} \quad (\text{III.3})$$

Avec \bar{S} la valeur moyenne qui est en soit même un indicateur scalaire.

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 [8].

2.1.2. Les indicateurs modernes

En plus des descripteurs conventionnels, deux autres descripteurs ont été développés, le TALAF et le THIKAT, permettant une meilleure connaissance de l'état du roulement ou d'engrenage tout en étant les plus indépendants possibles des conditions de fonctionnement [17].

$$Tala\text{f} = \log[Kurtosis + \frac{RMS}{RMS_0}] \quad (\text{III.4})$$

$$Thika\text{t} = \log[(Kurtosis)^{F_c} + (\frac{RMS}{RMS_0})^{Peak}] \quad (\text{III.5})$$

2.2. Analyse dans le domaine fréquentiel

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

2.2.1. Analyse spectrale

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier (III.6) 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 [18].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (\text{III.6})$$

Où :

$X(f)$ est la transformée de Fourier.

T est la variable temps.

f est la variable fréquence.

2.2.2. 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) [18], elle est définie par :

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(nt_e) e^{-j2\pi K \frac{n}{N}} \quad (\text{III.7})$$

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.

2.2.3. Analyse d'enveloppe

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 démontré. 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 (Figure III.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.

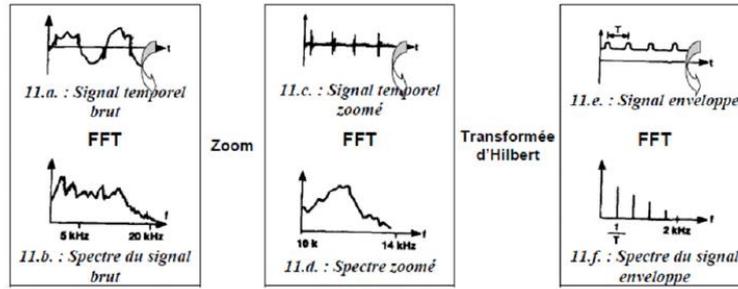


Figure (III.1) : principe de calcul de l'enveloppe [19].

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

$$H[x(t)] = \tilde{x}(t) = \pi^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (III.8)$$

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

$$z(t) = x(t) + iy(t) = x(t) + i\mathcal{H}[x(t)] = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (III.9)$$

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.

2.2.4. Analyse cepstrale

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier

$$C[S(t)] = TF^{-1} \log|TF[S(t)]|^2 \quad (III.10)$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes

de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [20].

2.3. Analyse dans le domaine temps-fréquence

2.3.1. Analyse temps-fréquence

L'analyse spectrale classique basée sur la transformée de Fourier présente un sérieux inconvénient, vu qu'elle suppose que la majorité des signaux sont infinis dans le temps ou périodiques, alors qu'en réalité ils peuvent être de courte durée et comporter des variations au cours du temps d'acquisition. Pour palier cet inconvénient, des techniques ont été développées analysant les variations fréquentielles au cours du temps. Parmi ces techniques on trouve, la transformée de Fourier à Court Terme, la Distribution de Wigner-Ville, ou les techniques à base d'ondelettes [8].

2.3.2. En se basant sur la STFT

La transformée de Fourier à court terme, transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) ou bien encore connue sous le nom de Short-Time Fourier Transform (STFT), est un développement basé sur la technique de transformée de Fourier standard. Cette technique permet d'outrepasser les lacunes de la FFT en analysant des variations fréquentielles de courte durée au cours de l'acquisition.

Le principe de cette technique est de scinder le signal étudié en segments supposés stationnaires. Ceci est fait en multipliant le signal par une fonction g , appelée « Fenêtre », caractérisée par une largeur « où le signal peut être considéré comme stationnaire » et une position temporelle « glissante ».

Étant donné un intervalle de temps $T > 0$, soit $g(u)$ une fonction (fenêtre) qui s'annule en dehors de l'intervalle $-T \leq u \leq 0$. La (TFCT) d'une fonction $f(u)$ est définie par l'équation (III.11) :

$$F(w, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{g}(u - t) f(u) e^{2\pi f w u} du \quad (\text{III.11})$$

Avec $\bar{g}(u)$, le complexe conjugué de la fonction $g(u)$ (appelée fenêtre) et t le paramètre de localisation temporelle de la fenêtre g [8].

2.3.3. En se basant sur les ondelettes

Contrairement à la STFT, La transformée d'ondelette (TO) est une méthode de traitement de signaux possédant une résolution adaptative à la taille de l'objet ou du détail analysé.

De même que pour la transformée de Fourier cette technique décompose le signal dans une base de fonctions particulières, sauf que ces fonctions « appelées ondelettes », contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier, sont des fonctions oscillantes au sens large et peuvent être rapidement amorties.

Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, une ondelette dilatée observe les composantes basses fréquences nécessitant une large fenêtre temporelle, alors qu'une ondelette contractée observe les composantes hautes fréquences où une haute résolution temporelle est requise.

Les éléments de base de la Transformée en Ondelettes sont des fonctions localisées en temps autour d'un paramètre b et oscillant à une fréquence a . Et sont générées par translation b et dilatation a à partir d'une fonction, l'ondelette mère de moyenne nulle, comme montré dans l'équation (III.12) :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.12})$$

La transformée en Ondelettes d'une fonction $x(t)$ est définie au moyen du produit scalaire montré par l'équation (III.13) conduisant à une représentation temps-échelle en fonction des variables décalage et échelle.

$$X_{TOC}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III.13})$$

Une discrétisation de la transformée est possible en posant 2^m et $n2^m$ aux lieux des paramètres a et b , avec m et n des entiers, comme montré dans l'équation (III.14)

$$X_{TOD}(n,m) = 2^{\frac{-m}{n}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \psi^*(2^{-m}(t-n)) dt \quad (\text{III.14})$$

Dans le cadre des signaux numériques, L'Analyse Multi Résolution en Ondelette (AMRO) est largement utilisée, permettant de décomposer un signal, en sous bandes fréquentielles, sans perte ou redondance d'informations.

Cette technique génère à chaque niveau un coefficient d'approximation contenant l'information (basses fréquences), et un coefficient de détail contenant l'information (haute fréquences) du signal d'origine [8].

3. Simulation de quelques signaux vibratoires

3.1. Simulation d'une somme des signaux sinusoïdaux

Le signal $S(t)$ est composé de trois sinusoïdes $S1(t)$, $S2(t)$ et $S3(t)$ de fréquences fondamentales 1000Hz, 3000Hz et 4000Hz respectivement avec une fréquence d'échantillonnage est $F_e=20000\text{Hz}$.

$$S1(t) = 3 * \sin(2\pi * 1000 * t) \quad \text{(III.15)}$$

$$S2(t) = 0.8 * \sin(2\pi * 3 * 1000 * t) \quad \text{(III.16)}$$

$$S3(t) = 0.5 * \sin(2\pi * 4 * 1000 * t) \quad \text{(III.17)}$$

$$S(t) = S1(t) + S2(t) + S3(t) \quad \text{(III.18)}$$

La figure (a) représente l'amplitude de signal $S(t)$ en fonction de temps (représentation temporelle) et la figure (b) représente les spectres des trois signaux simulés $S1(t)$, $S2(t)$ et $S3(t)$ respectivement représentés par des pics les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes de signal $S(t)$ et la figure (c) et (d) représente l'enveloppe de signal $S(t)$ et son spectre d'enveloppe.

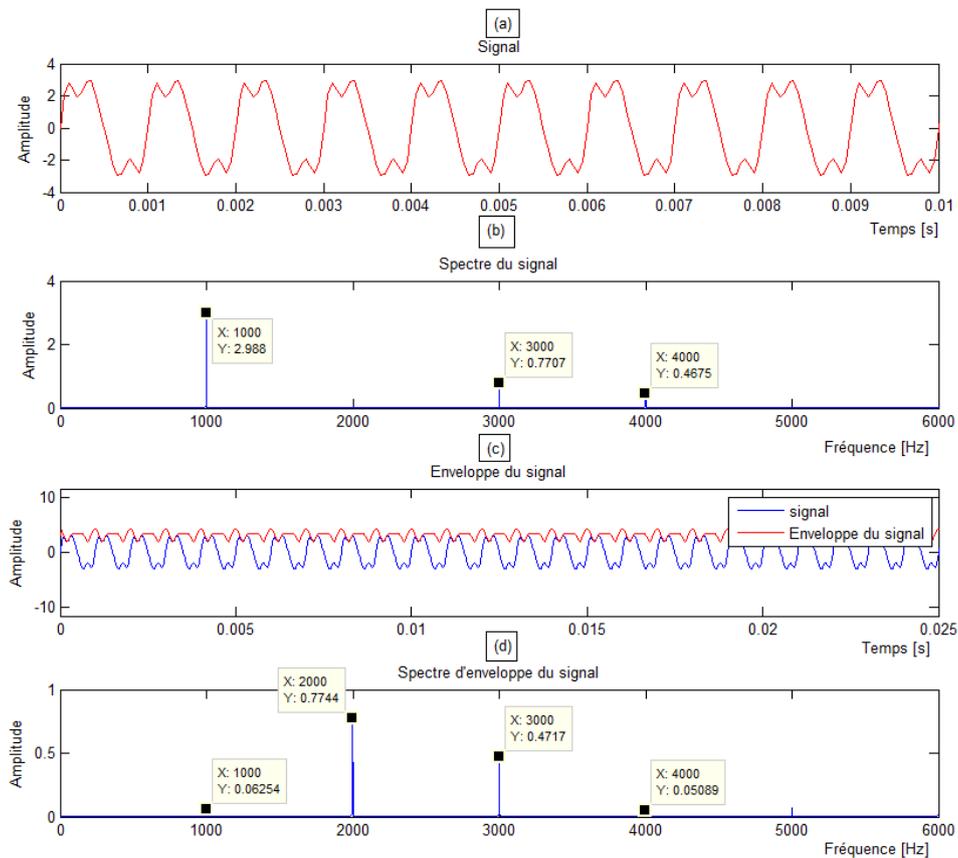


Figure (III.2) : (a) représenté le signal $S(t)$, (b) spectres de signal $S(t)$ (c) analyse d'enveloppe du signal et (d) spectre d'analyse d'enveloppe.

