

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme Master en Électromécanique

Thème

**Aide à la surveillance et au
diagnostic d'une éolienne**

Préparé par :

Mr. REZAIGUI Abdelhamid

Mr. BEGHADAD Rahim

Soutenu le 02 juillet 2019

Devant le jury :

Mr AMRI

Mr AIT MOKHTAR

Mr IMAOUCHEN

Président

Examineur

Encadreur

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

Toutes nos reconnaissances pour vous.

Aux membres du jury, pour accepter d'examiner et de juger notre travail.

Pour terminer- last but not least- nous tenons à remercier toutes nos familles, nos collègues et nos amis qui nous ont aidé et qui nous ont apporté leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A ma chère sœur

A mon cher frère

Sans oublier tous mes amis(e) et tous ceux qui me sont chers.

Abdel Hamid

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, à mes chers frères et mes chers grands parents, qui m'ont soutenus et encouragés durant toutes mes études. Nulle chose ne récompensera leurs sacrifices, Que dieu les garde pour nous.

Je dédie ce travail également :

A tous les membres de ma famille paternelle et maternelle qui m'ont aidé de plusieurs manières durant les longues années de ma formation, Qu'ils me pardonnent pour mon manque de disponibilité et mes absences. Que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers vous.

A tous mes chers amis qui m'ont encouragé et suivi depuis longtemps, à l'équipe DDOOPP, aux membres de l'association Izeghmar et sans oublier le groupe l'Étoile Des Cimes.

A tous mes enseignants depuis le cycle primaire jusqu'à l'université, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Rahim

Sommaire

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Défaillance dans les systèmes de production de l'énergie éolienne	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Descriptif d'une éolienne.....	3
I.3 Principaux composants d'une éolienne.....	4
I.3.1 Le mât.....	4
I.3.2 Le rotor.....	4
I.3.3 La nacelle.....	4
I.3.3.1 Les différents composants d'une nacelle.....	5
I.4 Fonctionnement d'une éolienne.....	6
I.5 Différentes défaillances dans les systèmes éoliens.....	6
I.5.1 Les défaillances du contrôle électrique.....	6
I.5.2 Défaillances du système d'orientation.....	6
I.5.3 Les défaillances de la boîte de vitesses.....	7
I.5.4 Les défaillances du réseau.....	7
I.5.5 Défaillances des systèmes hydrauliques.....	7
I.5.6 Défaillances des pales.....	7
I.5.7 Défauts dans les génératrices électriques.....	8
I.6 Techniques de diagnostic fréquemment utilisées.....	8
I.6.1 Les méthodes de diagnostic externes.....	8
I.6.1.1 Méthode de diagnostic par traitement du signal.....	9
I.6.1.2 Diagnostic par reconnaissance de formes.....	9
I.6.1.3 Réseaux de neurones.....	9
I.6.2 Méthodes de diagnostic internes.....	10
I.6.2.1 Méthode d'estimation paramétrique.....	10
I.6.2.2 Méthodes de modèle.....	10
I.6.2.3 Observateurs d'état.....	10
I.7 Conclusion.....	11

Chapitre II : Diagnostic vibratoire des systèmes à énergie éolienne

II.1 Introduction	12
II.2 Les différents types de défauts dans une éolienne.....	12
II.2.1 Boite de vitesse	12
II.2.1.1 Défaut de roulement	12
II.2.1.2 Défaillance de l'engrenage	14
II.2.1.2.1 La corrosion	14
II.2.1.2.2 La fatigue de contact.....	14
II.2.1.2.3 Les fissures en fatigue	14
II.2.2 Défaillance de la génératrice électrique	15
II.2.2.1 Les défauts statoriques	15
II.2.3 Autres défaillances.....	16
II.2.3.1 Balourd	16
II.2.3.2 Désalignement.....	17
II.3 L'analyse vibratoire.....	17
II.3.1 Objectif	17
II.3.2 Techniques d'analyse vibratoire	17
II.3.2.1 Analyse temporelle.....	17
II.3.2.2 Analyse fréquentielle.....	18
II.3.2.2.1 L'analyse de l'enveloppe	18
II.3.2.3 Temps- fréquence	19
II.3.2.4 Temps-échelle	19
II.3.2.4.1 La transformée en ondelettes	19
II.4 Conclusion	20
 Chapitre III : Simulation des signaux vibratoires	
III.1 Introduction	21
III.2 Simulation signal d'engrenage	21
III.3 Simulation signal de roulement.....	23
III.3.1 A vitesse de rotation constante	23
III.3.2 A vitesse de rotation variable	25
III.4 Conclusion.....	27

Chapitre V : Application aux signaux vibratoires réels

IV.1 Introduction	28
IV.2 Détection de défaut de court-circuit	28
IV.2.1 Machine sain (sans défaut)	29
IV.2.2 Signal avec défaut de court-circuit	29
IV.3 Détection des défauts d'engrenage	31
IV.3.1 Description du banc d'essai	31
IV.3.2 Cas sans défaut	32
IV.3.3 Cas avec défaut	34
IV.4 Détection défaut de roulement	34
IV.4.1 Banc d'essais de l'ÉTS	34
IV.4.2 Cas de vitesse de rotation constante	35
IV.4.3 Cas de vitesse de rotation variable	36
IV.4.3.1 Au démarrage	36
IV.4.3.2 A l'arrêt	37
IV.5 Conclusion	39
Conclusion Générale	40

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principe de conversion de l'énergie éolienn.....	3
Figure I.2 : Les éléments d'une éoliennes.....	4
Figure I.3: Structure d'une nacelle.....	5
Figure I.4 : Les différentes méthodes de diagnostic	8

Chapitre II

Figure II.1 : Roulement à bille	13
Figure II.2: Corrosion – Piqures – Fissure	15
Figure II.3: dégât provoqué par les défauts de courts-circuits statoriques.....	16
Figure II.4: Représentation du balourd	16
Figure II.5 : Représentation des deux défauts de désalignement	16
Figure II.6: (A) le signal simulé $s_2(t)$, (B) son enveloppe, (C) son spectre, et (D) spectre de son enveloppe.....	19

Chapitre III

Figure III.1: (A) Signal simulé avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe.....	22
Figure III.2: composantes de signal simulé de roulement.....	24
Figure III.3: signal d'un défaut de roulement simulé, (A) sans bruit et (B) avec bruit.....	24
Figure III.4: (A) spectre du signal simulé, (B) spectre de son enveloppe.....	25
Figure III.5: variation de fréquence de défaut.....	25
Figure III.6: (A) signal simulé de roulement avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe	26
Figure III.7: TFR de signal $S(t)$ avec la méthode transformée en ondelettes.....	26

Chapitre IV

Figure IV.1: (A) Signal mesuré de la machine sain (sans défaut), (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe.....	29
Figure IV.2: (A) Signal mesuré avec défaut de CC, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe	30
Figure IV.3: pignon d'un multiplicateur de l'éolienne avec défaut	31

Figure IV.4: (A) Signal mesuré sans défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe.....	32
Figure IV.5: (A) Signal mesuré avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe.....	33
Figure IV. 6: Banc d'essai.....	34
Figure IV.7: (A) Signal mesuré avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe ...	35
Figure IV.8: (A) Signal mesuré au démarrage, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe	36
Figure IV.9: TFR du signal, transformée en ondelette.....	37
Figure IV.10: (A) Signal mesuré à l'arrêt, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe	38
Figure IV.11: TFR du signal, transformée en ondelette.....	39

Liste des Tableaux

Tableau 1: Données du système à engrenage du signal simulé.....	22
Tableau IV.1: paramètres de teste et de machine utilisée	28

Abréviation et notation

RNA : Réseaux de neurones artificiels

TF : transformée de fourrier

TH : Transformée de Hilbert

TRF : Représentation temps-fréquence

TO : transformée en ondelettes

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles.

Ces dernières années, l'intérêt pour l'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi les principaux modes de production d'énergie électrique renouvelable, on trouve l'énergie éolienne, qui est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire.

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en mouvement mécanique, puis en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

Les composants d'une éolienne sont susceptibles de présenter des défauts, si ces derniers ne sont pas détectés au bon moment peuvent facilement être amplifiés et accélérer leur détérioration ou leur vieillissement, il est donc important de détecter d'une manière précoce ces défauts qui peuvent apparaître, puis de les localiser le plus précisément possible.

Plusieurs techniques et outils sont disponibles et utilisés pour surveiller l'état des éoliennes. Cependant, leur fonctionnement est essentiellement transitoire, par conséquent, incite au développement des techniques non-stationnaires pour la détection de défauts.

Nous proposons dans cette étude un certain nombre de méthodes d'analyse des signaux vibratoires que nous avons classés en méthodes classiques (transformée de Fourier et la transformée de Hilbert) et méthodes avancées où l'on retrouve transformée en ondelettes. Ces méthodes sont utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts d'une éolienne, défauts principalement liés aux roulements à billes.

Ce mémoire est structuré comme suite :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur l'éolienne ensuite les différentes défaillances de ses composants et l'état de l'art sur les différentes méthodes de diagnostic.

Le deuxième chapitre mentionnera les différents types de défaut d'un aérogénérateur (roulements, stator de la génératrice, engrenages...), ainsi les principaux outils dédiés à l'analyse vibratoire utilisé dans la détection de défaut.

Le troisième chapitre présentera une étude sur des signaux simulés (engrenage, roulement) sur MATLAB, ainsi qu'une étude sur le cas d'un signal simulé du roulement défaillant à vitesse variable, tout en mettant la lumière sur les méthodes d'analyse d'enveloppe et la transformée en ondelettes.

Pour finir, dans le quatrième chapitre nous effectuerons une analyse détaillés sur des mesures vibratoires réelles.

CHAPITRE I

Défaillance dans les systèmes de production de l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables, la plupart est fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau et les marées.

Le vent est une énergie naturelle capable de créer l'électricité ou une force mécanique ce qu'on appelle l'énergie éolienne. L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet négatif sur l'environnement, ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce chapitre, on présentera les systèmes éoliens (descriptif d'une éolienne, principaux composants et leurs rôles, les différentes défaillances de ses composants). Ensuite on effectuera une synthèse sur les différentes techniques de diagnostic de ces systèmes.

I.2 Descriptif d'une éolienne

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique pour l'injecter dans les réseaux électriques. La vitesse de vent est la variable la plus importante pour les éoliennes [1].

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

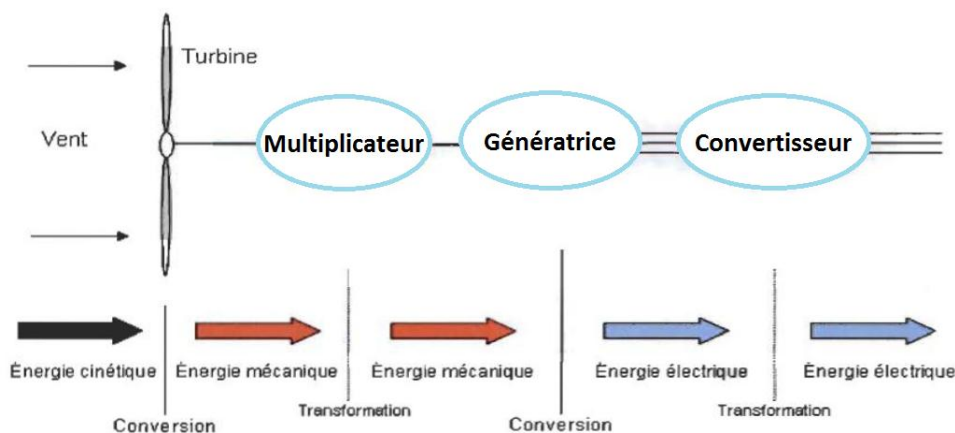


Figure I.1 : Principe de conversion de l'énergie éolienne [1]

I.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et le mât. Chacun de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement [2].

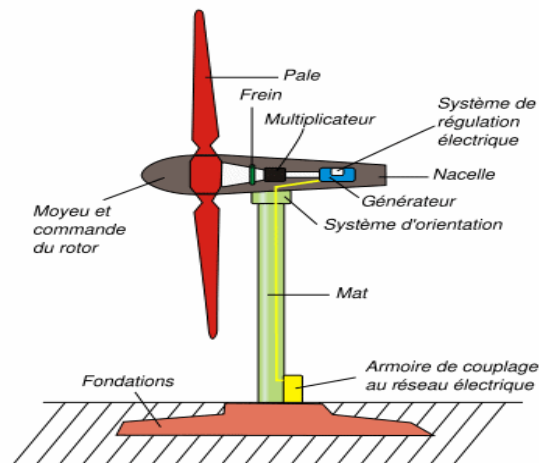


Figure I.2 : Les éléments d'une éolienne [3]

I.3.1 Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

I.3.2 Le rotor : est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.3.3 La nacelle : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [3].

