

République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

Master II

Option : Automatique

Réalisé par : BOUDJEMAI Foudil

Thème

Méthodes non-intrusives pour le
diagnostic des défauts mécaniques
d'une éolienne

Soutenu le 24 - 06 - 2012 devant le jury suivant :

- Président : Boubekour MENDIL
- Encadreur : Farid TAFININE
- Examineur : Ahmed CHARIKH

2011-2012

Méthode non-intrusives pour Le diagnostic des défauts mécaniques D'une éolienne

Par : BOUDJEMAI Foudil

Email : lfou87@hotmail.fr

Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Remerciements

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à monsieur **F. Tafinine**, pour tous ses efforts, ses conseils et pour la modestie qui le caractérise malgré le grand savoir scientifique qu'il possède, choses qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail :

Monsieur **B. Mendil**, Professeur à l'université A/Mira Bejaia, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Monsieur **A. Charikh**, Enseignant à l'université A/Mira Bejaia, qui m'a fait l'honneur en acceptant d'être examinateur de mon travail.

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de département Génie Electrique de l'université A/Mira Bejaia pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Pour terminer- last but not least- je tiens à remercier tous mes collègues et mes amis qui m'ont aidé et qui m'ont apporté leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère, à mon très cher père, qui m'ont soutenus et encouragés durant toutes mes études et nulle chose ne récompensera leurs sacrifices. Que dieu les garde pour nous.

A tous les membres de ma familles qui m'ont aidé de plusieurs manières et pour leur soutien précieux plus que je ne peux le dire durant les longues années de ma formation, ce qui leur fait valoir ma grande reconnaissance et récongnition. Qu'ils me pardonnent mon manque de disponibilité et mes absences. Que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers vous.

A mes amis qui m'ont encouragé et suivi depuis longtemps : Yacine (*lefou*) et Sina (*nina*), Sofiane (*osso*) et Djedjiga (*djoudjou*), Nabil (*billy*) et Mounira (*mounie*), Nourdine (*chvarvare*) et Nawal (*minouche*), Moussa (*adjadarmie*) et Meziane (*misldirecteur*). La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans votre gentillesse et votre bonne humeur sans oublier bien sûr toutes les personnes que j'ai eu le plaisir de côtoyer toute au long de ces années passées à l'université A/Mira Bejaia : Saïd, Brahim, Karim, Nadir, Hakim, Zahir, Nabil..... . Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive, et que les personnes non mentionnées veuillent bien m'excuser.

A la personne qui a partagé de plus près cette aventure avec moi, celle qui a été ma motivation permanente, celle avec qui j'ai vécu les meilleures années de ma vie, ma chère Amel : Merci pour ton amour, ta patience, ta compréhension et ton soutien sans égal.

A tous ceux qui se donnent à fond à la recherche scientifique.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Table des matières	iii
Liste des Figures	viii
Liste des Tbleaux	ix
Nomenclature	x
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les éoliennes

I.1 Introduction	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Energie éolienne.....	5
I.3.1 Définition de l'énergie éolienne	5
I.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	6
I.3.3 Usage de l'énergie électrique produite par l'éolienne	7
I.3.3.1 Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau.....	7
I.3.3.2 Fourniture d'électricité sur un site raccordé au réseau électrique.....	7
I.3.3.3 Production d'énergie éolienne vendue sur le réseau	7
I.3.4 Développement de l'énergie éolienne	8
I.3.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.3.5.1 Avantages	8
I.3.5.2 Inconvénients	9

I.4	Etude du système éolien	9
I.4.1	Les différents types d'un système éolien	9
I.4.1.1	Eolienne à axe vertical	9
I.4.1.1.1	Le rotor de Savonius	10
I.4.1.1.2	Le rotor de Darrieus	10
I.4.1.2	Eolienne à axe horizontal	11
I.4.1.2.1	Les éoliennes à marche lente	12
I.4.1.2.2	Les éoliennes à marche rapide	12
I.4.2	Les principaux composants d'un système éolien	12
I.4.2.1	Structure générale d'une éolienne	12
I.4.2.2	Structure d'une nacelle	13
I.5	Types de machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	16
I.5.1	Générateur synchrone	16
I.5.2	Générateur asynchrone	16
I.6	Conclusion	16