3.2. Simulation de signal modulé en amplitude

La modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude d'un signal de fréquence élevée, le signal porteur, en fonction d'un signal de plus basse fréquence, le signal modulant. Ce dernier est celui qui contient l'information à transmettre (vibrations, par exemple).

Pour la modulation d'amplitude, il s'agit donc de faire varier l'amplitude de la porteuse en fonction du signal modulant, sans que cette variation dépasse l'amplitude de la porteuse avant modulation.

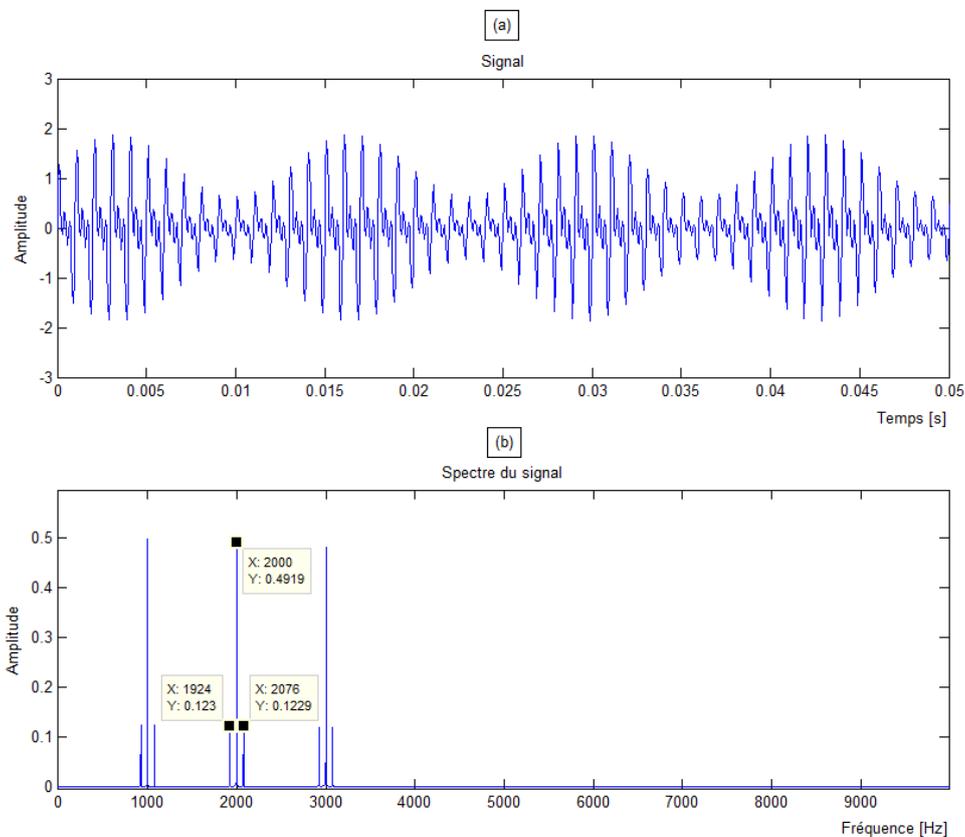


Figure (III.3) : (a) signal modulé en amplitude et (b) son spectre le signal

Soit la somme des signaux sinusoïdaux modulé en amplitude $X_m(t)$. La fréquence d'échantillonnage est $F_e=20000\text{Hz}$

$$X_m(t) = 0.5[(\sin(2\pi * 1000t)) + (\sin(2\pi * 2000t)) + (\sin(2\pi * 3000t))] * (1 + 0.5(\sin(2\pi * 76t))) \quad (\text{III.19})$$

La figure (a) représente le signal modulé en amplitude et (b) son spectre, le signal de la sinusoïde $Xm(t)$ modulé en amplitude avec différentes fréquences de porteuse 1000Hz, 2000Hz et 3000Hz et la fréquence de signal modulant 76Hz. Le spectre de signal modulé montre la fréquence porteuse et deux pics d'amplitude à gauche et à droite qui constitue ce qu'on appelle une bande latérale de fréquence (figure III.3 (b)).

- **Analyse d'enveloppe de signal $Xm(t)$**

L'analyse d'enveloppe démodule le signal et permet de déterminer la fréquence modulée : 76 Hz. La fréquence facilement isolée comme il montre le spectre d'enveloppe de la figure III.4(b).

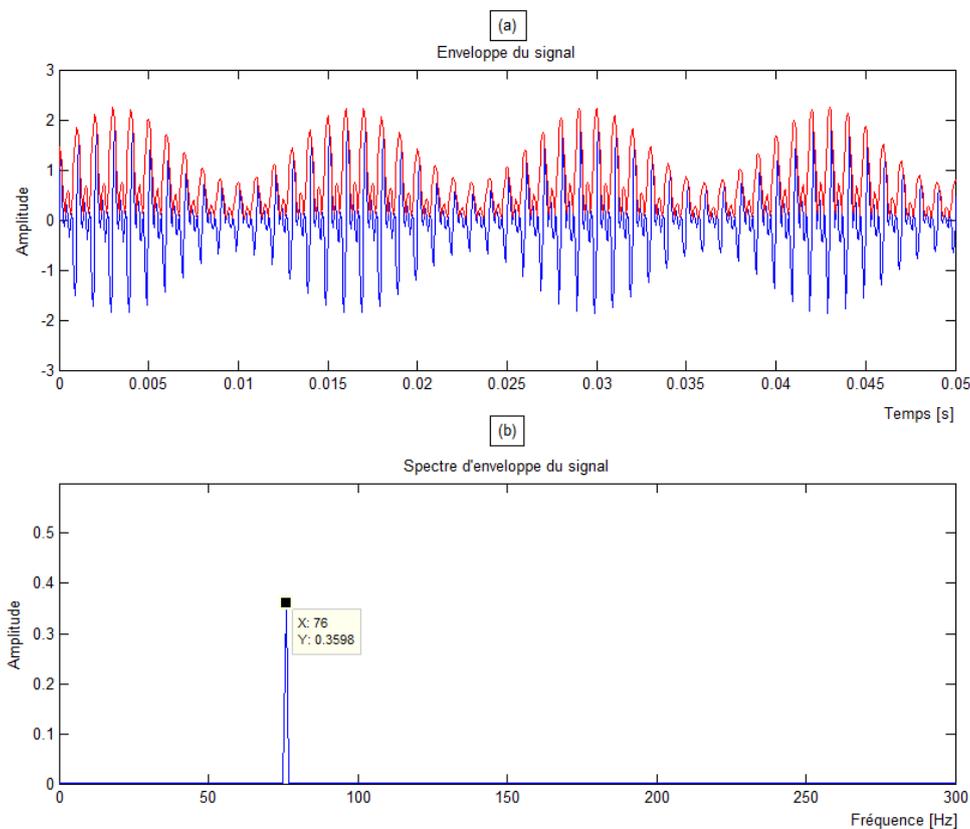


Figure (III.4) : (a) signal et son enveloppe, (b) le spectre d'enveloppe de signal.

3.3. Simulation de signal de roulement

La figure III.5(a) représente un signal $Xr(t)$ simulé de défaut d'un roulement (qui engendre les chocs excitant les résonnances du système). Ce signal est décrit par :

$$Xr(t) = \sin(2\pi * 2000t) * e^{-\beta\tau}$$

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 $\beta = 555$ (coefficient d'amortissement).

Cette fonction représente les chocs répétitifs induits par les défauts de roulement, avec une fréquence d'échantillonnage de $f_e = 18000\text{Hz}$. Et la fréquence de modulation $f_{res} = 2000\text{Hz}$ représente la fréquence de résonance.

Sur la figure III.5 (a), il est montré le signal $Xr(t)$ dans le domaine temporel où l'on remarque des chocs espacés par des périodes de temps constantes ce qui correspond au défaut.

Les figures III.5(b) et III.5(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 détecter le défaut dans ce cas.