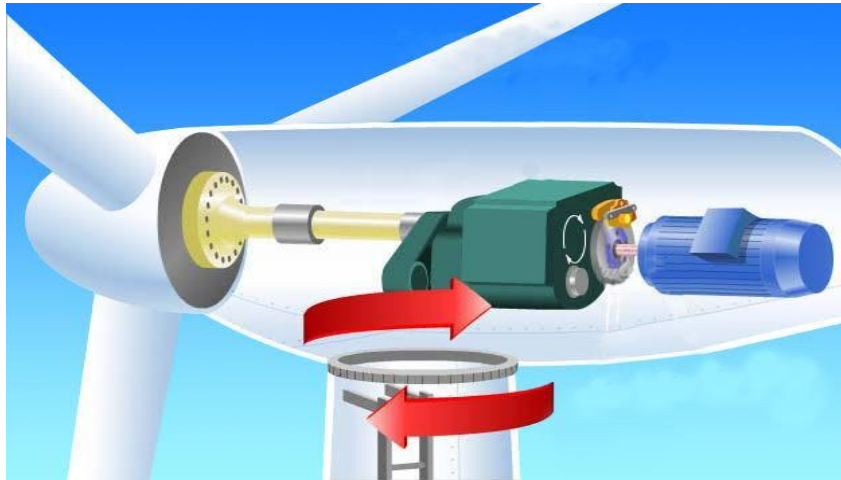


Figure I.3: Structure d'une nacelle [6]

I.3.3.1 Les différents composants d'une nacelle

- ✓ *Système de refroidissement* : Il comprend un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportent un refroidisseur à l'eau [4].
- ✓ *Le frein* : permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesse du vent trop importante qui pourraient l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor [5].
- ✓ *Multiplicateur (boîte de vitesse)* : Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). [4]
- ✓ *Générateur* : La fonction première de générateur est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone [4].
- ✓ *Dispositif d'orientation de la nacelle* : Il place la nacelle et donc les pales face au vent pour produire un maximum d'électricité [5].
- ✓ *Le système de commande* : Le système de commande, c'est le cerveau de l'éolienne. Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (ex : surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur de l'éolienne [4].

- ✓ *Centrale hydraulique* : Un contrôle continu du niveau des groupes hydrauliques est très important. En cas de niveau d'huile trop bas, l'ajustement des pales ne fonctionne plus correctement [4].

I.4 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant son transfert vers le réseau [6].

I.5 Différentes défaillances dans les systèmes éoliens

Les turbines éoliennes sont soumises à des conditions de service extrêmement variées qui peuvent, dans certains cas, pousser les diverses parties du système éolien au-delà de leurs limites. En conséquence, les statistiques des défaillances pouvant affecter les turbines éoliennes devraient être étudiées en tenant compte de deux critères, leurs fréquences et leurs temps d'arrêt provoqués ainsi que la criticité, afin d'en déduire les défaillances à prendre prioritairement en compte dans un contexte de maintenance prédictive [7].

I.5.1 Les défaillances du système électrique

Les détériorations des enroulements du générateur électrique, des transformateurs et de câblage ainsi que les courts-circuits et les surtensions de composants électroniques sont les défaillances communes de système électrique. Ces défaillances peuvent être causées par un des problèmes suivants : des foudres, les mauvaises installations électriques, des défauts techniques et des résonances au sein des circuits Résistance-Condensateur (RC) [8].

I.5.2 Défaillances du système d'orientation

Ce système contrôle l'orientation de la nacelle pour qu'elle suive la direction du vent. En général, on rencontre des problèmes de fissuration des arbres d'entraînement, des défaillances de roulement et des fixations, des fractures des engrenages. Ces défaillances sont dues à des phénomènes de givrage, de haute vibration durant les périodes de surcharge et surtout des pannes liées au fonctionnement du moteur [9].

I.5.3 Les défaillances de la boîte de vitesses

Le rôle de la boîte à vitesse est très important dans la majorité des turbines éoliennes, elle représente l'un des composants les plus fréquemment endommagés.

Les défaillances de la boîte de vitesse peuvent survenir en raison du jeu entre les dents et la coupe des dents, l'arrêt et démarrage trop fréquent de l'éolienne...

La contamination des particules étrangères dans l'huile d'engrenage peut également entraîner des ruptures de la boîte de vitesse [10].

I.5.4 Les défaillances du réseau

La grande variabilité de la force exercée par le vent en direction et en intensité est impossible à prévoir avec précision. Sans stockage d'énergie de secours ou tout autre système de production d'électricité, les défaillances du réseau peuvent se produire lors d'une consommation élevée de puissance avec une faible production d'énergie éolienne [8].

I.5.5 Défaillances des systèmes hydrauliques

Des composants hydrauliques sont utilisés dans plusieurs connections à haute pression placées dans différents endroits de l'éolienne tels que le système d'orientation, la boîte de vitesse, le système de freinage, etc. Les problèmes de fuite d'huile dans toutes ces composantes est connu comme la défaillance des systèmes hydrauliques. Elle est due essentiellement au changement fréquent de température, à la corrosion, aux vibrations, à la mauvaise conception et à la mauvaise qualité des composantes du système (durits, électrovanne, etc.). La mauvaise installation des systèmes hydrauliques est responsable de 60% des défaillances [9].

I.5.6 Défaillances des pales

Les pales sont directement responsables du transfert de l'énergie du vent en énergie mécanique grâce à leurs formes aérodynamiques. D'une manière générale on peut regrouper sous "défaillance de pales" tous les phénomènes de cassures, fissures, vibrations, ... Leurs principales causes sont: la turbulence du vent, la rotation non contrôlée, la foudre et les défauts de fabrication [9].

I.5.7 Défauts dans les génératrices électriques

Les défauts peuvent se produire dans tous les éléments de la machine électrique, comme les défaillances d'isolation de rotor, défaillances des enroulements statoriques. En effet, le roulement présente un nombre élevé de défaillances. Les défauts du roulement peuvent être causés par un mauvais choix des matériaux à l'étape de la fabrication, des problèmes de rotation au sein de la culasse, ou par un roulement abimé, écaillé ou fissuré pouvant créer des perturbations au sein de la machine et donc au sein de tout le système éolien [8].

I.6 Techniques de diagnostic fréquemment utilisées

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui permet d'identifier la cause qui provoque les défauts et à isoler les systèmes en défaut.

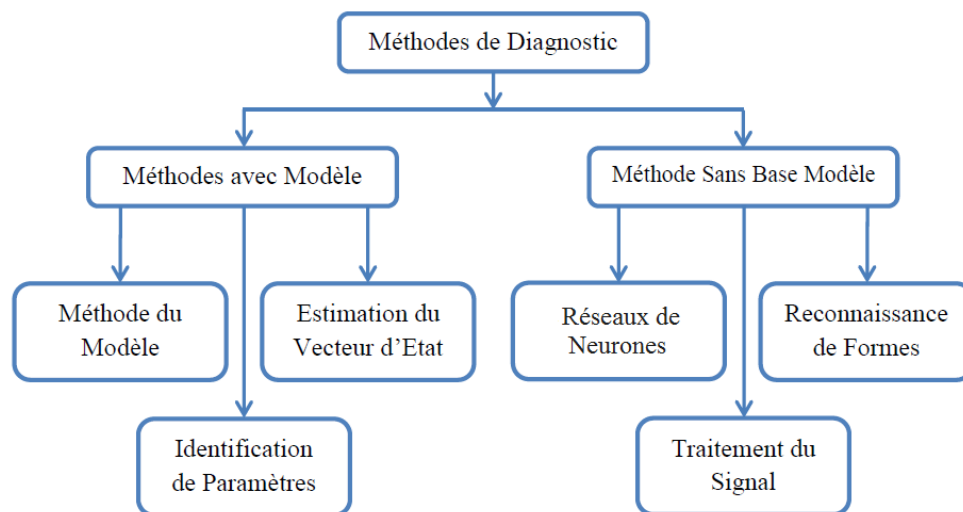


Figure I.4 : Les différentes méthodes de diagnostic

I.6.1 Les méthodes de diagnostic externes

Ces méthodes ne nécessitent pas la connaissance d'un modèle mathématique. Elles utilisent un module de reconnaissance, ce module est basé sur les observations du système. Les méthodes de diagnostic externes regroupent plusieurs familles tel-que : le traitement de signal et les méthodes fondées sur l'intelligence artificielle comme la reconnaissance des formes et les réseaux de neurones.

I.6.1.1 Méthode de diagnostic par traitement du signal

Les techniques de traitement du signal appliquées à la détection des défaillances dépendent des conditions de fonctionnement de la machine. Ces conditions peuvent être très

différentes selon que la vitesse est constante ou variable. La méthode la plus utilisée est la transformée de Fourier qui effectue l'analyse spectrale d'un signal donné. Chaque défaut a sa fréquence caractéristique propre. Ainsi une simple application de la transformée de Fourier peut localiser cette fréquence [11].

I.6.1.2 Diagnostic par reconnaissance de formes

Cette technique de diagnostic fait partie des méthodes externes. Les informations disponibles proviennent essentiellement d'une base de données composée des observations et des expériences numériques et humaines sur le système. La reconnaissance de formes est la science qui se base sur la définition d'algorithmes permettant de classer des objets ou des formes en les comparant à des formes types. Il s'agit de déterminer la forme type à laquelle une forme donnée ressemble le plus. Les méthodes de reconnaissance de formes constituent des outils importants privilégiés pour la classification automatique des signatures externes correspondant aux différents modes de fonctionnement (normaux, anormaux) d'un système [12].

I.6.1.3 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des outils statistiques de l'intelligence artificielle capables d'effectuer des opérations de classification par apprentissage. L'unité de base des réseaux de neurones est le neurone formel (ou cellule), modèle très simplifié d'un neurone biologique. Le neurone formel est conçu comme un automate doté d'une fonction de transfert qui transforme ses entrées en une sortie selon des règles précises. Il s'agit donc d'un ensemble de neurones interconnectés entre eux, organisés dans des couches successives dont chacune prend comme entrées les sorties de la précédente. Le type de connexion varie d'une architecture à une autre. Les Perceptrons Multi-couches et les Réseaux à Fonction de base Radiales sont les deux architectures les plus utilisées en surveillance industrielle.

Les RNA visent à modéliser les capacités d'apprentissage du cerveau humain. Leur principal avantage par rapport aux autres outils est leur capacité d'apprentissage et de généralisation de leurs connaissances à des entrées inconnues. Il est possible également d'implémenter les RNA dans des circuits électroniques, ce qui donne la possibilité de traitement en temps réel [12].

I.6.2 Méthodes de diagnostic internes

Ces méthodes basées sur les modèles mathématiques du système construits à partir des relations de la physique ou par des techniques d'identification. Une comparaison entre les

paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle d'un défaut. Le diagnostic dans le cas de ces méthodes s'appuie sur : l'identification de paramètres, méthodes de modèle et observateurs d'état.

I.6.2.1 Méthode d'estimation paramétrique

Le diagnostic de défaut interne (à base de modèle) peut être effectué par la technique d'identification et estimation des paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système. On dispose ainsi d'une estimation des paramètres du modèle, effectuée à partir des mesures prises sur le système et de leurs valeurs théoriques. Pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques. Comme pour les méthodes de redondance analytique, la théorie de la décision sert alors à déterminer si l'écart observé est dû à des aléas normaux du fonctionnement ou à des défaillances [13].

I.6.2.2 Méthodes de modèle

Traditionnellement, les problèmes de diagnostic ont été résolus par l'approche modèle reposant sur la comparaison de comportement réel du système avec celui fourni par un modèle très complet du système auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel. La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain du système ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement du système. Toutefois, l'obtention de modèles « classiques » est plus difficile quand les systèmes réels sont très complexes, ce qui implique un temps et des efforts vraiment importants, qui ne sont pas justifiables pour l'industrie [8].

I.6.2.3 Observateurs d'état

Les estimateurs (observateurs) d'état sont des algorithmes, basés sur un modèle du procédé. La méthode par observateurs d'état consiste à estimer les variables d'état d'un système en utilisant le modèle mathématique ainsi que des mesures ou un sous-ensemble de mesures, ce qui permet de reconstruire les sorties du système. Cette reconstruction permet d'étudier la consistance comportementale du modèle vis à vis du système réel en comparant les sorties mesurées avec celles estimées.

Par définition, un observateur (ou reconstituteur d'état) est un système ayant comme entrée les entrées et les sorties du système réel et dont la sortie converge vers une estimation des variables d'état (ou d'une partie des variables d'état) du processus. Le signal d'écart (ou l'erreur d'estimation de sortie) entre les mesures et les sorties estimées (en ligne) est utilisé comme un résidu [12].

I.7 Conclusion

La première partie de ce chapitre est consacrée aux généralités sur l'éolienne accompagnées par les différentes défaillances des composantes de l'aérogénérateur qui peut empêcher le bon fonctionnement de ces systèmes. Dans la seconde partie, on a présenté une synthèse sur les différentes techniques de diagnostic de ces systèmes qui nous permettent d'observer leurs états et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance.

Chapitre II

Diagnostic vibratoire des systèmes à énergie éolienne

II.1 Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision, il consiste à identifier avec précision et si possible d'indiquer la gravité des causes probables ayant entraîné une situation anormal. Le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par les machines en fonctionnement.

Dans ce chapitre on présentera en premier lieu les différents types de défauts dans une éolienne ensuite on parlera sur l'analyse vibratoire et ses objectifs, ainsi que les différentes méthodes de l'analyse vibratoire.

Ce travail éclaire l'importance de l'analyse vibratoire comme la technique la plus utilisé pour la surveillance et le diagnostic des défauts dans les machines en fonctionnement.

II.2 Les différents types de défauts dans une éolienne

II.2.1 Boite de vitesse

La plupart des pannes de la boite de vitesse sont causées par des défaillances d'engrenages et de roulements.

II.2.1.1 Défaut de roulement

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente (figure.II.1). Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), etc. Tous ces défauts se traduisent par une perte de métal et provoquent des chocs répétés des billes sur la cage de roulement.

Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage et puis à la ruine du roulement. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Celles-ci correspondent aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut. Elles sont données en écrivant que les vitesses aux points de contact entre billes et bagues sont nulles. Elles dépendent du diamètre des éléments roulants (d), du diamètre moyen du

roulement (D), du nombre d'éléments roulants (N), de l'angle de contact (φ) et de la fréquence de rotation relative entre les bagues intérieure et extérieure (f_r). Elles sont données par les formules [14] :

- Fréquence d'un défaut localisé sur la bague externe du roulement

$$f_{be} = \left(\frac{N}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \tag{II.1}$$

- Fréquence d'un défaut localisé sur la bague intérieure

$$f_{bi} = \left(\frac{N}{2}\right) f_r \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \tag{II.2}$$

- Fréquence d'un défaut localisé sur un élément roulant

$$f_b = \left(\frac{D}{d}\right) f_r \left[1 - \left(\left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right)^2\right] \tag{II.3}$$

- Fréquence d'un défaut de cage

$$f_c = \left(\frac{1}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \tag{II.4}$$

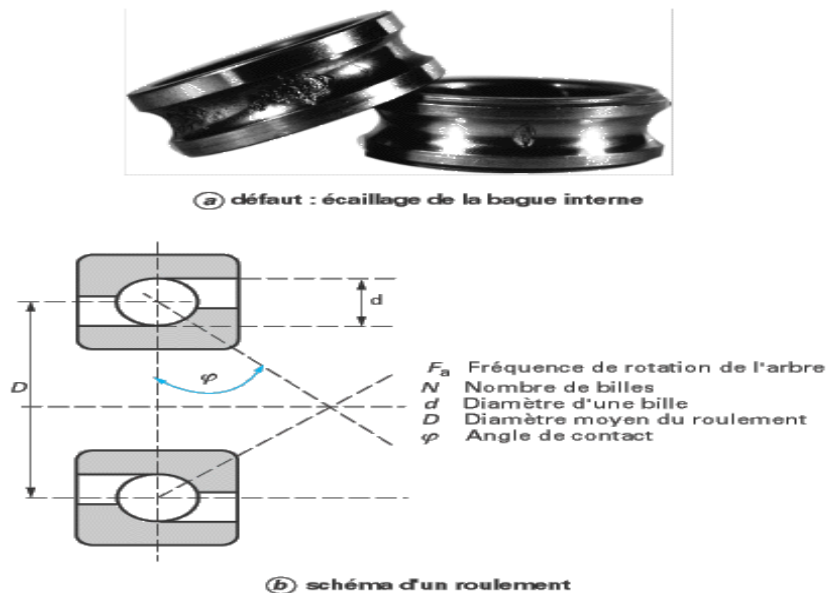


Figure II.1 : Roulement à bille [14]

II.2.1.2 Défaillance de l'engrenage

Un engrenage est un système mécanique composé de deux roues dentées qui assure la transmission du mouvement de rotation entre elles.

Au début du fonctionnement d'engrenages, c'est-à-dire pendant la période de rodage, les légères imperfections des profils des dents disparaissent progressivement. Après un certain temps, si l'engrenage reste dans un bon environnement de fonctionnement sous des bonnes conditions, l'usure des dentures va rester faible. Sinon lorsque les conditions de fonctionnement se dégradent, il est possible d'observer des détériorations sur les surfaces actives des dents [15].

Les défauts d'engrènement peuvent être causés par :

II.2.1.2.1 La corrosion

Ce type de défaut se manifeste sur le flanc des dents par la présence des taches colorées entre le brun et le rouge accompagnées par des légères irrégularités de surface autour de ces taches. Pendant l'engrènement, les traces de rouille ou d'oxydes continuent de se déplacer sur tout le flanc ce qui pourrait entraîner une usure dans la dent. Cette usure va augmenter le jeu entre les dents par la suite.

II.2.1.2.2 La fatigue de contact

Ce type de détériorations de surfaces est le résultat de contraintes répétées à la surface ou sous couches avec des valeurs qui dépassent le support ou l'endurance des matériaux. Ce défaut se caractérise par l'enlèvement de petits morceaux métalliques et la formation de cavités avec le temps. Les conséquences de cette détérioration sont la perturbation de lubrification qui conduit à la modification de la friction, la favorisation de la rupture du film d'huile et l'initiation de la fatigue de flexion.

II.2.1.2.3 Les fissures en fatigue

Les fissures en fatigue se produisent souvent dans l'endroit où les contraintes sont maximales, dans les arrondis des pieds des dents, du côté où la dent est sollicitée en traction. Ces fissures fragilisent les dents surtout en s'incurvant pour atteindre l'autre côté de la dent, ce qui diminue la rigidité de cette dernière. Dans la plupart des cas, ce type de fissure s'initie au creux d'une piqure de contact située autour de la région de forte sollicitation en flexion.

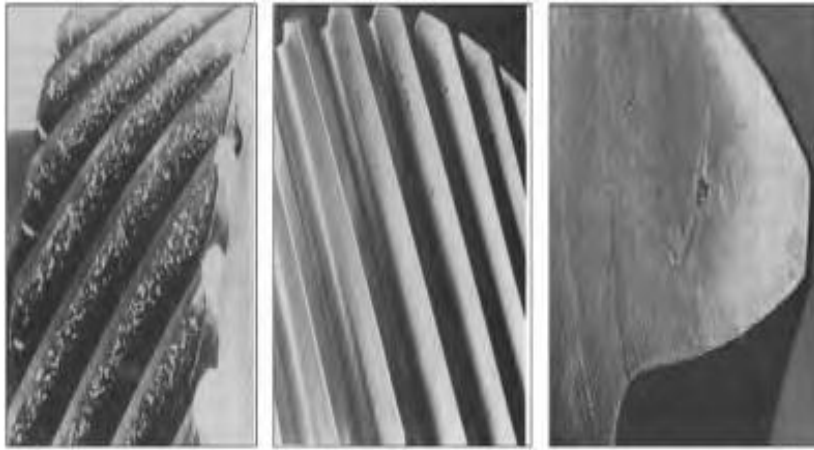


Figure II.2: Corrosion – Piqures – Fissure [15]

Un arbre tournant à une fréquence (fr) sur lequel est monté un pignon ou une roue comptant (Z) dents sera soumis à (N) chocs par tour. La fréquence caractéristique de l'engrènement sera donc :

$$fe = Z \times fr \quad (\text{II.5})$$

II.2.2 Défaillance de la génératrice électrique

Les modes de défaillance dans la génératrice électrique peuvent être classés comme des défauts électriques, parmi ces défauts :

II.2.2.1 Les défauts statoriques

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Nous pouvons citer aussi les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est le défaut le plus fréquemment rencontré au stator [16].

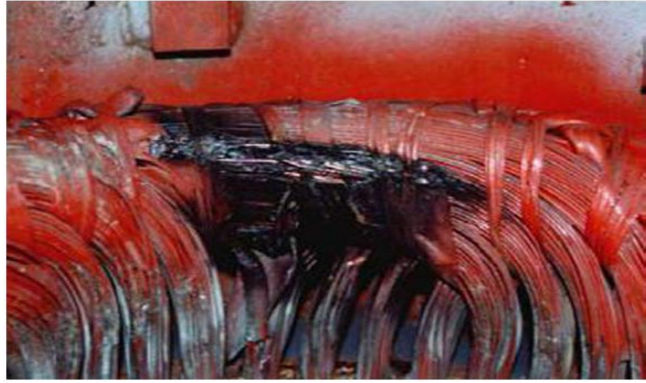


Figure II.3: dégât provoqué par les défauts de courts-circuits statoriques [11]

II.2.3 Autres défaillances

II.2.3.1 Balourd

Un balourd, représenté par la (figure II.4), est caractérisé par un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui produit des forces d'inertie, ces forces agissent sur les corps en rotation et surtout sur le roulement et excitent les paliers [17].

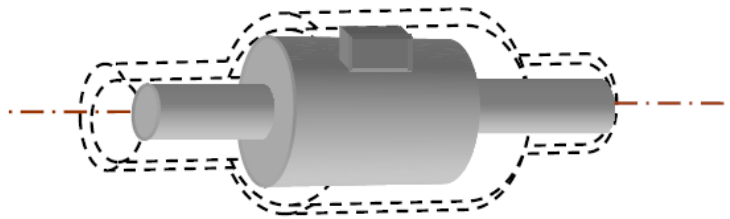


Figure II.4: Représentation du balourd [17]

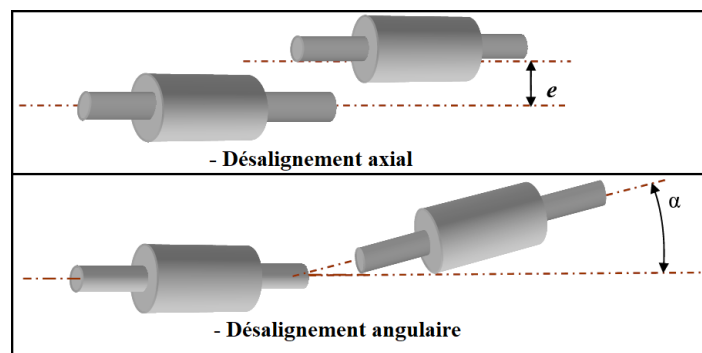


Figure II.5 : Représentation des deux défauts de désalignement [17]

II.2.3.2 Désalignement

Le désalignement est dû au fait que l'arbre menant et l'arbre mené n'ont pas le même axe de rotation. Dans la (figure II.5), nous présentons les différents types de désalignement ; désalignement axial et angulaire [17].

II.3 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes [14].

II.3.1 Objectif

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs [14] :

- 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

II.3.2 Techniques d'analyse vibratoire

II.3.2.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal.

Le nombre d'échantillons pris en compte dans le domaine doit être suffisamment élevé pour éliminer le signal individuel de tout ce qui n'est pas lié cinématiquement à la rotation de l'arbre considéré.

Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts [18].

II.3.2.2 Analyse fréquentielle

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

L'analyse conventionnelle la plus largement utilisée est l'analyse du spectre par la transformée de fourrier elle est définie par [19] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (\text{II.6})$$

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

$$E[X(f)X^*X(f)] \quad (\text{II.7})$$

Avec : $X(f)$ est la TF du signal $x(t)$, 'E' est l'espérance mathématique, et (*) dénote le conjugué complexe de $X(f)$.

II.3.2.2.1 L'analyse de l'enveloppe

Elle est basée sur La transformée d'Hilbert, qui est un outil très utilisé pour le diagnostic des machines tournantes, la TH définie par [19]:

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

L'enveloppe est l'amplitude de ce signal, elle représente une évaluation de la modulation présente dans le signal dû aux bandes latérales. Elle révèle la modulation dans les signaux causés par un équipement défectueux. De plus, elle enlève le signal porteur et cela diminue l'influence de l'information sans apport, pour le but de découverte de défauts. Un exemple de simulation est donné par la formule :

$$s_2(t) = \cos(2\pi 60t) [1 + 0.1 \cos(2\pi 3.6t) + 0.1 \cos(2\pi 7.2t) + 0.1 \cos(2\pi 10.8t)] \quad (\text{II.9})$$

Comme nous pouvons le constater, le spectre du signal $s_2(t)$ donné par la Figure II.6 (A) montre des bandes latérales de fréquences autour de la fréquence 60 Hz. Pour déterminer les fréquences de défaut, le signal est démodulé en utilisant l'analyse d'enveloppe. L'enveloppe du signal simulé est affichée sur la Figure II.6(C) et son spectre est sur la Figure II.6(D). Les trois fréquences sont facilement isolées et sont bien claires sur le spectre d'enveloppe [20].

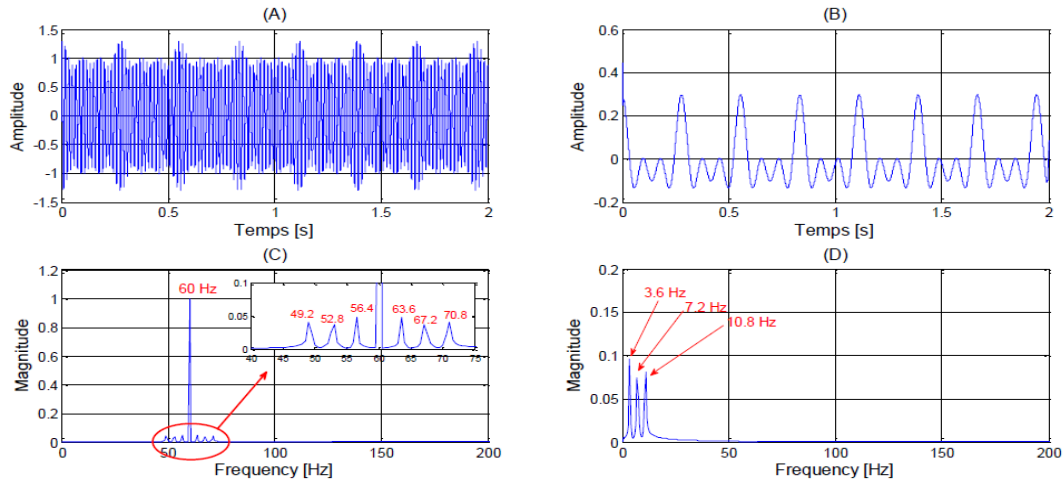


Figure II.6: (A) le signal simulé $s_2(t)$, (B) son enveloppe, (C) son spectre, et (D) spectre de son enveloppe [20]

II.3.2.3 Temps- fréquence

Les méthodes d’analyse temps fréquence ont été développées pour l’étude des signaux non-stationnaires. Cette notion de non stationnarité peut s’appliquer aussi bien à des signaux aléatoires qu’à des signaux certains. Plus généralement, elles s’appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps [18].

II.3.2.4 Temps-échelle

Cette méthode est utilisée pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence distinctes, rencontrés dans un signal. La transformation en ondelette a été formalisée par Grossman et Morlet. Cette méthode consiste à décomposer le signal à l’aide de fonctions analysantes particulières construites à partir d’une ondelette « mère » oscillante et à moyenne nulle [18].

II.3.2.4.1 La transformée en ondelettes

Lorsque le signal n’est pas quasi périodique dans le temps, la transformée de Fourier n’est plus applicable. Il faut alors recourir à un autre outil mathématique : la transformée en ondelettes (TO) donnée par :

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) w_{a,b}(t) dt \tag{II.10}$$

Avec : a et b sont les coefficients de l’ondelette.