Chapitre II : Etat de l'art sur le diagnostic des éoliennes

II.1	Introduction	18
II.2	Généralités sur le diagnostic	18
II.2.1	Les différentes notions utilisées en diagnostic	18
II.2.2	Diagnostic d'un système	19
II.2.3	Procédure du diagnostic	20
II.2.4	Type de défaut	21
II.3	Aperçu sur les méthodes du diagnostic	22
II.3.1	Les méthodes à base de modèle (Les méthodes internes)	23
II.3.2	Les méthodes s'appuyant sur une base de connaissance (Les méthodes externes)	23

II.3.2.1	Détection des défauts par traitement du signal	23
II.4	Les principaux défauts mécaniques des éoliennes.....	24
II.4.1	Défauts de roulements	24
II.4.2	Défauts de la boîte à vitesse.....	26
II.4.3	Autres défaillances mécaniques	26
II.4.3.1	Rotor	27
II.4.3.2	Système d'orientation de la nacelle.....	27
II.5	Conclusion.....	27

Chapitre III : Diagnostic par l'analyse spectrale des signaux vibratoires

III.1	Introduction	29
III.2	Bref historique	29
III.3	Généralité sur le traitement du signal	29
III.3.1	Définitions de base	29
III.3.2	Principales fonction du traitement du signal.....	30
III.4	Représentation des signaux	30
III.4.1	Modélisation des signaux.....	30
III.4.2	Classification des signaux.....	31
III.4.2.1	Représentation temporelle des signaux	31
III.4.2.1	Représentation spectrale (fréquentielle).....	32
III.5	Analyse de Fourier	32
III.5.1	Les séries de Fourier	33
III.5.1.1	Développement en série de Fourier	33
III.5.1.2	Développement sous forme complexe	34
III.5.2	Transformation de Fourier	34

III.5.2.1	Définition	34
III.5.2.2	Conditions de validité.....	35
III.5.3	Transformée de Fourier discrète TFD	35
III.5.3.1	Définition de la TFD	35
III.5.4	Transformation de Fourier rapide TFR	36
III.6	Mise en œuvre	36
III.6.1	Caractéristiques des défaut de roulement	36
III.6.2	Analyse des signaux vibratoire dans le domaine temporel	37
III.6.3	Etude dans le domaine spectral	39
III.6.3.1	Densité spectrale de puissance.....	39
III.7	Conclusion.....	40

Chapitre IV : Application de l'analyse temps-échelle en diagnostic vibratoire

IV.1	Introduction	42
IV.2	Historique sur les ondelettes.....	42
IV.3	Transformée en ondelettes.....	42
IV.3.1	Principe de la décomposition	43
IV.3.2	Relation entre échelle et fréquence.....	43
IV.3.3	Choix des ondelettes.....	43
IV.3.4	Transformée en ondelettes continue (CWT)	44
IV.3.4.1	Procédure de la CWT	45
IV.3.4.2	Application de la CWT sur des signaux réels	46
IV.3.5	Transformée en ondelettes discrète	47
IV.3.5.1	Analyse multi-résolution	47
IV.3.5.2	Algorithme de Mallat	47
IV.3.5.3	Application de la DWT sur des signaux réels	47

IV.4 Conclusion.....	53
Conclusion générale	55
Bibliographie	xi

Liste des Figures

Figure I.1 : <i>Évolution des dimensions des éoliennes.</i>	5
Figure I.2 : <i>Principe de la conversion d'énergie.</i>	6
Figure I.3 : <i>Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.</i>	8
Figure I.4 : <i>Eolienne de Savonius.</i>	10
Figure I.5 : <i>Eolienne de Darrieus.</i>	11
Figure I.6 : <i>Eolienne à axe horizontal.</i>	11
Figure I.7 : <i>Structure générale d'une éolienne.</i>	13
Figure I.8 : <i>Structure d'une nacelle.</i>	15
Figure II.1 : <i>Procédure de détection et d'isolation des défauts.</i>	20
Figure II.2 : <i>Description des types de défauts.</i>	21
Figure II.3 : <i>Les différentes méthodes de diagnostic.</i>	22
Figure II.4 : <i>Pannes provoqués par des sous-systèmes de l'éolienne.</i>	24
Figure II.5 : <i>Dimension du roulement à bille.</i>	25
Figure III.1 : <i>Représentation d'un signal physique réel.</i>	31
Figure III.2 : <i>Distribution spectrale d'un signal.</i>	32
Figure III.3 : <i>Discrétisation du signal.</i>	35
Figure III.4 : <i>Ecaillage du roulement.</i>	37
Figure III.5 : <i>Représentation temporelle du signal sain et du signal avec défaut.</i>	38
Figure III.6 : <i>DSP d'un signal sain et d'un signal avec défaut.</i>	40
Figure IV.1 : <i>Exemple d'ondelette mère.</i>	44
Figure IV.2 : <i>Première phase pour la transformation en ondelettes continue.</i>	45
Figure IV.3 : <i>Troisième phase pour la transformation en ondelettes continue.</i>	45
Figure IV.4 : <i>Quatrième phase pour la transformation en ondelettes continue.</i>	46
Figure IV.5 : <i>Application de la CWT sur des signaux réels.</i>	46
Figure IV.6 : <i>Exemple de décomposition à trois niveaux.</i>	49
Figure IV.7 : <i>Décomposition du signal avec $f_{max} = 12.5$ KHz.</i>	50
Figure IV.8 : <i>Spectre des détails 5,6,7 et 8.</i>	51
Figure IV.9 : <i>Signal reconstruit et son spectre des coefficients d'ondelettes du détail 7.</i>	52