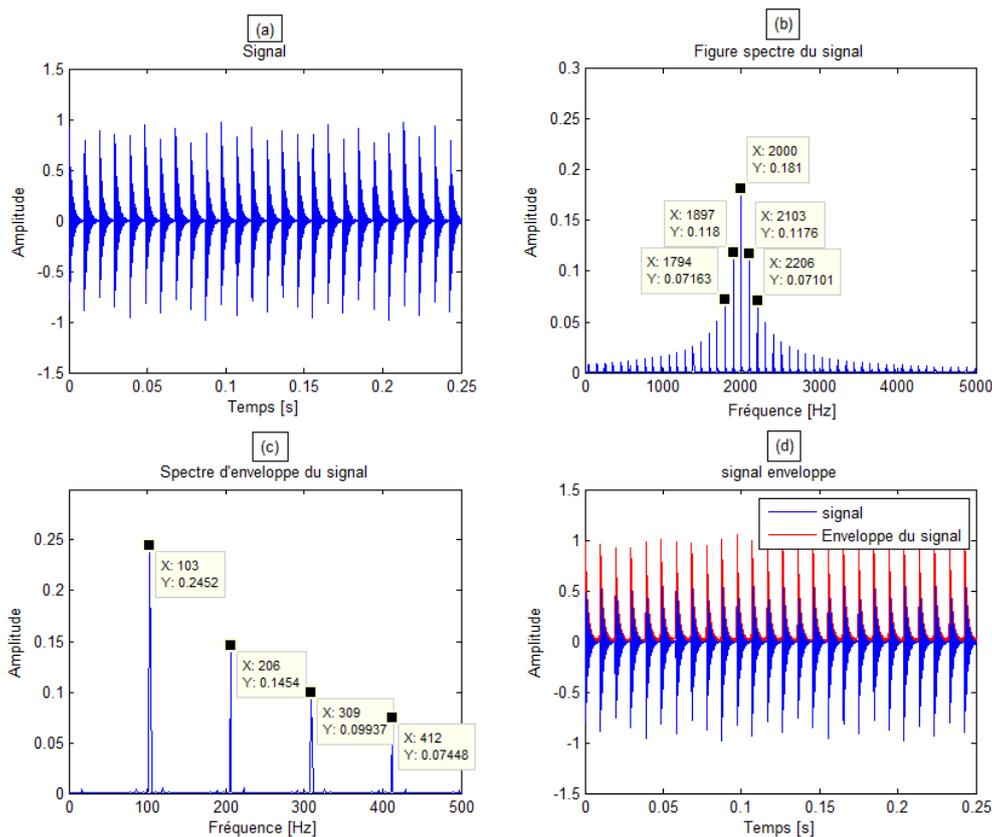


Figure (III.5) : (a) signal roulement $Xr(t)$, (b) spectre du signal simulé, (c) spectre de son enveloppe, (d) signal d'enveloppe.

3.4. Simulation de signal engrenage

La défaillance locale provoque un impact dont la durée est inférieure à celle du maillage des dents. Une bosse sur la surface de la dent de l'engrenage génère des oscillations à haute fréquence pendant la durée de l'impact. La fréquence des impacts dépend des propriétés des composants du train d'engrenage et de ses fréquences propres. Dans cet exemple, on suppose Arbitrairement que l'impulsion de l'impact qui égal à 0.08 provoque un signal vibratoire $Xe(t)$ à des fréquences multiples de 1000Hz, se dernière se produit chaque 0.03333 second. L'impact se répète une fois par rotation de l'engrenage. (Figure III.6)

$$Xe(t) = s2 + xh + impact$$

Avec s2 signal avec modulation $s2 = x0 + x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + xh$

Les paramètre utilisé dans cette simulation son :

Fréquence d'échantillonnage $f_e = 97656\text{Hz}$

Impulsion de l'impact $imp = 0.08$

Phase de modulation $mp = 0.2$

Fréquence de rotation des deux roues $f_1 = f_2 = 14.2857\text{Hz}$.

Nombre de dents des deux roue $n_1 = n_2 = 32\text{dents}$

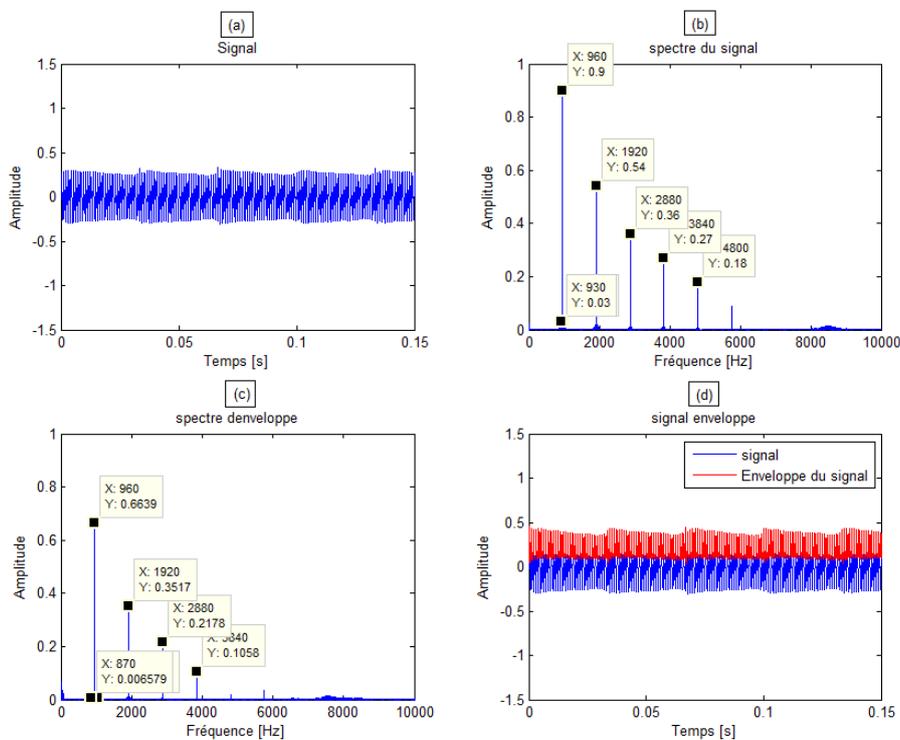


Figure (III.6) : (a) signal engrenage $Xe(t)$, (b) spectre du signal, (c) spectre de son enveloppe, (d) signal enveloppe de $Xe(t)$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur les différentes techniques d'analyse vibratoire, qu'elles soient temporelles (RMS, facteur crête, kurtosis..), fréquentielles (spectrale, enveloppe) ou temps- fréquence (STFT, base d'ondelettes...) et soulever l'intérêt de leur utilisation avec quelques exemples d'application tout en exposant les avantages et les limitations de chaque méthode considérée dans ce travail.

Toutefois, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisée. Il faut dire qu'elle permet de détecter tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Cette méthode présente plusieurs avantages comme les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont souvent détectables à un stade précoce et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine.

Chapitre IV

Diagnostique vibratoire des machines tournantes

(Moteur, pompe et engrenage).

Introduction

Le diagnostic de l'état d'une machine par analyse des vibrations est un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet une identification appropriée des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur la machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés. Dans ce chapitre, nous avons étudié plusieurs signaux de mesures réelles qui décrivent les états de certains organes électromécaniques d'une machine tournantes (bobinage du stator, cage rototique, roulements, engrenage et quelques organes d'une pompe). 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.

1. Diagnostic défaut moteur

1.1. Description de la machine étudiée

Afin d'étudier les défaillances électriques d'une machine asynchrone sur un cas réel, nous disposons d'un banc d'essai constitué principalement par un moteur asynchrone de test reconstruit 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 (380 volts, 50 Hz). La machine, avec stator et rotor séparés, est présentée sur la figure (IV.1).



Figure (IV.1) : Machine asynchrone utilisée

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

Puissance	3 KW
Nombre de spire 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

Tableau (IV.1) : Paramètre des tests et de la machine utilisée

1.2. Diagnostic des défaillances au Stator

Dans cette partie, l'étude a porté sur les défauts au stator. Bien que les défauts de court-circuit entre spires d'une phase soient les plus fréquents, nous citons aussi le cas d'anomalie en présence d'une portion de spires ouvertes qui est un cas aussi souvent rencontré dans l'industrie.

1.2.1. Machine saine (sans défaut)

Dans ce test, le signal mesuré sur la machine asynchrone qui est en bon état est traité par les deux méthodes (analyses spectrale et d'enveloppe). En premier lieu, l'analyse spectrale du signal de la machine saine et l'analyse de son spectre d'enveloppe du signal mesuré ont donné les spectres de Figure IV.2 (a et b) respectivement. Comme prévu, les deux spectres des deux méthodes montrent qu'il n'existe aucune composante fréquentielle caractéristique d'un défaut quelconque.