$w_{a,b}$ L’ondelette mère.

Cette dernière permet d'étudier simultanément l'information temporelle et fréquentielle (la méthode de l'enveloppe traitant les signaux dans un domaine puis dans l'autre mais jamais simultanément) [21].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les principaux défauts apparaissant dans les éoliennes (roulements, engrenages, stator...). Puis nous avons présenté l'analyse vibratoire, et la manière d'analyser les signaux vibratoires en utilisant les méthodes de traitement de signal pour la détection de défauts à savoir ; la transformée de fourrier, l'analyse d'enveloppe et la transformée en ondelette. Il est à noter que l'analyse d'enveloppe est l'outil le plus approprié à l'analyse des signaux modulés par les fréquences de résonance de la structure.

Chapitre III

Simulation des signaux vibratoires

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des signaux simulés qui reflètent le mouvement vibratoire de quelques éléments mécanique tels que les roulements et les engrenages.

Dans la première partie nous allons étudier deux signaux, celui de l'engrenage d'une roue défectueuse et celui de roulement défectueux avec bruit et à vitesse constante. Pour ces signaux simulés nous proposons l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe.

Dans la deuxième partie, nous allons simuler un signal de roulement à vitesse variable (signal non stationnaire) ce qui empêche l'emploi de la méthode de la transformée de Fourier, pour cela nous proposons l'emploi de la méthode de transformée en ondelette qui est une manière simple pour la détection de cette anomalie et de chercher l'amplitude et la fréquence instantanée liée au défaut.

III.2 Simulation signal d'engrenage

Nous avons simulé un signal $X(t)$ d'une boîte à engrenage. En présence d'un défaut, la fréquence d'engrènement et ses harmoniques seront modulés par la fréquence du défaut correspondant à celle de la fréquence de rotation de la roue défectueuse. Le signal est donné par :

$$X(t) = \sum_{m=1}^M X_m = \sum_{m=1}^M (A_m \sin(2\pi n_1 f_1 t) (1 + C_m \sin 2\pi m f_1 t)) + B(t) + impact \quad (\text{III.1})$$

Où : M est le nombre de modulation, A_m est l'amplitude du $m^{\text{ième}}$ harmonique de la fréquence d'engrènement, C_m est l'amplitude de la $m^{\text{ième}}$ modulation en amplitude, n_1 le nombre de dents de la roue, et f_1 la fréquence de rotation de la roue.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont :

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

Impulsion de l'impact $imp = 0.08$

Phase de modulation $mp = 0.2$

Tableau 1: Données du système à engrenage du signal simulé

	Fréquence [Hz]
Nombre de dents de pignon $Z=32$	30
Nombre de dents de la roue $Z=32$	30
Première harmonique de f_e	960
Deuxième harmonique de f_e	1920
Troisième harmonique de f_e	2880
Quatrième harmonique de f_e	3840
Cinquième harmonique de f_e	4800
Sixième harmonique de f_e	5760

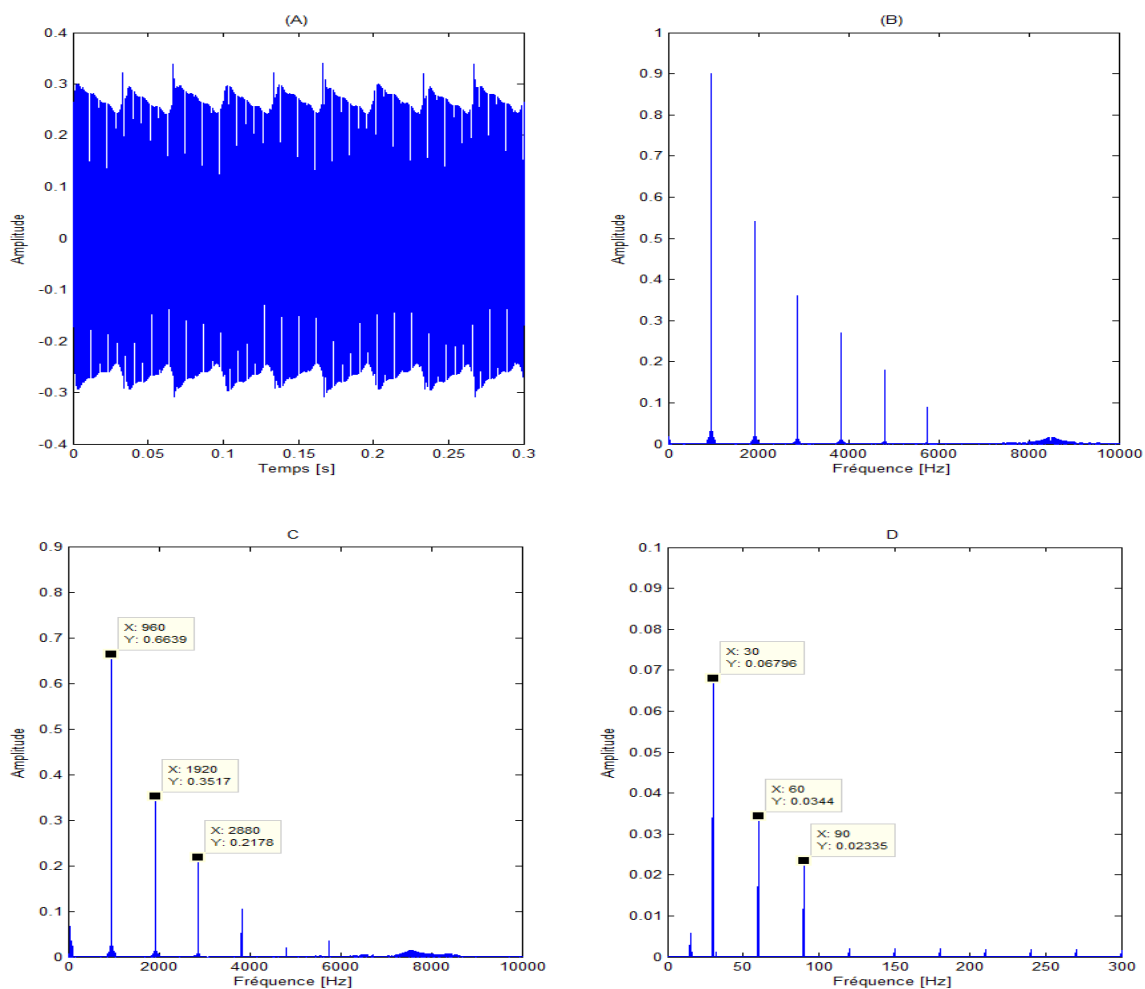


Figure III.1: (A) Signal simulé avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe

La représentation du signal simulé $X(t)$ et son spectre est donnée par la figure III.1 (A) et (B) respectivement. Sur le spectre on peut distinguer facilement la fréquence d'engrènement et ses harmoniques (960 Hz, 1920 Hz, 2880 Hz, 3840 Hz, 4800 Hz, 5760 Hz) avec les raies latérales. Les raies latérales sont séparées par la fréquence de rotation de la roue défailante (30 Hz).

Pour bien clarifier les indices du défaut, nous présentons un zoom bien déterminé sur le spectre d'enveloppe Figure III.1 (D) où il apparait une série des pics d'amplitudes correspondant aux multiples de la fréquence de rotation du pignon (30Hz), ceux-ci correspondent à la présence d'un défaut sur la roue.

III.3 Simulation signal de roulement

III.3.1 A vitesse de rotation constante

Nous avons un signal $S(t)$ simulé de défaut d'un roulement Figure III.4 (qui engendre les chocs excitant les résonances de système) avec un défaut auquel on a rajouté un "bruit blanc gaussien" au signal $S(t)$. Ce signal est décrit par :

$$S(t) = \left((\sin(2\pi \cdot 1000)) \cdot e^{-b\tau} \right) \quad (\text{III.2})$$

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 $f_d = 108 \text{ Hz}$ et $b = 555$ (coefficient d'amortissement).

Cette fonction représente les chocs répétitifs induits par le défaut de roulement; avec une fréquence d'échantillonnage de $f_e = 16000 \text{ Hz}$ et une fréquence de résonance $F_{res} = 1000 \text{ Hz}$.

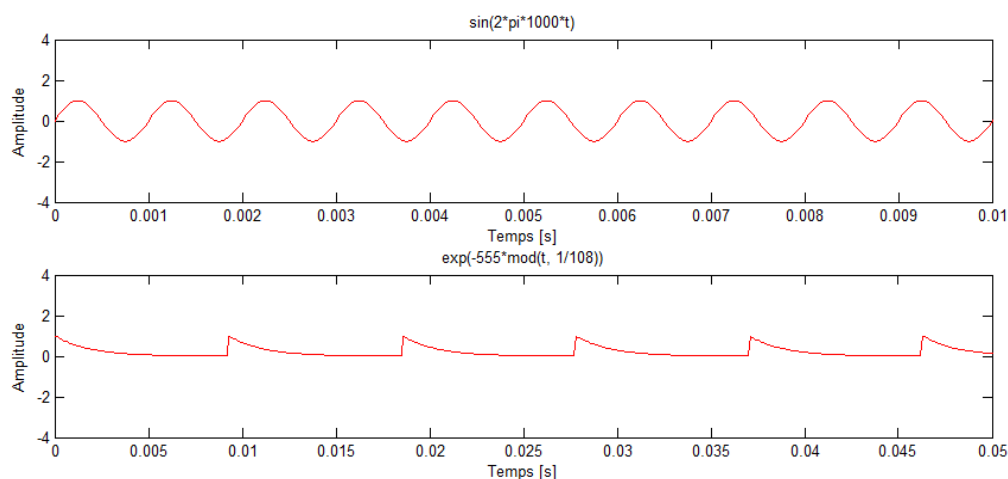


Figure III.2: composantes de signal simulé de roulement

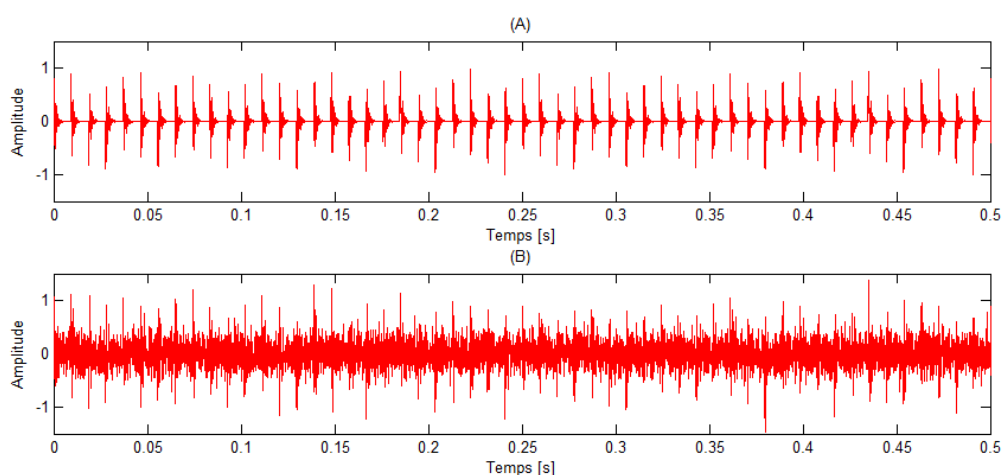


Figure III.3: signal d'un défaut de roulement simulé, (A) sans bruit et (B) avec bruit

Sur les figures III.5(A) et III.5(B), le spectre de signal et le spectre de son enveloppe respectivement. En premier lieu nous pouvons voir sur le spectre du signal simulé une bande de raies spectrales autour de la fréquence de résonance $F_{res} = 1000 \text{ Hz}$ sans identifier aucun des pics de fréquences de défaut; pour déterminer la fréquence de défaut, le signal est démodulé en utilisant l'analyse d'enveloppe. Le spectre de son enveloppe est sur la même figure III.4(B) où l'on peut clairement voir la fréquence de défaut qui est 108 Hz et ses harmoniques (multiples).

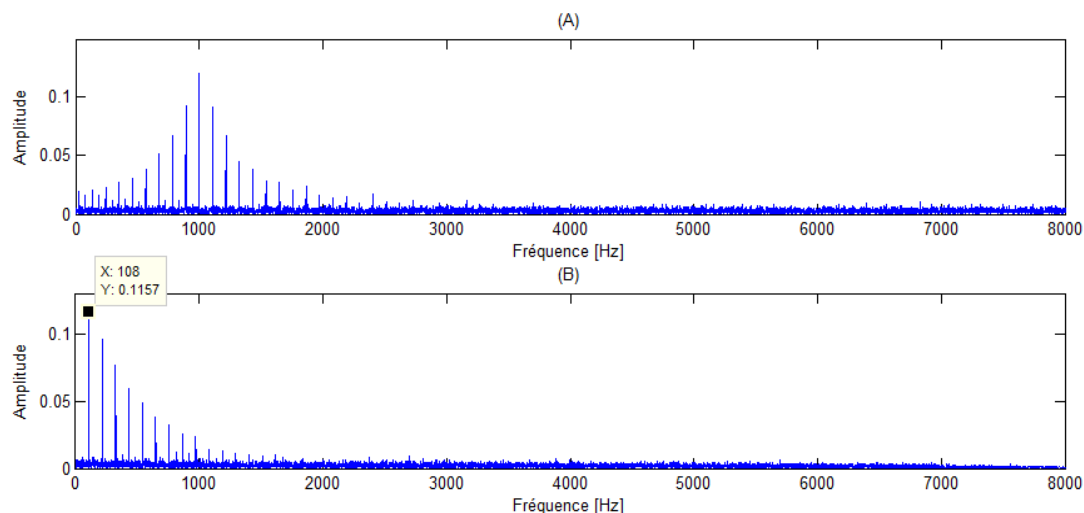


Figure III.4: (A) spectre du signal simulé, (B) spectre de son enveloppe

III.3.2 A vitesse de rotation variable

Dans ce cas nous avons simulé le même signal $S(t)$ de roulement mais avec une vitesse de rotation variable donnée par l'équation : $f_r = 4.3t^2 + 10t + 12$ (III.3)

Avec : la variation de fréquence de défaut : $f_d = 4.12f_r$

La figure III.6 montre la variation de fréquence de défaut en fonction de temps.