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : <i>Fréquence théoriques des défauts.</i>	37
Tableau III.2 : <i>Etude statistique des deux signaux.</i>	39

Nomenclature

<i>MS</i>	machine synchrone
<i>MAS</i>	machine asynchrone
<i>FDI</i>	fault détection and isolation
<i>DSP</i>	densité spectrale de puissance
f_b	fréquence caractéristique des billes
$f_{b.int}$	fréquence caractéristique de la bague interne
$f_{b.ext}$	fréquence caractéristique de la bague externe
f_{cage}	fréquence caractéristique de la cage
f_{rot}	fréquence de rotation du rotor
<i>PD</i>	distance entre les centres des billes diamétralement opposées
<i>BD</i>	diamètre d'un élément roulant
n_b	nombre d'éléments roulants
β	angle de contact des billes avec les bagues du roulement
<i>FFT</i>	fast fourier transform
ΔF	largeur de bande spectrale du signal
a_n, b_n	coefficients de la série de Fourier
f_0	fréquence du fondamental
f_e	fréquence d'échantillonnage
T_e	période d'échantillonnage
<i>DFT</i>	discrete fourier transform
<i>TFR</i>	transformée de Fourier rapide
<i>N</i>	nombre d'échantillons
τ	durée du signal échantillonné
Δf	résolution fréquentielle
f_p	fréquence de la portuse
<i>CWT</i>	continuous wavelet transform
<i>DWT</i>	discret wavelet transform
<i>WPT</i>	wavelet packet transform
a, b	variable temps-échelle
<i>TO</i>	transformé en ondelettes
F_{max}	fréquence maximale du signal
A_k, D_k	approximations et détails de niveau k
cA_k	coefficients d'approximation
cD_k	coefficients de détail
<i>L</i>	filtre passe-bas
<i>H</i>	filtre passe-haut

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. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements.

En effet, les énergies renouvelables ont un potentiel énorme et peut répondre à la demande mondiale d'énergie. Ils peuvent améliorer la diversité dans les marchés de fourniture d'énergie, de garantir l'approvisionnement à long terme de l'énergie durable et réduire les émissions atmosphériques. La conversion de l'énergie éolienne est en plus forte croissance dans la production d'électricité et il est prévu de le rester dans le futur. Du fait que les éoliennes sont inaccessibles, car ils sont situés sur des tours extrêmement élevée de plus de 20m de hauteur ou dans la mer, il existe un besoin constant de réduction des coûts d'exploitation et de maintenance des éoliennes.

La surveillance de l'état de ces systèmes devient très stratégique pour les constructeurs et les utilisateurs. La détection précoce d'un défaut est nécessaire pour permettre au personnel de maintenance de prévoir des réparations avant la date effective de la panne qui peut induire des pertes financières importantes pour l'entreprise. Le moyen le plus efficace de réduire ces coûts serait de surveiller en permanence l'état de ces générateurs.

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 du signal que nous avons classés en méthodes classiques (analyse de Fourier) et méthodes avancées où l'on retrouve l'analyse en ondelettes. Ces méthodes sont utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts mécaniques d'une éolienne, défauts principalement liés aux roulements à billes.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les éoliennes. Il s'agit d'une étude du système éolien et des différentes structures existantes.

Dans le chapitre deux, nous effectuons un état de l'art sur le diagnostic des éoliennes, nous essayons de mettre en exergue les notions essentielles utilisées en diagnostic et les principaux défauts mécaniques rencontrés sur les éoliennes.