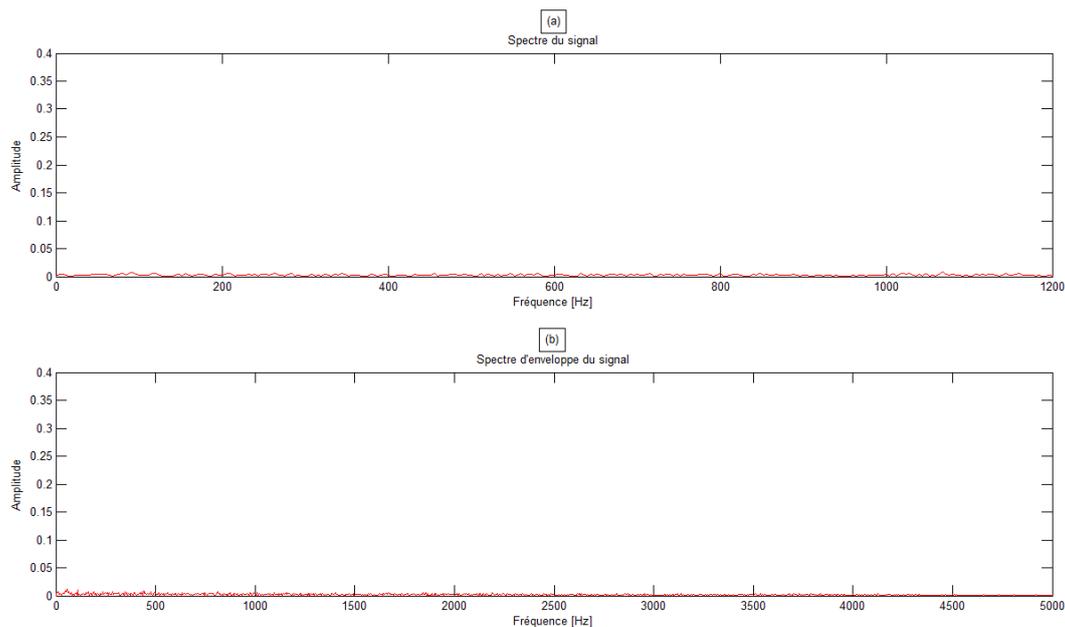


Figure (IV.2) : Analyse fréquentielle du signal sans défaut cc : (a) spectre de signal, (b) spectre d'enveloppe.

1.2.2. Court-circuit d'un certain nombre de spires

Les mesures vibratoires en présence d'un défaut de court-circuit d'une portion de spires d'une seule phase ont été menées au laboratoire Génie Electrique selon les pourcentages indiqués par le tableau (IV.2). Les résultats de l'analyse fréquentielle de ces données sont exposés ci-dessous.

Défaillance stator				Défaillance rotor
Spires en court-circuit		Spires ouverte		
Portion(%)	Indice	Portion(%)	Indice	Barre cassée
2.5	cc 1	3.2	o 1	01
5.1	cc 2	5.1	o 2	
8.3	cc 3	8.3	o 3	
10.5	cc 4	16.7	o 4	

Tableau (IV.2). Les défaillances électriques simulées sur la machine asynchrone

1.2.3 Analyse spectrale

Dans notre cas nous avons sélectionné le signal mesuré pour le cas de défaut de 8.3 % des spires d'une phase en court-circuit. Le signal est ensuite analysé dans le domaine spectral montré sur

la figure IV.3. On remarque des pics d'amplitudes significatifs sur le spectre de ce signal, comme le montre la Figure IV.3 (a). La démodulation du signal par analyse d'enveloppe, donne le spectre de la figure IV.3 (b). En examinant le spectre d'enveloppe, trois raies spectrales apparaissent avec des amplitudes importantes à $F_d = 2fs$ et ses 2 multiples.

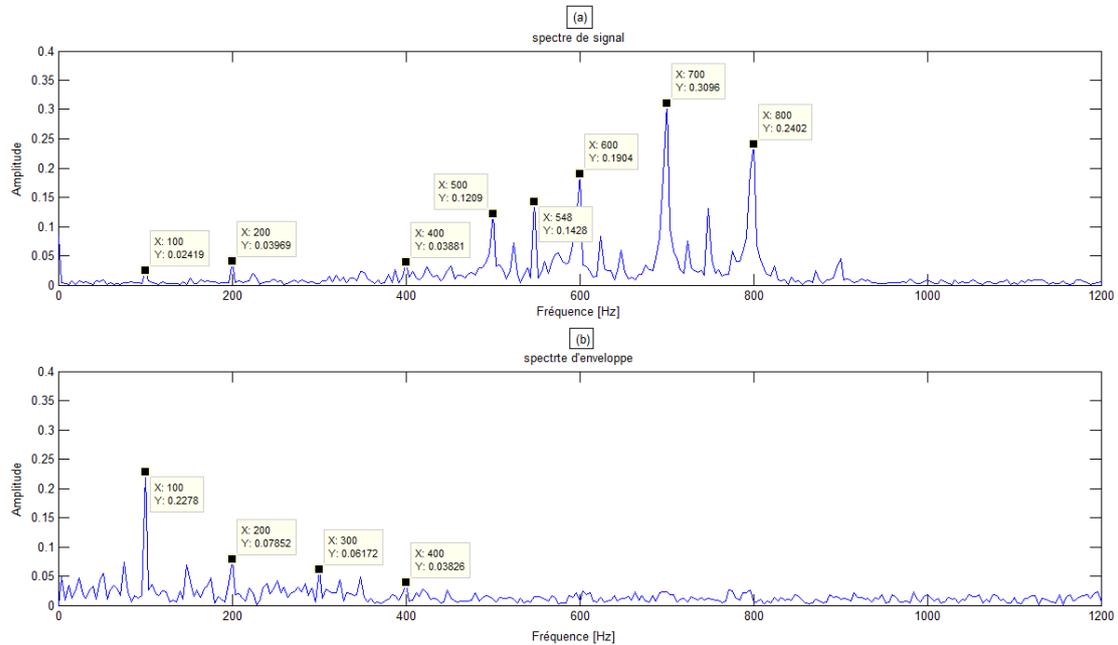


Figure (IV.3) : Analyse fréquentielle du signal avec défaut de court-circuit : (a) spectre du signal, (b) spectre d'enveloppe.

1.3. Diagnostic des défaillances au rotor (cas de barre cassée)

Dans cette partie, l'étude consiste à suivre l'effet d'une barre cassée au rotor sur le signal vibratoire. Bien que les défauts au rotor ne soient pas très fréquents, avec un taux de 7% des défaillances de la machine [17], il est approprié d'exposer les résultats d'analyse en présence d'une barre cassée qui est un cas aussi souvent rencontré dans l'industrie. Thomson et Yahoui ont montré que ce défaut engendre une asymétrie du champ magnétique de l'entrefer de la machine, ce qui provoque des composantes fréquentielles correspondantes à la fréquence de rotation de la machine [17].

1.3.1 Analyse spectrale

Le signal mesuré avec une barre cassée au rotor est analysé dans le domaine fréquentiel et les spectres résultants sont présentés sur la Figure (IV.4). En examinant le spectre du signal de défaut, une modulation de la fréquence de rotation est apparue autour de la fréquence d'encoche $F_{enc} = N_r F_r = 596.16 \text{ Hz}$. De plus, trois harmoniques de la fréquence $F_d = 2fs = 100 \text{ Hz}$ sont présents sur ce spectre avec des amplitudes très importantes. La démodulation du signal

par analyse d'enveloppe donne des harmoniques de la fréquence de rotation F_r , ce qui indique un déséquilibre des forces induit par une asymétrie du champ électromagnétique de l'entrefer suite à l'introduction du défaut de la barre rotorique cassée.

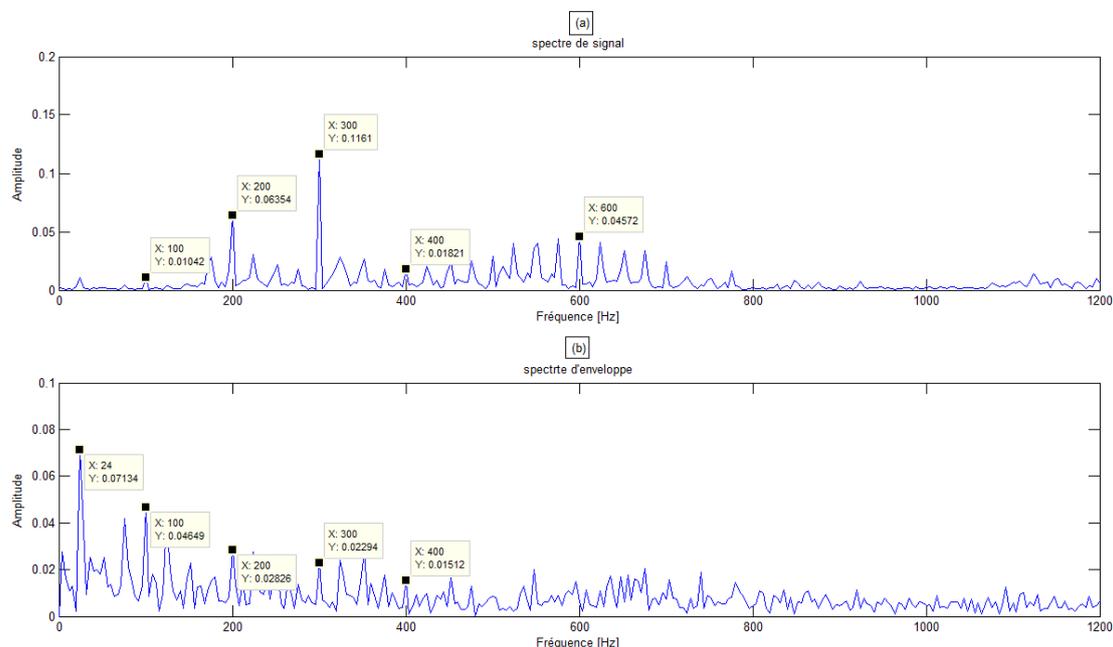


Figure (IV.4) : (a) Spectre du signal mesuré sur la machine avec une barre cassée au rotor, et (b) spectre d'enveloppe de ce signal.