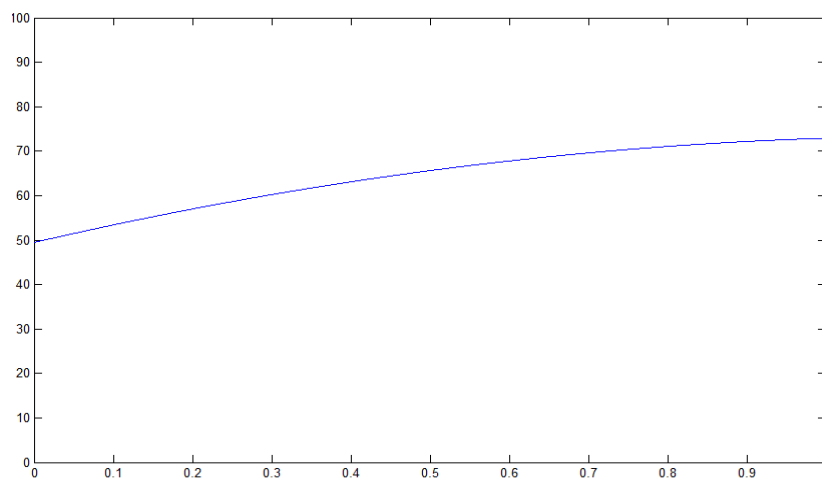


Figure III.5: variation de fréquence de défaut

La figure III.7 (A) rapporte la représentation temporelle du signal $S(t)$ qui montre des chocs espacés par des périodes de temps différentes ce qui correspond au défaut, et la vitesse de rotation qui varie. Les figures III.7 (B) et III.7 (C) représentent le spectre ainsi que son spectre d'enveloppe respectivement.

Il est évident que dans ce cas il est difficile de distinguer la fréquence de défaut à cause de la variation de la vitesse de rotation.

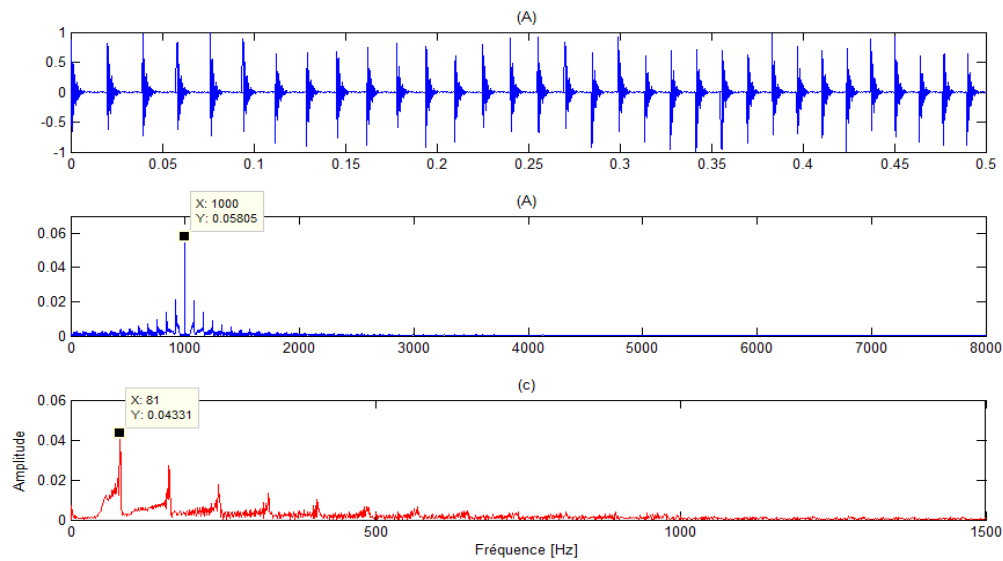


Figure III.6: (A) signal simulé de roulement avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

La figure III.8 montre la RFT du signal $S(t)$ lors de la variation de vitesse de rotation avec la méthode transformée en ondelettes (TO). Sur la figure, on voit clairement que la variation de la fréquence de défaut de roulement varie au cours de temps entre 50 Hz et 80 Hz.

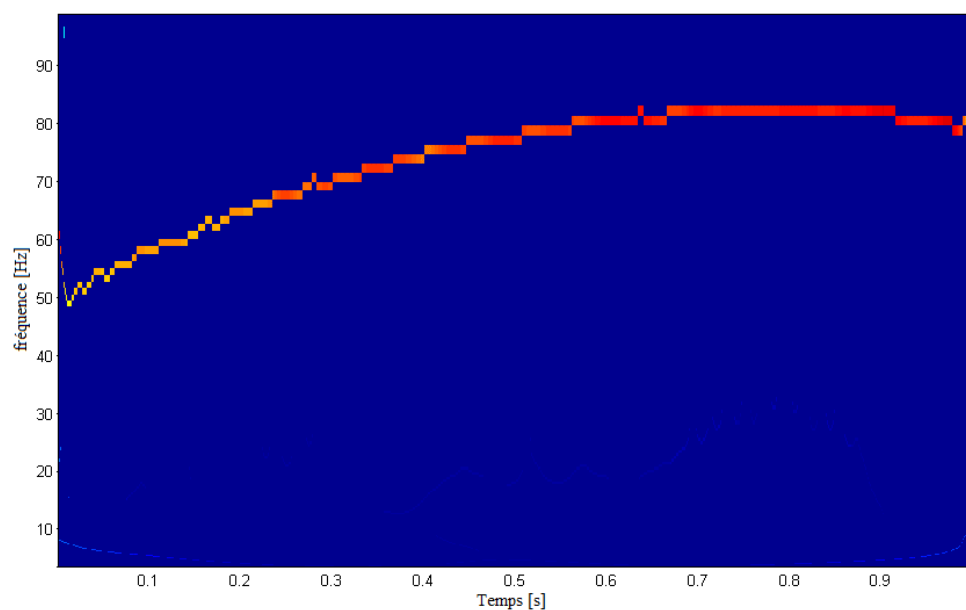


Figure III.7: TFR de signal $S(t)$ avec la méthode transformée en ondelettes

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur trois méthodes de détection de défauts, l'analyse spectrale, l'analyse d'enveloppe et la méthode de transformée en ondelette. Cette étude menée sur des exemples de simulation que nous a permis d'exposer clairement les avantages et les limitations de chaque méthodes considérée dans ce travail.

Chapitre IV

Application aux signaux vibratoires réels

IV.1 Introduction

La détection des défauts constitue l'une des étapes les plus importantes en maintenance préventive. De nos jours, beaucoup de technique d'analyse vibratoire des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs, telle que l'analyse spectrale, d'enveloppe, la transformée en ondelette... La lecture de spectre nécessite le maximum de renseignements concernant les conditions de fonctionnement du système.

Ce chapitre sera consacré à l'étude des signaux vibratoires réels qui décrivent l'état des composantes d'une éolienne. Dans la première partie, nous allons étudier les signaux de court-circuit, d'engrenage (sain et avec défaut) et de roulement avec le calcul du spectre des signaux et de leurs enveloppes. Dans la deuxième partie, nous allons traiter un signal de roulement avec défaut de bague extérieure au démarrage et à l'arrêt de la machine en appliquant la transformée en ondelette qui permet d'extraire les composantes relatives aux défauts dans ce cas.

IV.2 Détection de défaut de court-circuit

Le signal de court-circuit que nous nous sommes proposé d'étudier a été obtenue sur un banc d'essai constitué d'une machine asynchrone triphasé à deux paire de pôles, d'une puissance de 3 KW, avec accès aux spires sur le bobinage de deux phase, alimenté par le réseau (230 volts, 50 Hz).

Tableau IV.1: paramètres de teste et de machine utilisée [20]

Puissance	3kw
Nombre de paires de chaque phase	392 (196*2)
Nombre de paire de pôles P	2
Nombre d'encoches	36
Fréquence du secteur f_s	50 Hz
Fréquence de rotation f_r	24.84 Hz
Fréquence d'échantillonnage	10 kHz

Les caractéristiques du banc d'essai et les paramètres de la machine sont présentés sur le tableau IV.1 [20].

IV.2.1 Machine sain (sans défaut)

Dans ce teste, le signal est mesuré sur une machine qui est en bon état (sans défaut).

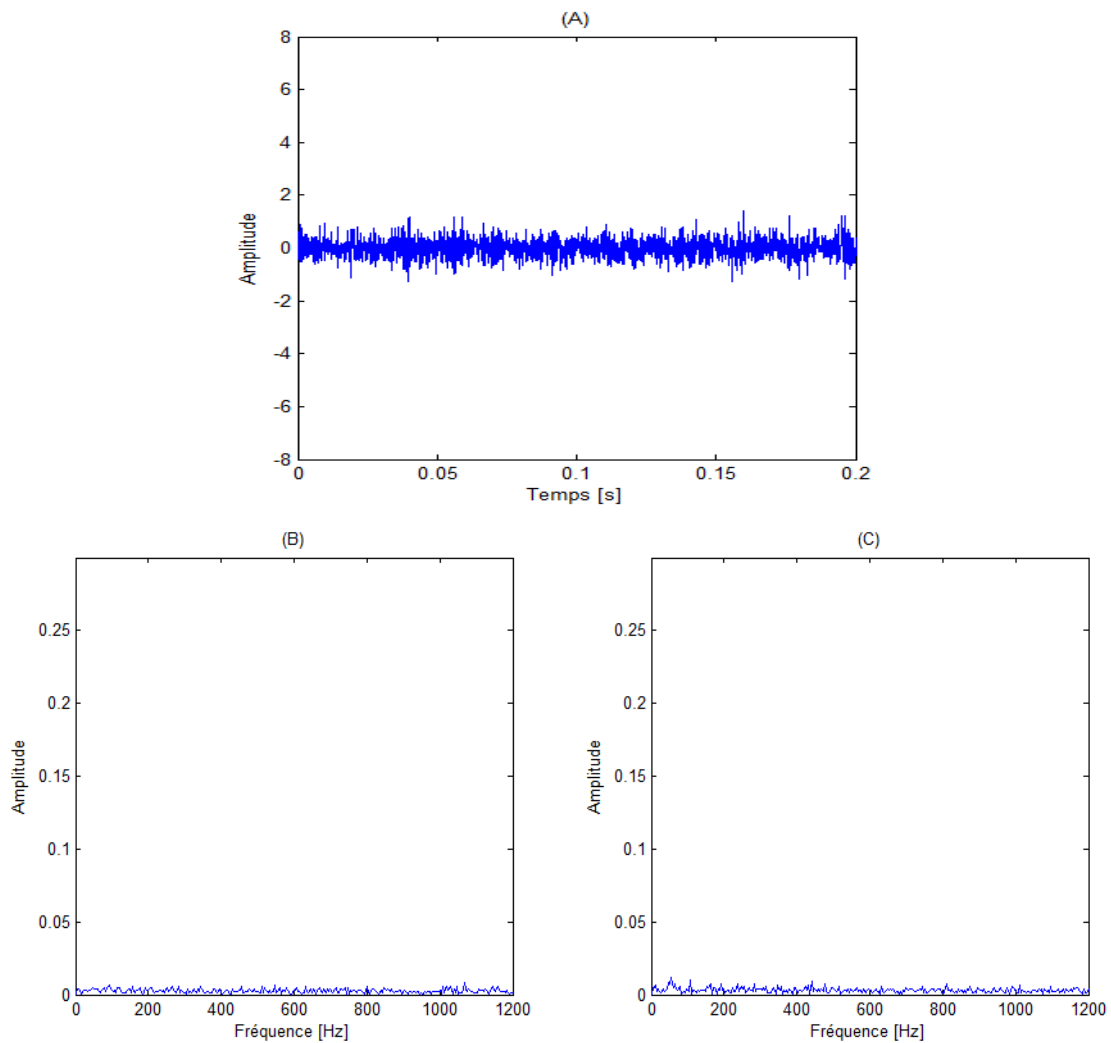


Figure IV.1: (A) Signal mesuré de la machine sain (sans défaut), (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

IV.2.2 Signal 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 d'une machine, ce signal est analysé et représenté sur la figure IV.2.