Le troisième chapitre développe la notion du signal, leur caractéristiques et leur modélisation, ainsi qu'une mise en œuvre par l'analyse de Fourier pour le diagnostic des signaux vibratoires.

Le dernier chapitre est consacré à la description d'une nouvelle méthode en diagnostic basée sur l'analyse en ondelette pour détecter la présence d'un défaut.

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre I

Généralités sur les éoliennes

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, une présentation est donnée sur l'histoire des éoliennes, ainsi que des généralités sur les différents types d'éoliennes. Cependant, on donne plus de détail sur les éoliennes à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces. Le principe de conversion de l'énergie éolienne et les systèmes de génération d'électricité utilisés à ce jour-là sont présentés également.

I.2 Historique

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. La première utilisation de l'énergie éolienne était de naviguer des bateaux dans le Nil il y a environ 5000 années. Beaucoup des civilisations ont employé l'énergie éolienne pour le transport et d'autres buts. Les Européens l'utilisent pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas [1].

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12^{ème} et le 19^{ème} siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe [2].

Actuellement, des milliers d'éoliennes fonctionnent dans diverses régions du monde, avec une capacité totale allant de 93 800 MW en 2007 à 120000 MW à la fin de 2008. Les

capacités installées croient en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus grands pays investisseurs sont les pays occidentaux (Amérique et Europe). L'Allemagne est l'un des principaux producteurs d'électricité éolienne avec 22 247 MW de puissance installée à la fin de l'année 2007 [3].

Le Maroc, premier producteur d'énergie éolienne du continent africain, produit 140 MW par an. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf qui a une puissance de 50 MW [4].

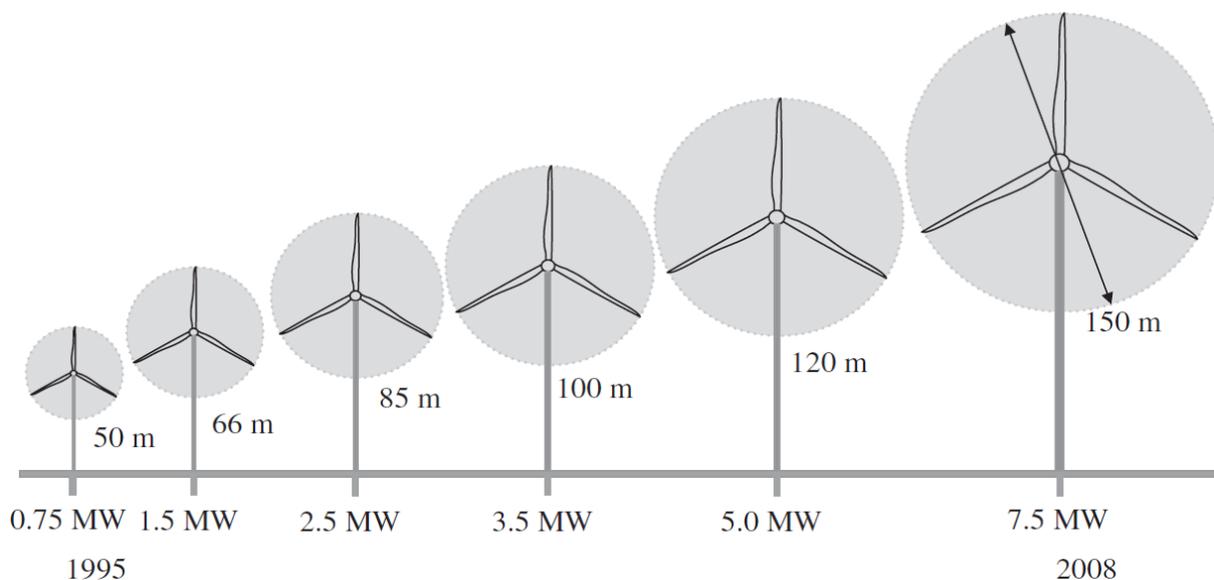


Figure I.1 : *Évolution des dimensions des éoliennes.*

I.3 Energie éolienne

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non dégradée, qui tire son nom d'Éole, Dieu du vent dans la Grèce antique [5]. C'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. De plus est en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Elle est toutefois aléatoire dans le temps et sa réception reste assez complexe [6].

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre par le réchauffement de certaines zones de la

planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie éolienne est donc l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique puis en énergie électrique à l'aide d'un aérogénérateur.