1.4. Comparaison des trois spectres des signaux de mesures

D'après les trois figures IV (2,3 et 4) qui représentent des signaux, on conclut que dans les deux cas de défauts (court-circuit et barre rotorique cassée), l'apparition de raies spectrales avec d'importantes amplitudes à des fréquences multiples de la fréquence de défaut F_d , avec $F_d = 2fs = 100 \text{ Hz}$ indique clairement le défaut. Par contre, l'absence de ses harmoniques sur le spectre de la figure (IV.2) indique que la machine est saine.

2. Diagnostic des défauts mécaniques (roulement et engrenage)

2.1. Défaut roulement

2.1.1. Bancs d'essai de l'ÉTS

Des signaux vibratoires utilisés dans cette partie sont enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS de Montréal, représenté sur la figure IV.5 [17, 21]. Les roulements utilisés sont à double rangée de billes (SKF, 1210 EKTN9). Les mesures ont été effectuées le palier test (normal ou présence de défaut de bague extérieure). 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 [21]. Les données de vibration ont été recueillies après par le collecteur BetaVib.

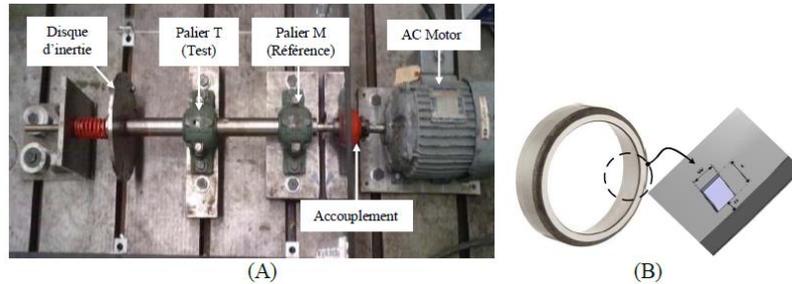


Figure (IV.5) : (A) Banc d'essai ÉTS de Montréal, (B) Défaut de bague extérieure du roulement [21].

2.1.2. Analyse en présence de défaut

Dans cette analyse, nous retenons la mesure est effectuée avec roulement ayant un défaut de bague externe de taille 0.25 mm. D'après la référence du roulement et la valeur de la vitesse de rotation, la fréquence caractéristique de ce défaut est $F_{\text{bague}} = 108 \text{ Hz}$.

Le signal, son spectre et le spectre de son enveloppe sont calculés et affichés sur les figures (IV.6) (a, b et c) respectivement. Comme prévu, 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 cette fréquence de 108 Hz et ces multiples correspondant au défaut sur la bague extérieure.

Dans un côté, il est clair que le zoom qu'on a effectuée sur le spectre d'enveloppe figure IV.6 (d) nous permet de lire clairement la fréquence caractéristique de défaut roulement qui reste constante tout au long de temps de la mesure.

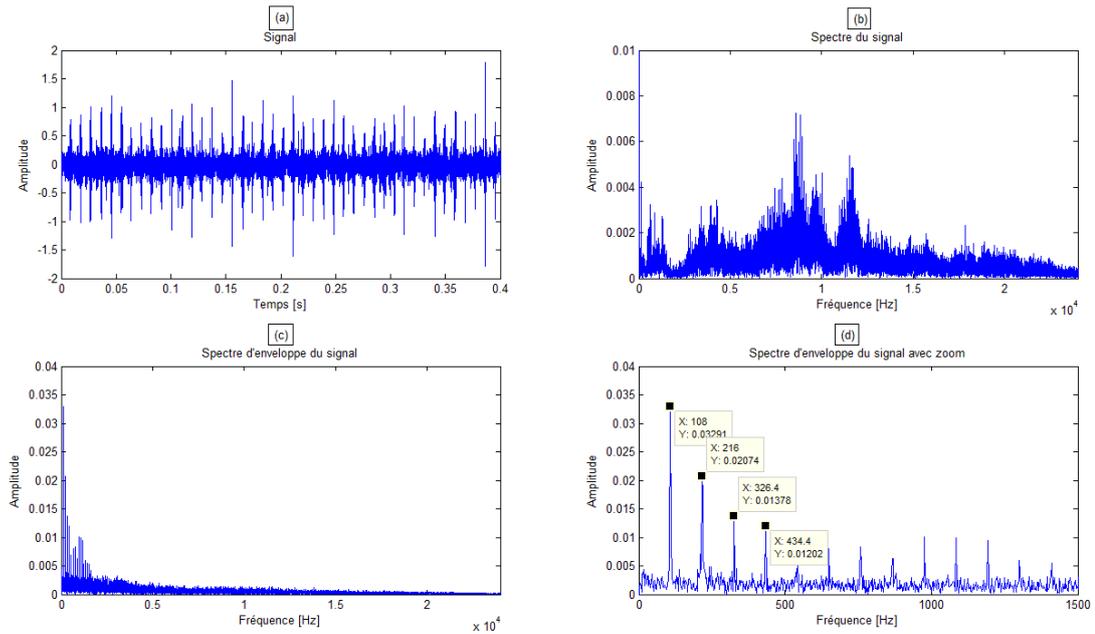


Figure (IV.6) : Analyse spectrale du signal mesuré sur la machine en présence de défaut, (a) signal, (b) son spectre, (c) spectre de son enveloppe et (d) le zoom du spectre (c).

2.2. Défaut engrenage

Pour montrer l'efficacité des méthodes proposées dans les chapitres précédents sur l'identification de défaillance dans les engrenages, nous allons analyser les mesures recueillies sur un banc d'essai de l'université

2.2.1. Banc d'essai du CETIM

Le banc d'essai du CETIM est un réducteur composé d'un pignon de 20 dents et d'une roue de 21 dents [22]. La Figure (IV.7) montre une roue sans défaut et une roue avec un défaut d'écaillage.

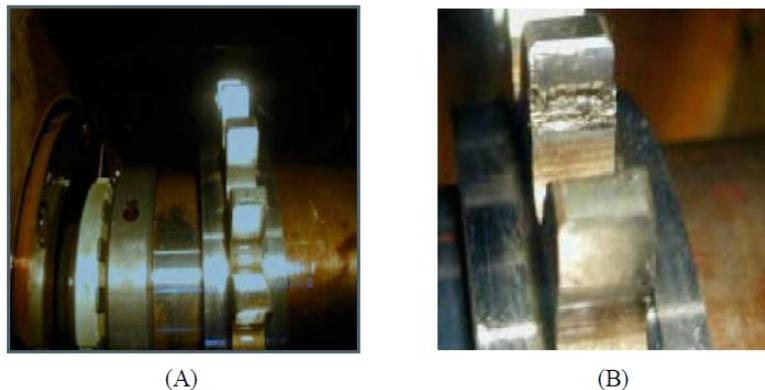


Figure (IV.7) : Photos d'une roue du banc du CETIM ;(A) sans défaut, et (B) avec défaut [22].

La vitesse de rotation de l'arbre est de 1 000 tr/min soit environ 16.67 Hz. La fréquence de rotation de la roue est égale à 15.87 Hz. La fréquence d'engrènement est de l'ordre de 333 Hz. La fréquence d'échantillonnage est égale à 20 kHz. Chaque enregistrement comporte 60000 échantillons soit une durée du signal de 3s. L'expérimentation a duré 12 jours où le réducteur passe de l'état de bon fonctionnement à un état détérioré. Après chaque acquisition des signaux vibratoires, le banc est arrêté pour expertiser l'état des dentures des roues (voir Tableau IV.4).

Jour	Observation
1	Premier jour d'acquisition, pas d'anomalie
2	Pas d'anomalie
3	// //
4	// //
5	// //
6	Écaillage sur le profil de la dent 1/2
7	Pas d'évolution
8	La dent 1/2 : no evolution; La dent 15/16: début d'écaillage
9	Evolution de l'écaillage de la dent 15/16
10	// //
11	// //
12	Ecaillage sur toute la longueur de la dent 15/16

Tableau (IV.3) : Rapport hebdomadaire sur les tests de fatigue à CETIM [22].

2.2.2. Cas sans défaut

Nous présentons sur la Figure (IV.8) le signal mesuré dans le cas sans défauts, son signal (a), spectre (b) et le spectre d'enveloppe (c) respectivement.

On constate que le signal ne permet de détecter aucune information claire sur ce dispositif. Sur le spectre on constate l'apparition de la fréquence d'engrènement au multiple de 333 Hz sans aucune modulation ni par la fréquence de rotation de roue ou de pignon ce qu'explique l'absence de défaut d'engrenage. En très basse fréquence apparaît uniquement la fréquence de rotation avec ses harmoniques. De la même manière, sur le spectre d'enveloppe, apparaît les harmoniques de la fréquence de rotation ainsi des multiples de fréquence d'engrènement.

2.2.3. Cas avec défaut

La Figure (IV.9) montre le signal mesuré en cas de défaut, (a) le signal, (b) le spectre du signal, (c) spectre enveloppe et (d) c'est le spectre d'enveloppe avec zoom.