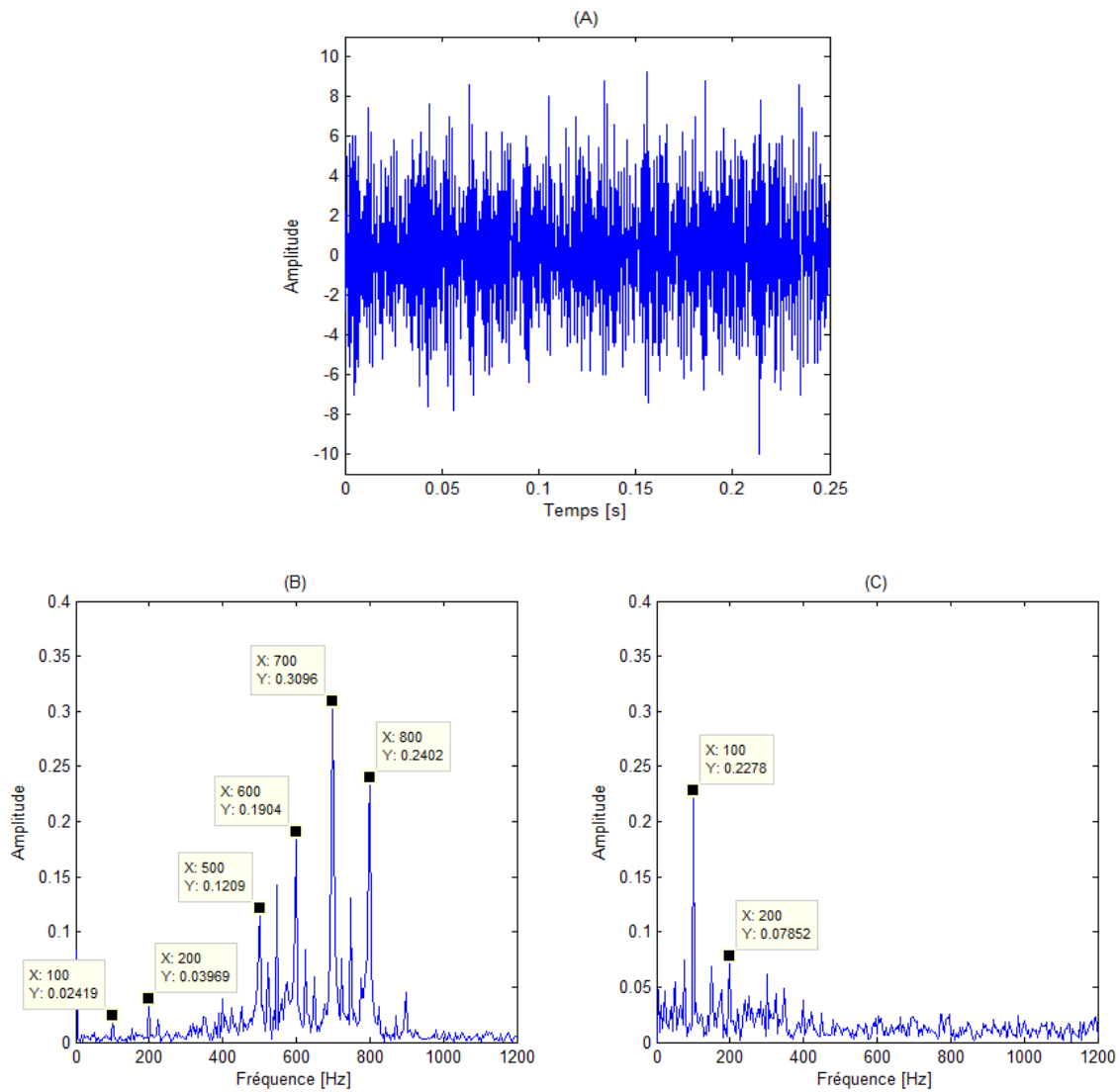


Figure IV.2: (A) Signal mesuré avec défaut de CC, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

En premier lieu, l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe du signal mesuré sur la machine saine ont donné les spectres sur les figures IV.1 (B) et (C). On remarque qu'aucun pic important n'est constaté sur le spectre ainsi que le spectre d'enveloppe ce qui confirme l'absence de défaut.

En deuxième lieu, l'analyse spectrale du signal mesuré avec défaut de CC figure IV.2 (B) montre des pics d'amplitude espacés de deux fois la fréquence d'alimentations (100 Hz), ainsi que les bandes latérales espacés de la fréquence de rotation f_r (24 Hz).

L'application de l'analyse d'enveloppe figure IV.2 (C) montre un pic d'amplitude plus important à la fréquence de défaut $f_d = 2f_s$ et deux autres harmoniques multiples de la

fréquence de défaut qui est susceptible d'augmenter en amplitude avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit.

IV.3 Détection des défauts d'engrenage

Un défaut d'engrenage est ressenti à chaque passage de la dent défectueuse à l'engrènement. Cela se traduit par l'enregistrement d'une impulsion sur le signal vibratoire qui est due au choc créé. Ainsi, la période de ces chocs sera celle de la rotation du pignon défaillant.

IV.3.1 Description du banc d'essai

Mesures de vibrations radiales prises sur le pignon d'une éolienne de 3 MW [22]. Pour le cas de défaut, les lectures initiales des vibrations indiquaient des niveaux de vibration élevés. La machine a été arrêtée au bout d'une semaine et un défaut du pignon a été détecté, comme indiqué sur l'image ci-dessous.



Figure IV.3: pignon d'un multiplicateur de l'éolienne avec défaut [22]

Une autre mesure de vibration est donnée à partir d'engrenages sans défauts. Pour l'enregistrement de ces données, le multiplicateur est composé d'un pignon de 32 dents, la vitesse de rotation de l'arbre du pignon est 1800 tr/min, soit une fréquence de rotation de 30 Hz et une fréquence d'engrènement de 960 Hz. La fréquence d'échantillonnage des mesures est égale à 97656 Hz avec une durée d'enregistrement de 6 seconds.

IV.3.2 Cas sans défaut

Le signal mesuré en absence de défaut d'engrenage ainsi que son spectre, son spectre d'enveloppe et un zoom sur le spectre d'enveloppe sont montrés sur les Figure IV.4 (A, B, C et D) respectivement.

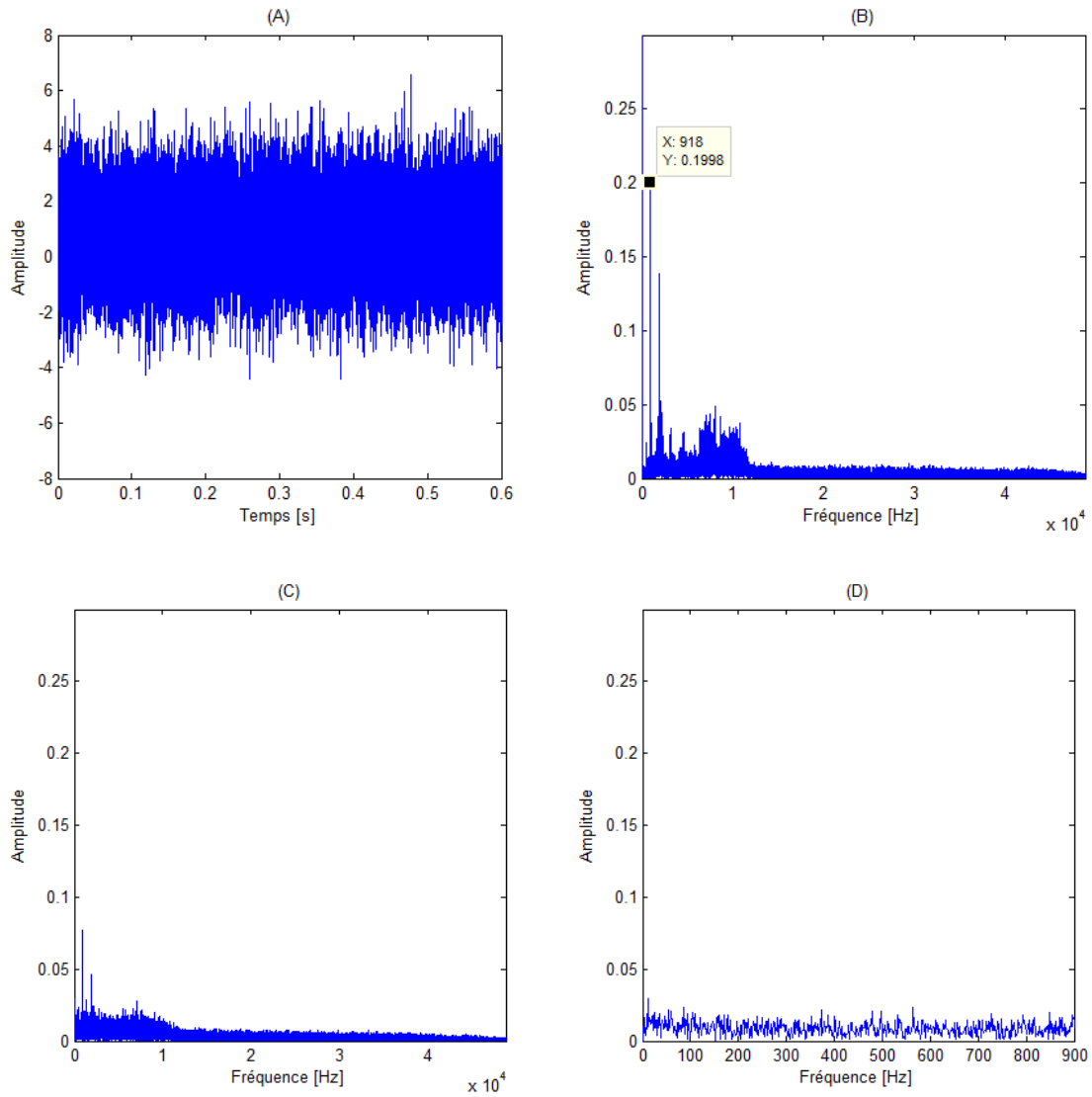


Figure IV.4: (A) Signal mesuré sans défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe

Sur le spectre Figure IV.4 (B), nous remarquons l'absence de la fréquence de défaut par contre le spectre montre l'apparition des pics à la fréquence d'engrènement et ses multiples sans aucune modulation.

Sur le spectre d'enveloppe de la Figure IV.4 (C) où on a fait un zoom sur un intervalle de fréquences présenté sur la Figure IV.4 (D), nous pouvons vérifier qu'aucun pic important n'est constaté à la fréquence de rotation du pignon suspecté, seul un léger bruit de fond est présent. Ceci confirme l'absence de défaut.

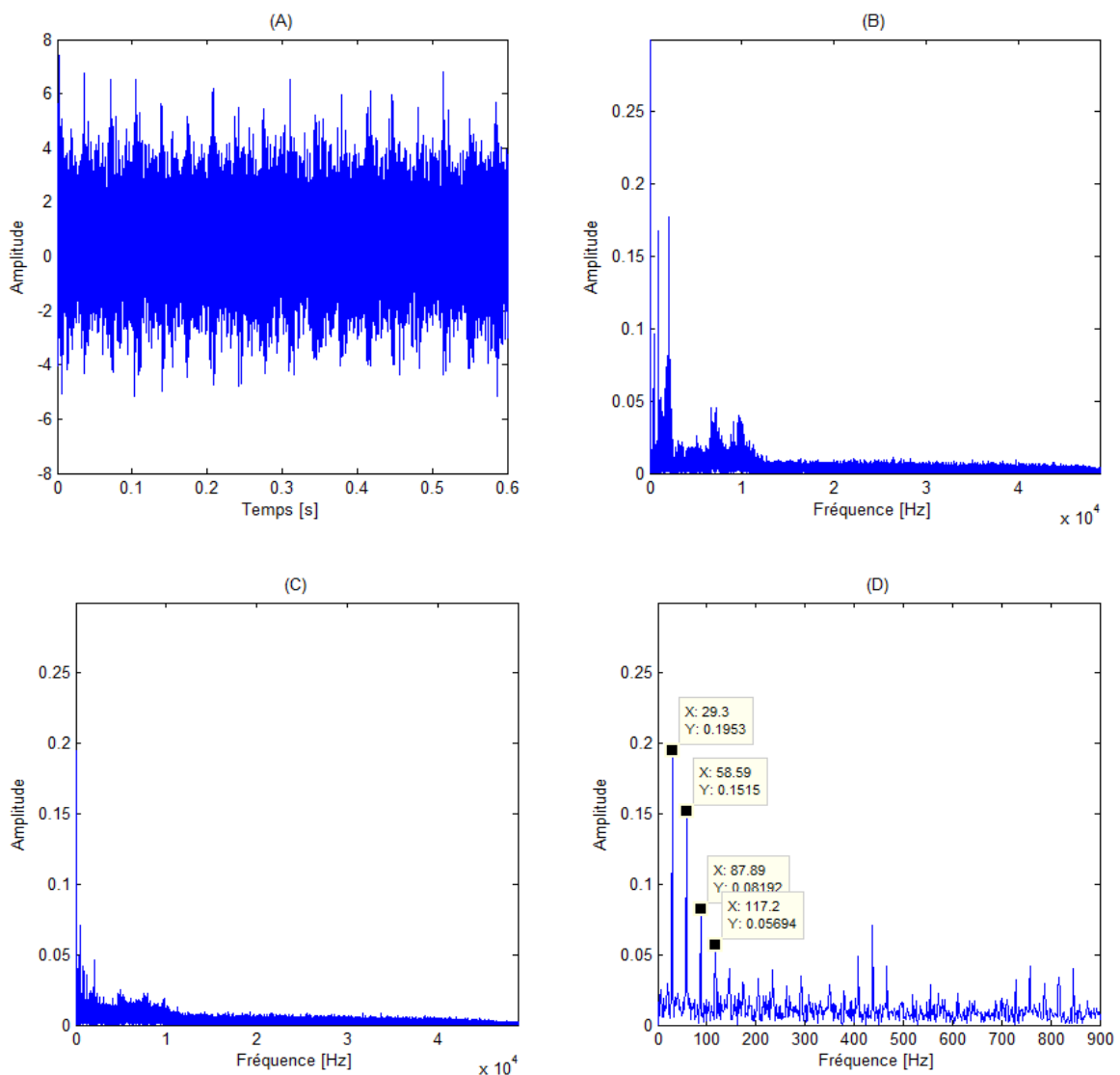


Figure IV.5: (A) Signal mesuré avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe et (D) zoom sur le spectre d'enveloppe

IV.3.3 Cas avec défaut

Le signal mesuré en présence de défaut d'engrenage ainsi que son spectre, son spectre d'enveloppe et un zoom sur le spectre d'enveloppe sont montrés sur les figures IV.5 (A, B, C et D) respectivement. Sur le spectre de la figure IV.5 (B), nous observons l'apparition des résonances entourée par des raies latérales.