Le vent est défini par sa direction et sa vitesse qui varie selon les zones géographiques et les saisons. Il faut donc connaître la vitesse moyenne du vent ainsi que sa variation en fonction de l'altitude pour déterminer la possibilité ou non d'implanter un parc éolien.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore). La production en mer présente un avantage considérable, une meilleure productivité (vent plus fort, plus régulier et plus énergétique) [7].

I.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. 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.

Le fonctionnement général est illustré par la **Figure I.2**. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatiques [8].

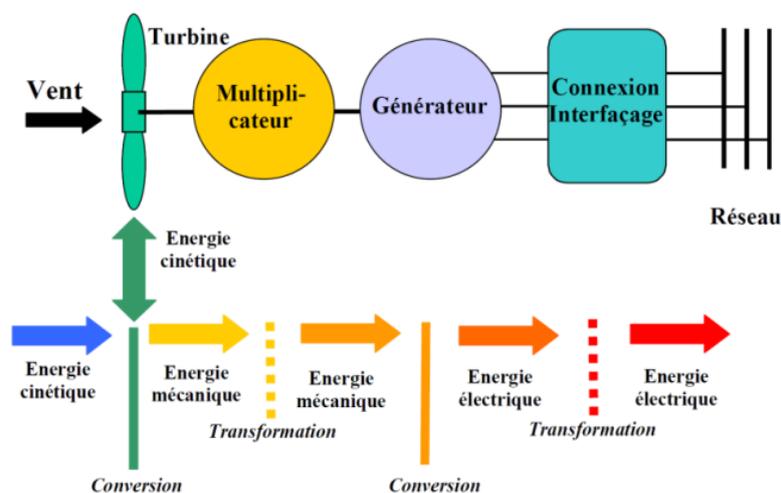


Figure I.2 : Principe de la conversion d'énergie.

I.3.3 Usage de l'énergie électrique produite par l'éolienne

L'énergie éolienne peut alimenter des sites isolés raccordés ou non au réseau électrique. Il s'agit donc d'une énergie décentralisée. Elle peut également fournir de l'énergie sur le réseau en tant que producteur autonome [3].

I.3.3.1 Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau

Pour une fourniture d'électricité sur un site non équipé en électricité (péniche, grange isolée...), l'éolienne électrique de petite puissance, de 50 W à 10 kW, est suffisante dans la plupart des cas. L'éolienne produit du courant qui est régulé et stocké dans des batteries qui assurent l'autonomie pendant les jours de vent faible. On utilise ensuite soit directement le courant continu venant des batteries, soit le courant alternatif produit par un onduleur alimenté par les batteries.

I.3.3.2 Fourniture d'électricité sur un site raccordé au réseau électrique

Il s'agit ici d'utiliser l'énergie éolienne pour alimenter une usine ou une ferme par exemple, déjà alimentée par le réseau électrique.

Dans ce cas, l'énergie produite par l'éolienne viendra diminuer la facture d'électricité sur le site. L'éolienne est raccordée sur le réseau interne de l'utilisateur : l'énergie éolienne produite est utilisée en priorité par celui-ci. Si la production est trop faible, le réseau électrique fournit le complément. Aucun automatisme n'est à prévoir, l'énergie sera appelée sur le réseau quand cela sera nécessaire. Généralement, la puissance installée dans ce type d'installation va de 10 kW et ne dépasse pas 200 – 300 kW.

I.3.3.3 Production d'énergie éolienne vendue sur le réseau

Ce type d'usage correspond à l'installation d'une centrale électrique ; toute l'énergie produite est achetée par le réseau comme s'il s'agissait d'une centrale hydroélectrique ou d'une centrale au charbon.

La stratégie actuelle conduit à regrouper plusieurs machines sur un même site afin de constituer une « Centrale Eolienne » ou « Wind Farm ». Ces installations atteignent plusieurs MW de puissance totale. Les recherches se tournent, à présent, vers des centrales installées en mer (offshore). Ce développement devrait permettre à l'éolienne de représenter un moyen de production significatif.