Le spectre (b) montre bien la présence d'un défaut sur une dent de la roue, qui se manifeste par l'apparition des bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement. Le spectre d'enveloppe de la Figure IV.9 (c) montre l'apparition des pics de la fréquence de rotation représentent aussi un peigne de raie décroissant, ce qui signifie la présence d'un défaut sur la roue.

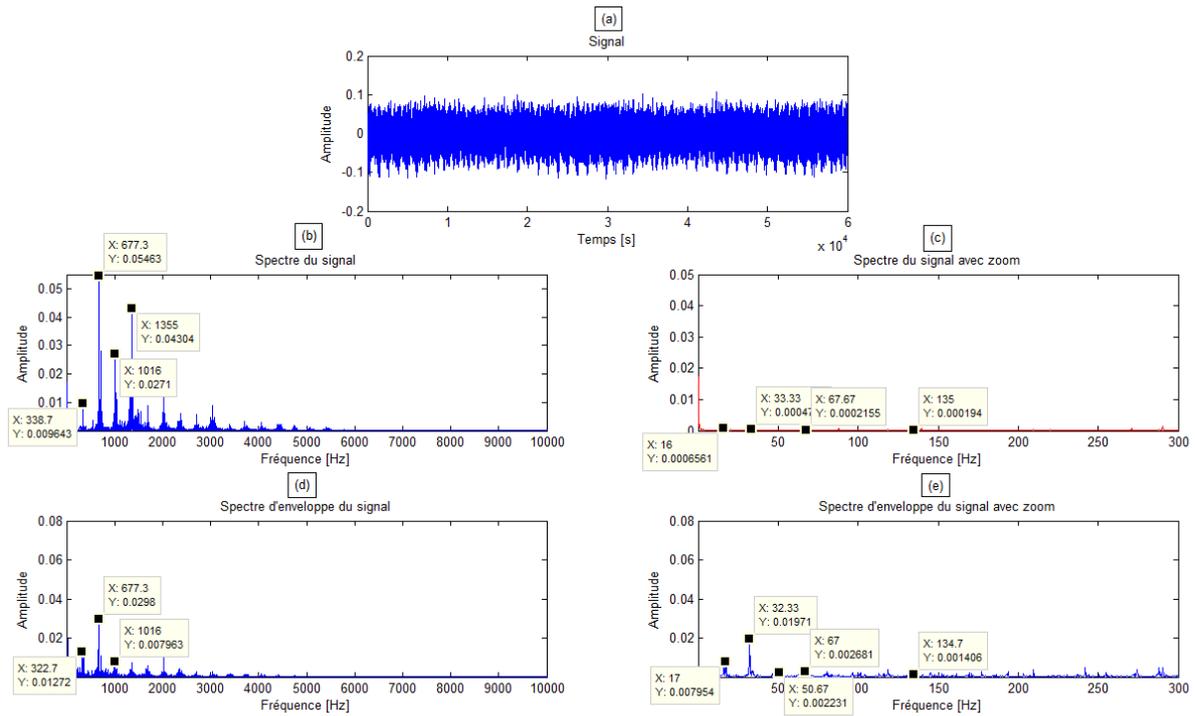


Figure (IV.8) : Signal mesuré à l'absence de défaut : (a) signal, (b) son spectre et (c) spectre de son enveloppe.

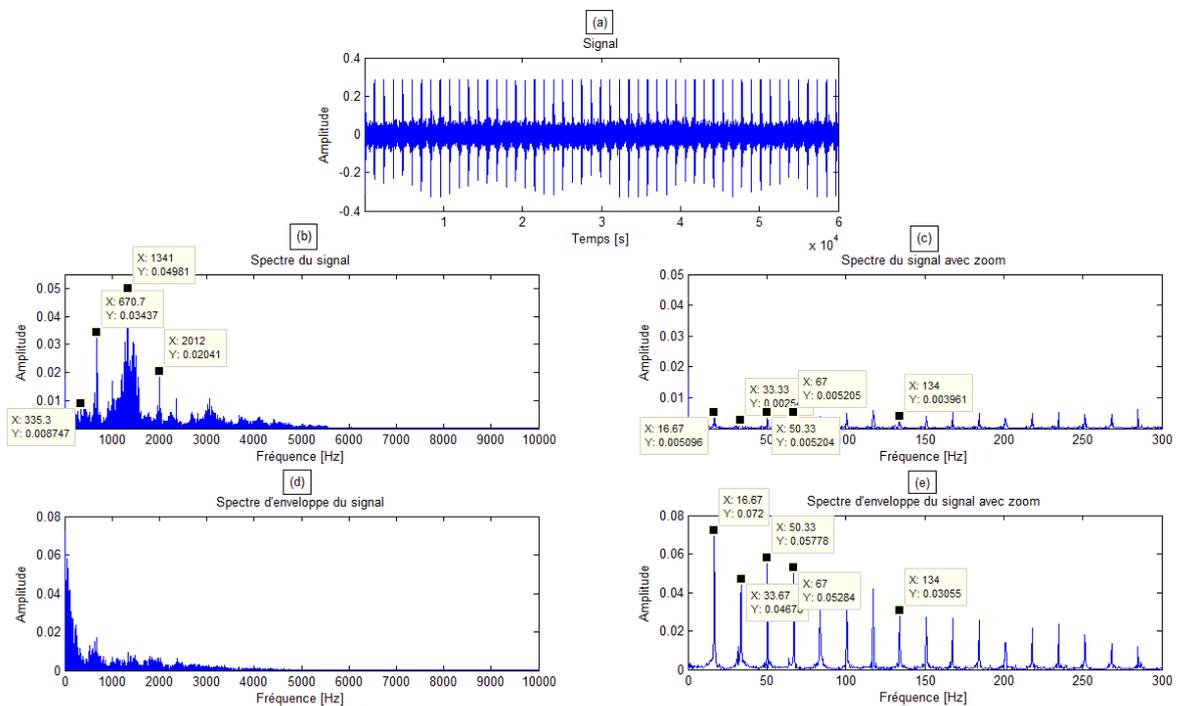


Figure (IV.9) : Signal mesuré dans le cas de défaut : (a) signal, (b) son spectre, (c) spectre de signal avec zoom, (d) spectre d'enveloppe et (e) zoom du spectre d'enveloppe.

2.2.4. Comparaison des spectres résultants

La figure IV.6 (b) montre l'allure du spectre ou la FFT du signal de vibration sans défaut d'un engrenage, cela est indiqué d'après les faibles amplitudes et l'absence des multiples de la fréquence caractéristique de défaut, cette figure nous montre un pic de 333 Hz qui correspond à la fréquence d'engrènement de l'ensemble pignon/roue de 20/21 dents.

La figure IV.6 (b) représente l'allure de spectre du même signal vibratoire d'engrenage comportant un défaut d'écaillage sur la roue de 21 dents. Il apparaît une augmentation dans l'amplitude de la raie de fréquence de l'engrènement à 333 Hz. Ainsi que l'augmentation de l'amplitude de la raie de fréquence de rotation de pignon qui porte la dent écaillée de fréquence de rotation de 16.67 Hz.

3. Diagnostic spectral d'une pompe centrifuge sans défaut

3.1. Description de la pompe centrifuge étudiée

Dans cette partie, des mesures de vibration sur une pompe centrifuge d'eau de refroidissement sont utilisées [23]. La pompe a été installée pour fonctionner 2 semaines environ, et après les tests elle révélait être en bon état. La figure IV.10 montre les points de mesure sur cette pompe :



Figure (IV.10). Points de mesure des signaux vibratoires sur la pompe [23].

- #1 : mesure coté moteur
- #2 : mesure à l'entrée de la pompe
- #3 : mesure à la sortie de la pompe
- #4 : mesure sur la volute de la pompe

La pompe, ayant une roue à 3 pales, tourne à une vitesse synchrone nominale de 3000tr/min avec une puissance de 20 kW. Les mesures échantillonnées à une fréquence de 25600 Hz, ont une durée de 30 secondes. Selon les experts [10], la fréquence caractéristique de la pompe qui est décrite par :

$$f_d = n \cdot f_r = 3 \cdot f_r$$

Où :

- n : Nombre de pales de la roue.
- f_d : Fréquence caractéristique du défaut.
- f_r : Fréquence de rotation de l'arbre moteur.

3.2. Le spectre fréquentiel des organes mesurés sur une pompe

Dans cette partie, l'étude a portée sur une pompe centrifuge saine (sans aucun défaut). Les signaux mesurés sur cette pompe ont fait l'objet d'une analyse spectrale comme exposé sur les figures IV (11-14).

Comme prévu, les spectres des signaux vibratoires obtenus sur ces quatre points de mesure ne montrent que des composantes relatives à la fréquence de rotation (≈ 23.9 hz) ainsi que 2 composantes fréquentielles caractéristique du défaut f_d et $2f_d$ (71.8 et 143,4 Hz). Il est clair que le défaut n'est pas évident puisque ces composantes n'ont que de très faibles amplitudes. Cela montre que le mouvement de rotation de la roue est aussi accompagné de vibrations normales qui se manifestent à la fréquence 3xfréquence de rotation. Dans le cas où il y aura une présence de défaut ces composantes vont manifester de très grandes amplitudes plus une large modulation dû à la résonance créée par le défaut.