La figure IV.5 (D) illustre un zoom du spectre d'enveloppe présenté sur la Figure IV.5 (C) sur un intervalle défini pour bien clarifier les indices du défaut. A partir du zoom sur le spectre d'enveloppe, on peut voir la présence d'un pic associée à la fréquence de défaut ($\approx 30 \text{ Hz}$) ainsi que plusieurs de ses multiples.

IV.4 Détection défaut de roulement

IV.4.1 Banc d'essais de l'ÉTS

La base de données est constituée de signaux vibratoires enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS de Montréal [20]. Le roulement test utilisé est à double rangée de billes (SKF, 1210 EKTN9). Les mesures ont été effectuées sur le palier test l'un des roulements avec un défaut de bague extérieure. La première mesure a été effectuée avec une vitesse de rotation constante (900 tr/min), donc une fréquence caractéristique du défaut de roulement est $f_d = 108 \text{ Hz}$. Ensuite, deux autres mesures ont été collectées lors du démarrage et de l'arrêt de la machine.

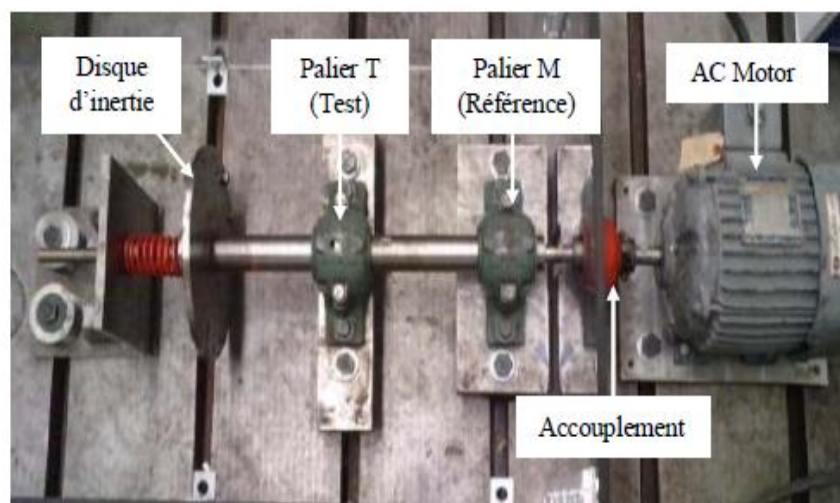


Figure IV. 6: Banc d'essai [20]

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.

Il est à signaler que nous avons pris ces mesures afin de simuler une défaillance des roulements dans les différentes parties tournantes d'un système éolien. La variation du vent entraîne forcément une variation de rotation des arbres de transmission, ce qui inclut en conséquence la variation des fréquences caractéristiques d'un défaut de roulement. D'où l'intérêt de traiter des mesures dans le cas de variation de vitesse de rotation et de montrer la capacité des outils présentés à bien identifier ce défaut dans des conditions variables.

IV.4.2 Cas de vitesse de rotation constante

Le signal mesuré en présence du défaut de roulement sur la bague externe de 0.2 mm, ainsi que son spectre de fréquence et son spectre d'enveloppe sont représentés sur la Figure IV.7 (A, B et C) respectivement.

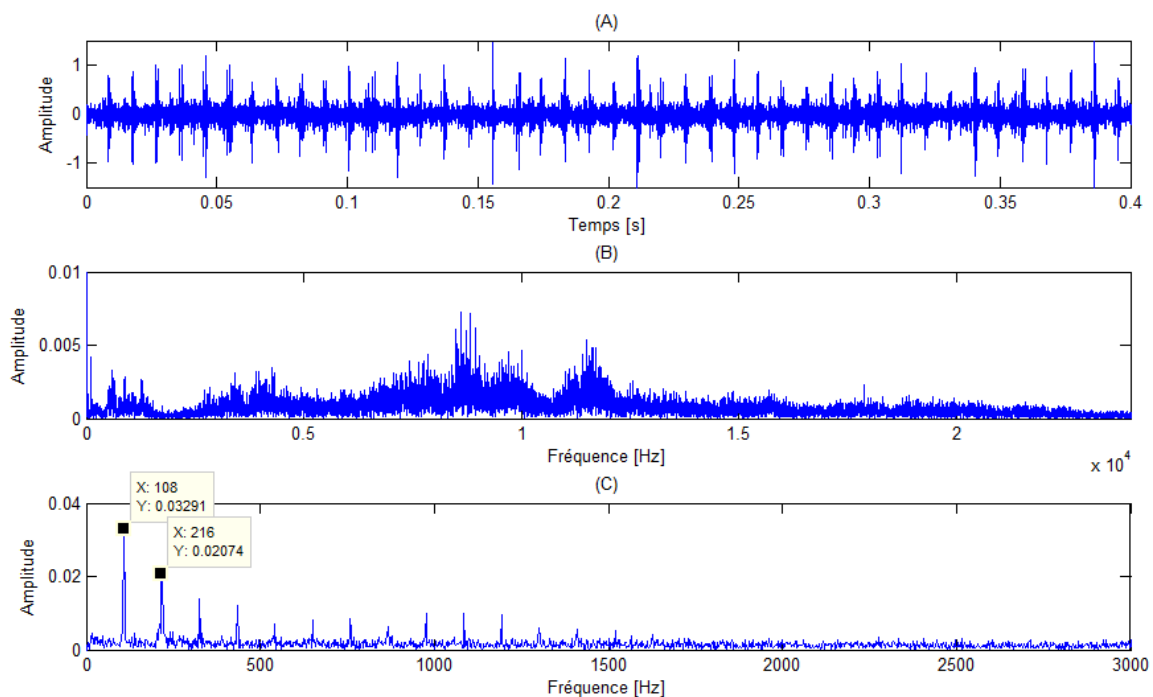


Figure IV.7: (A) Signal mesuré avec défaut, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

A la lumière de la figure IV.7 (C), la fréquence caractéristique de défaut (108 Hz) ainsi que plusieurs de ses harmoniques associés peuvent être clairement détecté. Il est évident que

l'analyse d'enveloppe peut facilement identifier la fréquence caractéristique de défaut 108 Hz et ses harmoniques.

IV.4.3 Cas de vitesse de rotation variable

IV.4.3.1 Au démarrage

Dans cette partie, le signal vibratoire est mesuré au démarrage de la machine jusqu'à atteindre une fréquence de rotation de 20 Hz. Le roulement test présente un défaut sur la bague externe de 0.2 mm.

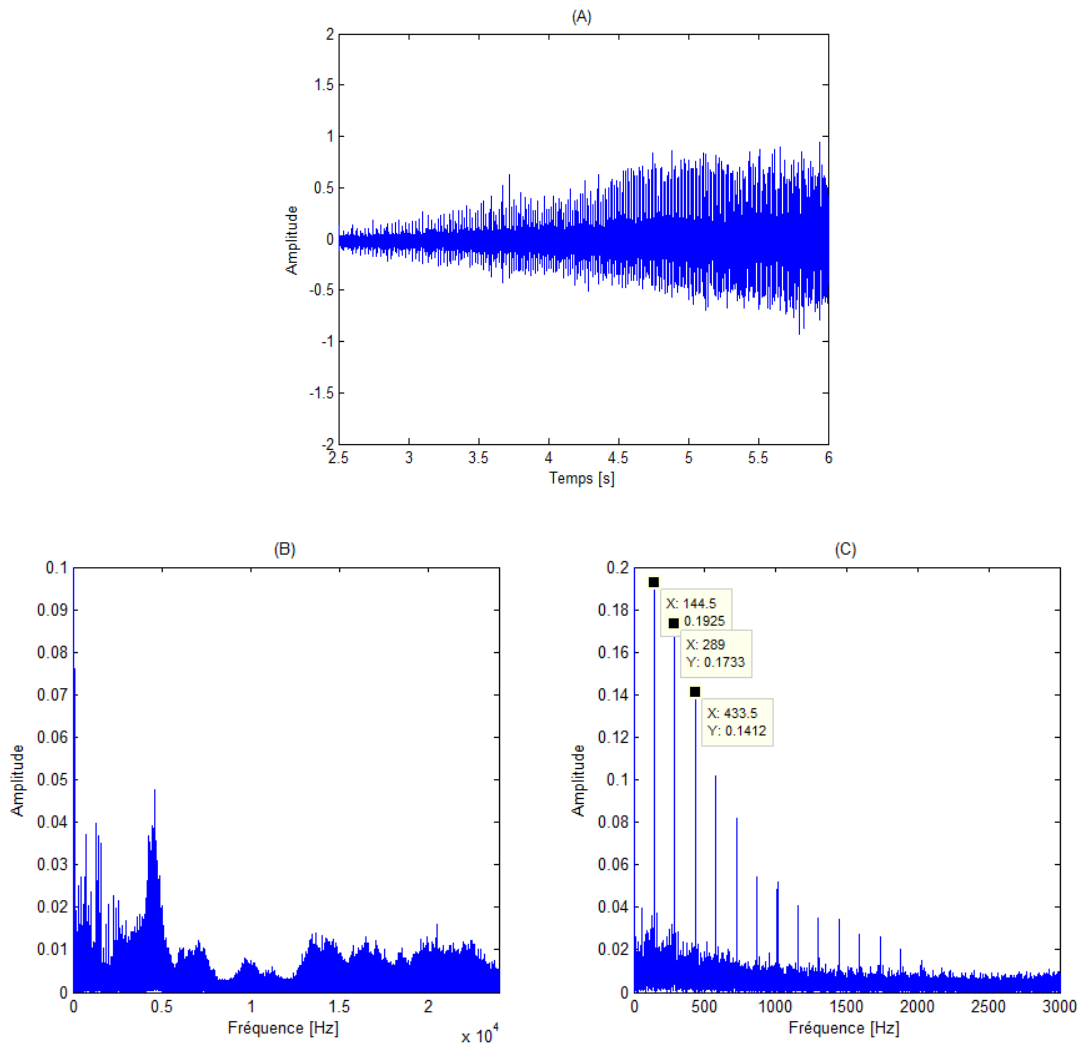


Figure IV.8: (A) Signal mesuré au démarrage, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

Le signal, son spectre et son spectre d'enveloppe sont présentés sur les figures IV.8 (A, B et C) respectivement. Où, nous apercevons que sur le spectre du signal aucune composante fréquentielle correspondante au défaut n'est identifiable, et le même constat sur le spectre de son enveloppe où l'on n'arrive pas à détecter clairement la fréquence caractéristique de défaut de roulement au démarrage.

Alors, on a appliqué la transformée en ondelette sur le signal mesuré. La figure IV.9 montre la représentation en temps-fréquence obtenue par la transformée en ondelette. Cette figure montre bien l'évolution de la fréquence de défaut en fonction du temps, où apparaît un trait à deux phases. Sur la première phase on peut voir clairement l'augmentation de fréquence de défaut engendrée par l'augmentation de la vitesse de rotation, la deuxième phase montre une raie correspondante à une fréquence de rotation constante et cela dû à la stabilité de la machine à une vitesse constante. Le défaut est donc suivi d'une manière instantanée grâce à cette méthode.

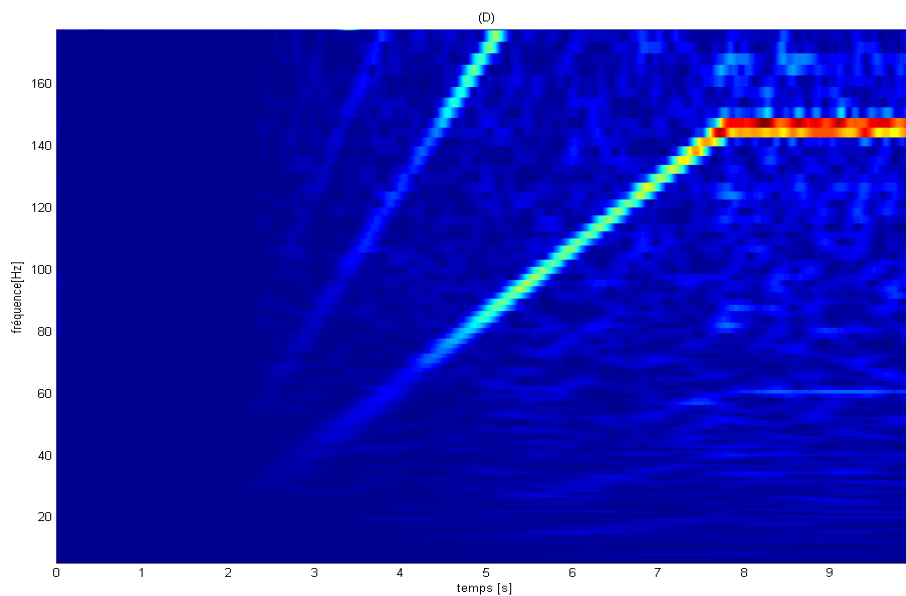


Figure IV.9: TFR du signal, transformée en ondelette

IV.4.3.2 A l'arrêt

Dans cette dernière partie, le signal vibratoire est mesuré à l'arrêt de la machine qui tournait à une fréquence de rotation 20 Hz jusqu'à l'arrêt total.

Ce test a été aussi effectué en présence de défaut du roulement sur la bague externe de 0.2 mm.

Le signal mesuré, son spectre et son spectre d'enveloppe sont présentés sur les figures IV.10 (A, B et C) respectivement. La figure IV.11 montre la représentation en temps-fréquence obtenue par la transformée en ondelette.