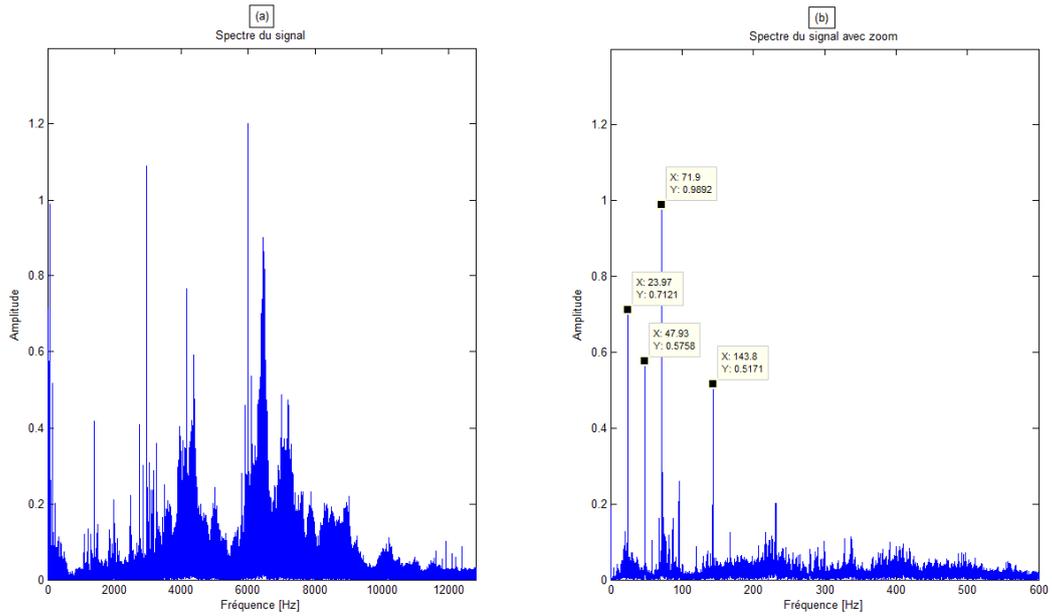


Figure (IV.11) : Analyse spectrale du signal mesuré au côté moteur (#1) : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre.

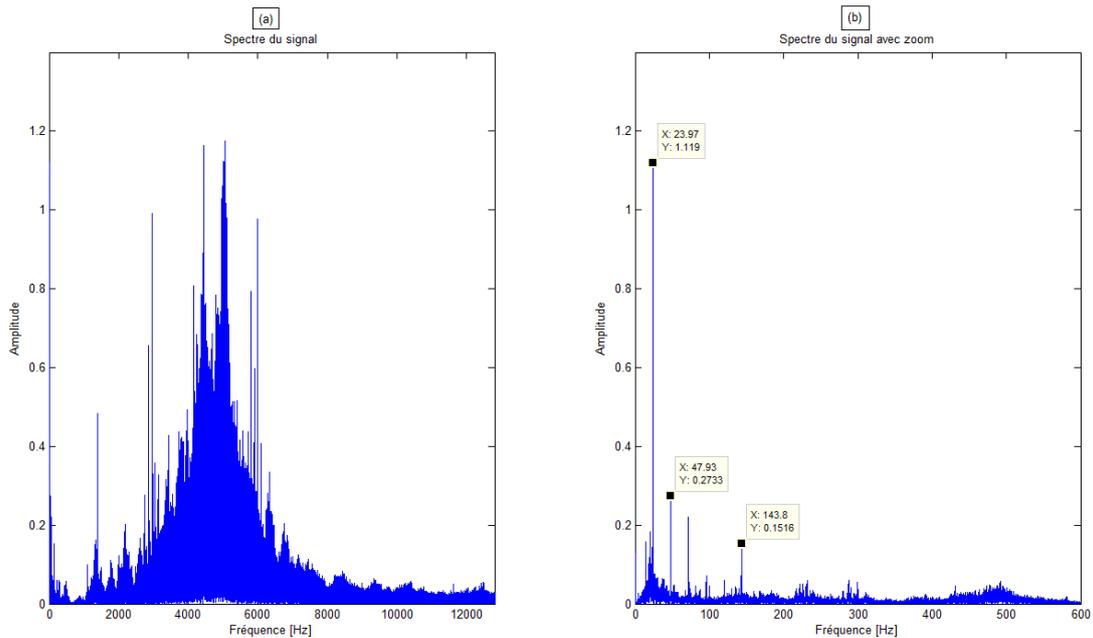


Figure (IV.12) : Analyse spectrale du signal (#2) mesuré à l'entrée de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre.

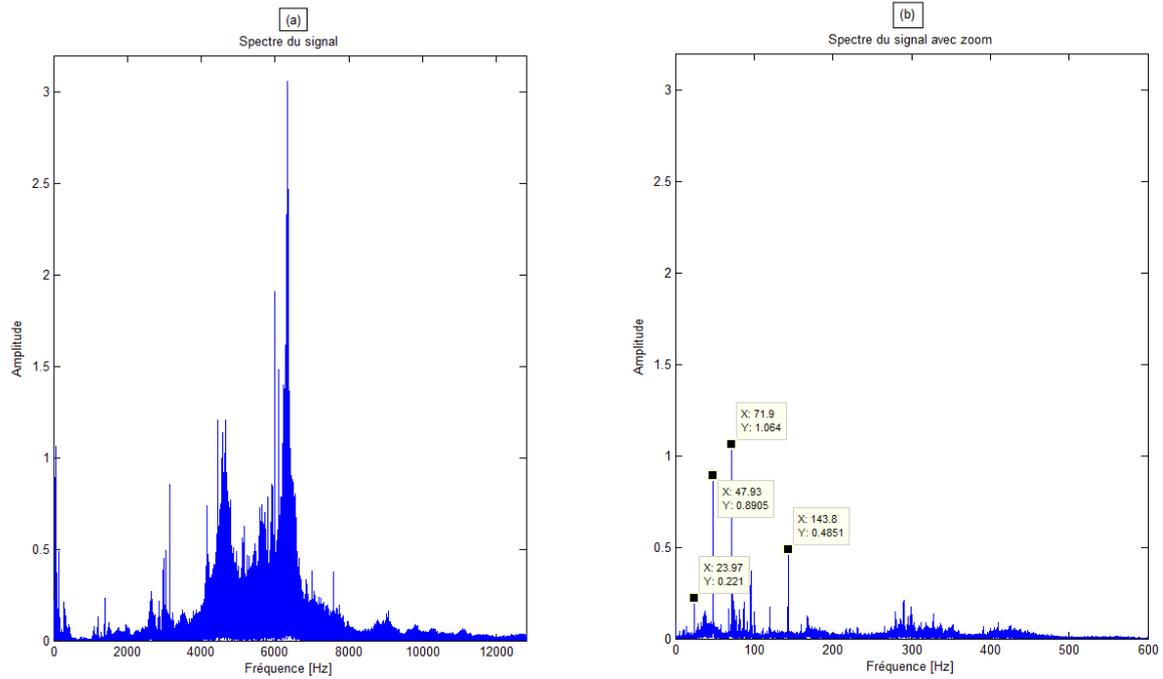


Figure (IV.13) : Analyse spectrale du signal (#3) mesuré à la sortie de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre.

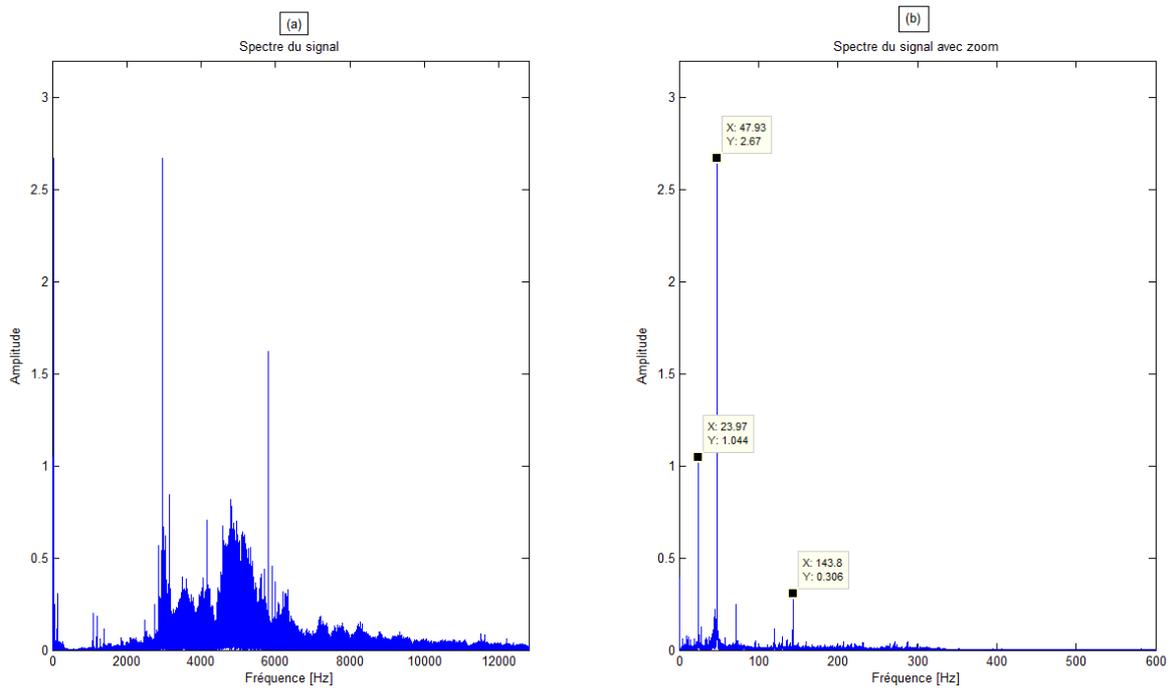


Figure (IV.14) : Analyse spectrale du signal (#4) mesuré sur la volute de la pompe : (a) spectre et (b) zoom sur ce spectre.

Conclusion

Toutes les machines tournantes produisent des vibrations qui sont fonction de la dynamique de ces machines, la mesure de vibration constitue un paramètre intéressant pour la maintenance des machines tournantes. Elle est basée sur la détection des différents défauts pouvant affecter la machine, et le suivi de l'évolution de ces derniers. Ces défauts peuvent être de différentes origines : mécanique, hydraulique, magnétique ou électrique...etc.

Le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par les machines en fonctionnement, plusieurs techniques de traitement de ces signaux se sont développées dont l'analyse spectre de fréquence apparait dans la majorité des cas, comme la plus efficace.

Dans ce chapitre, nous avons étudié plusieurs signaux réels qui décrivent l'état de fonctionnement de certains organes électromécaniques d'une machine tournante (moteur, réducteur et pompe). Et la manière d'analyser les vibrations générées en utilisant des outils classiques à savoir l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe.

Après exploitation de ces méthodes de diagnostic vibratoire sur une machine tournante, on peut dire que l'analyse vibratoire est la meilleure méthode de surveillance car elle nous permet de détecter l'anomalie et d'identifier le défaut dans un stade précoce avec des mesures simples mais il est possible aussi de réaliser un diagnostic encore approfondi pour en connaître l'origine du problème, et ce en utilisant des techniques plus avancées de traitement du signal.

Conclusion générale

Les machines tournantes représentent une classe dominante, dans les systèmes de production, et peuvent occuper des positions stratégiques. La surveillance de leurs états de fonctionnement présente donc un intérêt primordial, afin d'atteindre les objectifs visés par l'entreprise.

En maintenance préventive, la détection précoce d'un défaut constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques d'analyses vibratoires des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. L'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la technique la plus connue et la plus utilisée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes sans démontage de la machine en prélevant le signal vibratoire à l'aide des capteurs de vibration. Le contenu fréquentiel des vibrations de cette analyse est une information clé pour le diagnostic des défauts sur les machines tournantes et pour la caractérisation de la dynamique des structures.

Les résultats expérimentaux obtenus sont clairs et efficaces, nous a permis de mettre en œuvre un bilan complet sur l'état de santé de la machine et permettes au futur d'améliorer les compétences pratiques, de gagner du temps et de rentabiliser l'unité de production.

Cette méthode présente plusieurs avantages tels que :

- Détecter les défaillances à un stade précoce
- Réduire les couts de maintenance
- Augmenter la disponibilité des équipements
- Fiabiliser l'outil de production
- Planifier les interventions et organiser le stock

Notre travail est dans le cadre de l'amélioration de la maintenance préventive conditionnelle, et dans cet objectif, on a étudié les différents types de défaillances pouvant se passer au niveau des machines tournantes ainsi les méthodes classiques de traitement de signal (analyse spectrale et enveloppe).

Et à partir de cette étude, on peut dire que :

- L'analyse spectrale, la plus ancienne technique et malgré ça c'est la meilleure sans concurrent et surtout dans les cas simples (défaut électrique, engrenage, pompe, ...).
- L'analyse d'enveloppe classée parmi les techniques les plus intéressantes aussi, surtout avec les défauts sur les roulements, où elle porte l'avantage de démoduler un signal de mesure et d'extraire les composantes caractérisant un défaut.

Bibliographie

- [1] Reland BIGRET et Jaque-louis FERON « Diagnostic-maintenance-disponibilité des machines tournantes.1995.
- [2] Abla Bouguerne. Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones. Université Mentouri Constantine Faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. Juin 2009.
- [3] Christophe Boutry, Cours « Technologies des pompes ». Site consulté le 20 avril 2019 : https://christophe.boutry.pagesperso.orange.fr/site/cours_files/technologie%20des%20pompes.pdf
- [4] KARA Omar Abdoullah (2011): « Etude théorique et expérimental de performance de pompes centrifuges ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme De master en Hydraulique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF ORAN.
- [5] Florestan MATHURIN ; Eléments de transmission mécanique - partie 1- ; Lycée Bellevue Toulouse.
- [6] Jean Héng. Pratique de la maintenance préventive © Dunod, paris,2002 isbn 2100065610.
- [7] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entrespaires," Thèse de doctorat, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [8] I. KHELFI, "Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle" thèse de doctorat, Université BADJ MOKHTAR –ANNABA, 2013.
- [9] Landolsi Foued. Cours de techniques de surveillance « Etude des principaux défauts ».
- [10] A. Boulenger et C. Pachaud. Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations. Dunod, Paris, 2009. ISBN 9782100541904.
- [11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Site consulté le 5 mai 2019 :

http://yann.marchesse.free.fr/Site/Enseignements_files/MecaniqueDesFluides.pdf

[15] D. Augeix, « Analyse vibratoire des machines tournantes », *Technique d'ingénieur, traité Génie Mécanique*, BM 5145, EDITION 2000.

[16] Augeix D., "Analyse vibratoire des machines tournantes", *Techniques de l'ingénieur*, BM5-145, 2001.

[17] Y. IMAOUCHEN "mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes" thèse doctorat, à l'université de Bejaia, 2015.

[18] 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.

[19] 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.

[20] O. DJEBILI "Contribution A La Maintenance Prédictive Par Analyse Vibratoire Des Composants Mécaniques Tournants. Application Aux Butées A Billes Soumises A La Fatigue De Contact De Roulement" Thèse De Doctorat, Soutenue Le 26 Septembre 2013 A Université De Reims Champagne Ardenne.

[21] Kedadouche M., Thomas M. et Tahan A., *Monitoring Machines by Using a Hybrid Method Combining MED, EMD and TKEO*, *Advances in Acoustics and Vibration*, vol. 2014, ID592080, 2014.

[22] M. El Badaoui. *Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale*. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet St Etienne préparée au LASPI, Juillet 1999.

[23] Base de données « Data-acoustics ».

Site consulté le 01 juin 2019 : « http://data-acoustics.com/measurements/c_pump/ »

Résumé :

Malgré l'accélération technologique surtout dans le Domaine industriel, les machines tournantes conservent toujours leurs places et leur poids dans les installations. Et pour cela il faut développer et améliorer la fonctionnalité et la capacité de prévision des défauts pour éviter de causer des arrêts non programmés sur notre machine ce qui est synonyme de perte de productivité. Dans ce travail nous proposons, dans le domaine de la maintenance prédictive, une méthodologie appliquée pour l'analyse vibratoire de certains équipements, dont (défaut sur les roulements, défaut d'engrenage, défaut de stator...), c'est ce qui va nous aider à déterminer avec précision les pannes pour ensuite pouvoir les réparés. Les résultats obtenus étaient claires et effectives ce qui va nous permettre, à l'avenir, d'observer l'état des équipements, de développer des compétences professionnelles, de gagner du temps et de rendre l'unité de production plus rentable.

Mots clés : l'analyse vibratoire, les machines tournante, maintenance prédictive, unité de production.

Abstract:

Despite the acceleration of technology especially in the industrial field, rotating machines still hold their position and their weight in the facilities. Then we need to develop and improve the functionality and the ability to predict the defects before causing unscheduled breakdowns on our machine which is synonym of loss of productivity. In this work we propose, in the field of predictive maintenance, a methodology for vibration analysis, of some equipment's including (default on the bearings, default on the gearing, and default on the stator...); this is what will help us to accurately determine problems.

The results were clear and effective which will allow us, in future, to observe the state of the equipment, to develop professional skills, to save time and make the most profitable production units.

Key words: vibration analysis, rotating machinery, predictive maintenance, production unit.

ملخص:

بالرغم من التسارع التكنولوجي الحاصل في المجال الصناعي تبقى الآلات الدوارة دوما ركيزة المنشآت الصناعية لذا وجب تحسين فاعليتها وتطوير قدرتها على التنبؤ بالعطب قبل وقوعه لتجنب الإخلال بعملية الإنتاج والمردودية.

في هذا العمل المنجز نطرح منهجية تطبيقية للتحليل الاهتزازي في مجال الصيانة التنبؤية لبعض المعدات من بينها (الاضرار في المتدحرجات، عطب في التعشيق، الاضرار في الثابت....). وهذا ما ساعدنا على بالنسبة للنتائج التي تحصلنا عليها فقد كانت واضحة وفعالة تمكنا من تحديد العطب بدقة. توضيح الحالة الصحية الكاملة للمعدات وتساعد في المستقبل على تطوير الكفاءات المهنية وكسب الوقت وجعل الوحدة الإنتاجية أكثر مردودية.

الكلمات الدالة: التحليل الاهتزازي، الآلات الدوارة، الصيانة التنبؤية، الوحدة الإنتاجية.