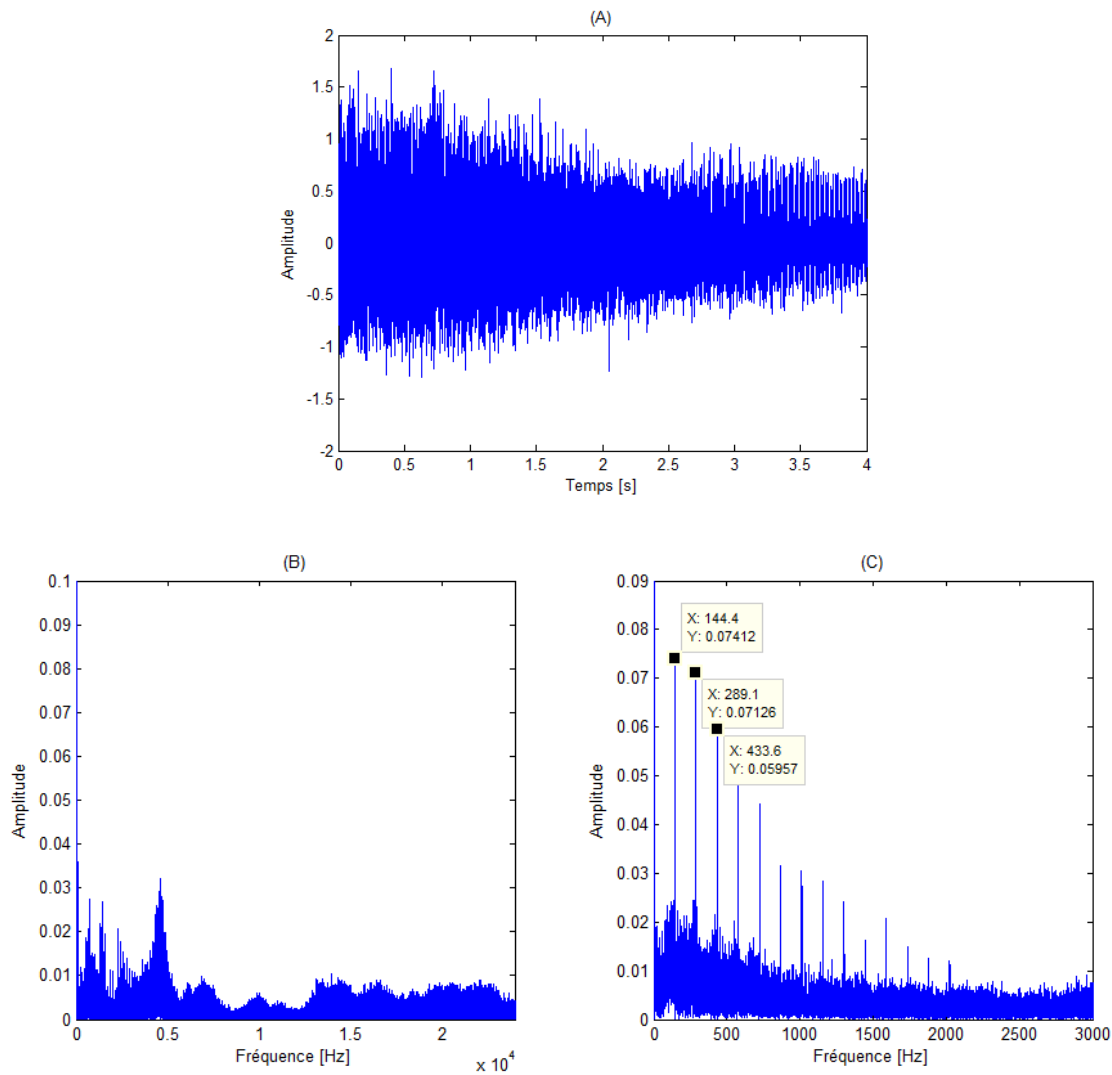


Figure IV.10: (A) Signal mesuré à l'arrêt, (B) son spectre, (C) son spectre d'enveloppe

On constate qu'à l'arrêt, le contenu spectral par le calcul du spectre du signal et de son enveloppe n'arrive pas à mettre en évidence la présence de la signature d'un défaut de bague extérieure du roulement.

Pour cela, on a appliqué la transformée en ondelette et obtenu le graphe de la Figure IV.11, qui illustre l'évolution de la fréquence de défaut en fonction du temps, où apparaît un trait à deux phases. La première phase montre la stabilité de la fréquence de défaut et ceci lors de la rotation de la machine à une vitesse constante. Dans la deuxième phase on peut voir la diminution de la fréquence de défaut, à cause de la diminution de la vitesse de rotation.

Le défaut est donc mis clairement en évidence par cette méthode. L'évolution de la fréquence au cours du temps peut être suivie avec grande facilité.

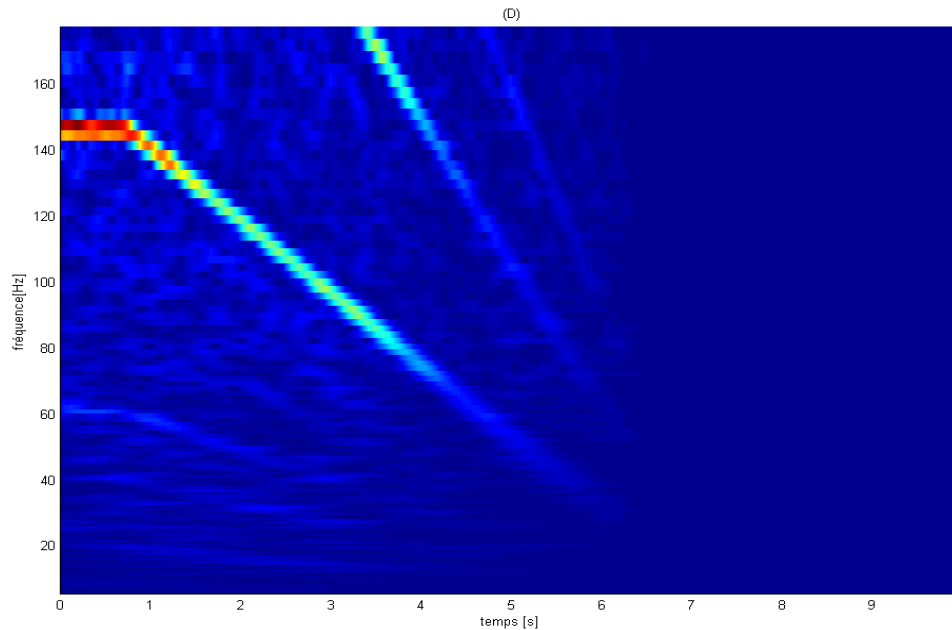


Figure IV.11: TFR du signal, transformée en ondelette

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité des mesures de signaux vibratoires pratiques par le calcul du spectre des signaux et de leurs enveloppes afin de suivre l'état des composantes d'un système éolien. Nous avons analysé des mesures vibratoires dans le cas de vitesse de rotation constante, en absence et en présence de défauts. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la transformée en ondelettes pour suivre l'évolution de la fréquence caractéristique d'un défaut dans le cas où la vitesse de rotation est variable, qui est souvent le cas dans les systèmes éoliens. Pour cela, nous avons utilisé des mesures vibratoires au démarrage et à l'arrêt d'une machine en présence de défaut roulement. Enfin, nous estimons que la TO peut très bien identifier les défaillances liées aux roulements dans un système éolien lors de son mouvement non-stationnaire.

Conclusion générale

Conclusion Générale

La prévention contre l'apparition des défauts de l'éolienne est devenue incontournable pour éviter des pannes ayant pour conséquence des arrêts de production induisant des pertes économiques. Raisons pour lesquelles les travaux présentés dans notre étude sont orientés vers la prévention, la détection ainsi que le diagnostic des défauts par analyse vibratoire. Cette méthode est devenue de plus en plus répandue et maîtrisable, et ceci grâce au développement des techniques modernes de traitement du signal.

Pour aborder l'étude nous avons présenté dans le premier chapitre des généralités sur l'éolienne et ses composantes afin de préciser les différentes défaillances pouvant survenir pour ceux-ci. Ensuite nous avons rappelé l'état de l'art sur les différentes méthodes de diagnostic, cela pour avoir une direction de travail assez claire ainsi que les données nécessaires à la tâche de diagnostic.

Dans le deuxième chapitre nous avons cité les principaux défauts apparaissant dans les éoliennes. Puis nous avons présenté l'analyse vibratoire, ainsi que les différentes techniques utilisées pour l'analyse des signaux vibratoire. Ce travail permet de bien choisir les méthodes appropriées pour chaque type de défaut dans la partie expérimentale. En effet, certaines méthodes ne sont applicables dans certaines conditions.

Le troisième chapitre consiste à la simulation de plusieurs signaux qui reflètent les défauts de certains organes qui ont été traité par des méthodes de traitement de signal tel que l'analyse spectrale basé sur la transformée de fourrier, l'analyse d'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert et la transformée en ondelette qui permet de résoudre le problème de la variation de la fréquence du défaut en représentant le signal dans le plan temps-fréquence.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié plusieurs signaux de mesures réelles qui décrivent l'état de certains organes de l'éolienne, ces signaux sont analysés par calcul de spectre de Fourier, l'analyse d'enveloppe et la transformée en Ondelette dans le cas où la vitesse de rotation varie.

On a conclue dans ce travail :

- que l'analyse vibratoire est un moyen prometteur qui permet d'obtenir des informations sur l'état d'une éolienne dans le but de sa maintenance.

- Dans le cas de la vitesse de rotation constante, l'analyse d'enveloppe permet facilement identifier la fréquence caractéristique de défaut.
- dans le cas de la vitesse de rotation variable, spectre de signal et le spectre de son enveloppe n'arrivent pas à détecter clairement la fréquence caractéristique de défaut de roulement.
- la représentation temps-fréquence du signal avec la méthode Transformées en Ondelette. Elle permet de suivre L'évolution de la fréquence de défaut au cours du temps avec grande facilité.

Références bibliographiques

Liste des références

- [1] A. LEBRANCHU, « Analyse de données de surveillance et synthèse d'indicateurs de défauts et de dégradation pour l'aide à la maintenance prédictive de parcs de turbines éoliennes », thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [2] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [3] R. RADJE, « étude d'une chaine de cnversion d'énergie éolienne », Mémoire Magister, Université Mentouri de Constantine, 04/07/2009.
- [4] M. BELAIDI, « Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne », mémoire de fin d'étude, ENP, Alger, 2006.
- [5] I. Attoui, « Contribution au diagnostic de défaut dans une chaine de production d'énergie », Mémoir Magister, université de Badji Mokhtar, Annaba, 2009.
- [6] M. T. LATRECHE, « commande floue de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien », mémoire magister, université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [7] Z. Daneshi-Far, G. A. Capolino, H. Henao. Review of Failures and Condition Monitoring in Wind Turbine Generators. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [8] I. Attoui, « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne », thèse doctorat, université de Badji Mokhtar, Annaba, 2015.

- [9] Md. SAHNOUN, D. BAUDRY, A. LOUIS, B. MAZARI, « Modélisation d'un plan de maintenance basé sur les systèmes multi-agents pour les éoliennes offshore », Mosim 2014, 10^{ème} conférence francophone de modélisation, optimisation et simulation, Nov 2014, Nancy, France.
- [10] J. R. Babu, S. V. Jithesh, Breakdown risks in wind energy turbines, Pravartak, the journal of Insurance and risk Management from National Insurance Academy, Pun, Volume III, Issue 3, April-June 2008.
- [11] A. BECHKAOUI, « Diagnostic des défauts dans les machines synchrones à vitesse variable », thèse doctorat, université Badji mokhtar Annaba, 14/06/2016.
- [12] O. UMayma, « Sur la résolution des problèmes inverses pour les systèmes dynamiques non linéaires : Application à l'électrolocation, à l'estimation d'état et au diagnostic des éoliennes », thèse doctorat, Université de Grenoble, 7 décembre 2012.
- [13] R. ZEMOURI, « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamique : application à la e-maintenance », thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 28 Novembre 2003.
- [14] O. Djebali, « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement », Thèse de doctorat, Université de Reims, 2013.
- [15] J. MOREL, Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique, Edition Eyrolles, EDF France, 1991.
- [16] G. DIDIER, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 29 octobre 2004.
- [17] H. FENINECHE, « Application des réseaux de neurones artificiels au diagnostic des défauts des machines tournantes », Mémoire Magister, université Ferhat Abbas -Sétif-, sans date.

[18] L. NACIB, « Diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire », Thèse doctorat, Université Badji mokhtar –Annaba-, 04 octobre 2015.

[19] R. Ziani, « Etude des performances de la classification par les supports à vaste marge (SVM) : application au diagnostic vibratoire », mémoire Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, sans date.

[20] Y. IMAOUCHEN, « Mesure et analyse des vibrations des machines électrique tournantes », thèse doctorat, université de Bejaia, 24/11/2015.

[21] LESCEUX J.M., Détection précoce de défauts dans les roulements par analyse vibratoire, Revue Scientifique des ISILF – vol 10, Avril 1996.

[22] Base de données de mesures vibratoires :

<http://data-acoustics.com/measurements/gear-faults/gear-1/> (consulté le 10 juin 2019).

Résumé

Le diagnostic des systèmes éoliens a pour but le renforcement de la maintenance prédictive en vue d'intervenir d'une manière précoce et en temps réel pour éviter les effets induits. Les différents composants de ces systèmes peuvent y être dégradés de manière progressive et naturelle.

Le présent travail se concentre sur la détection des défauts dans les systèmes de production de l'énergie éolienne, Pour cela nous exposerons quelques méthodes de traitement du signal dans le diagnostic vibratoire actuellement très répandu en industrie. Comme toute méthode de diagnostic, les techniques proposées sont l'analyse spectral, l'analyse d'enveloppe et la transformée en ondelette ont pour rôle de cerner l'apparition d'éventuelles caractéristiques des défauts.

Pour atteindre cet objectif, on a traité des signaux réels obtenu sur différents bancs d'essai (ÉTS, une machine et une éolienne de 3 MW) afin de prouver l'efficacité de ces méthodes dans la détection des défauts.