I.3.4 Développement de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (**Figure I.3**). Ceci est principalement dû à deux raisons [9] :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

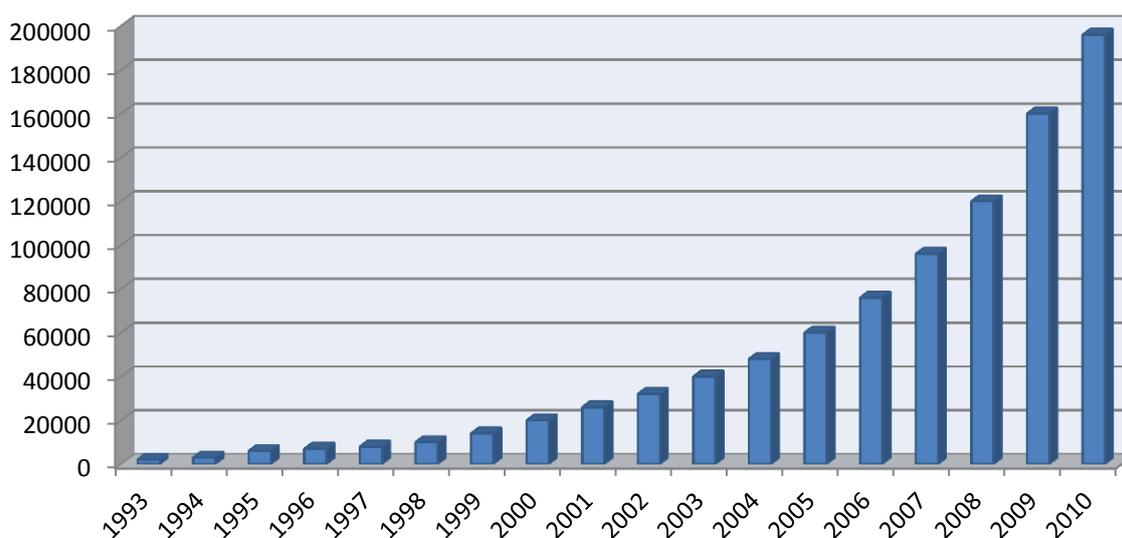


Figure I.3 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.

I.3.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [10].

I.3.5.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement. Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres [11].

- L'énergie éolienne est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'aux besoins en énergie. Il n'y a donc pas d'investissements superflus. Cette

modularité permet aussi de maintenir en fonctionnement la plus grande partie de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse.

- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

I.3.5.2 Inconvénients

La production d'énergie a lieu en fonction du vent et non de la demande. Dans le cas d'installations particulières, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût [11].

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.

I.4 Etude du système éolien

I.4.1 Les différents types d'un système éolien

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [3] :

I.4.1.1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [11]. De nombreuses variantes ont été

testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

I.4.1.1.1 Le rotor de Savonius

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [2].

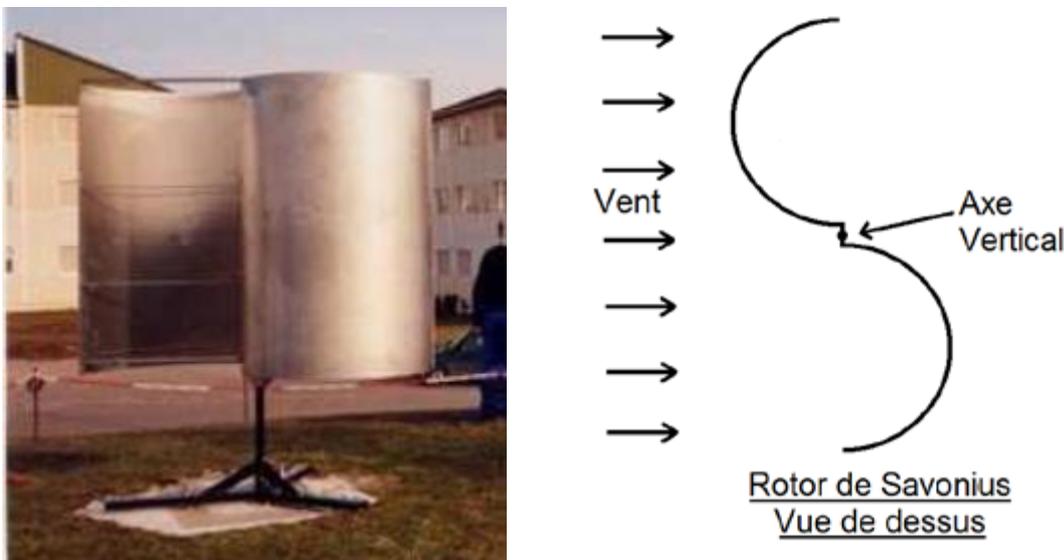


Figure I.4 : Eolienne de Savonius.

I.4.1.1.2 Le rotor de Darrieus

Les éoliennes de Darrieus sont celles dont la structure est la plus répandue (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [2].

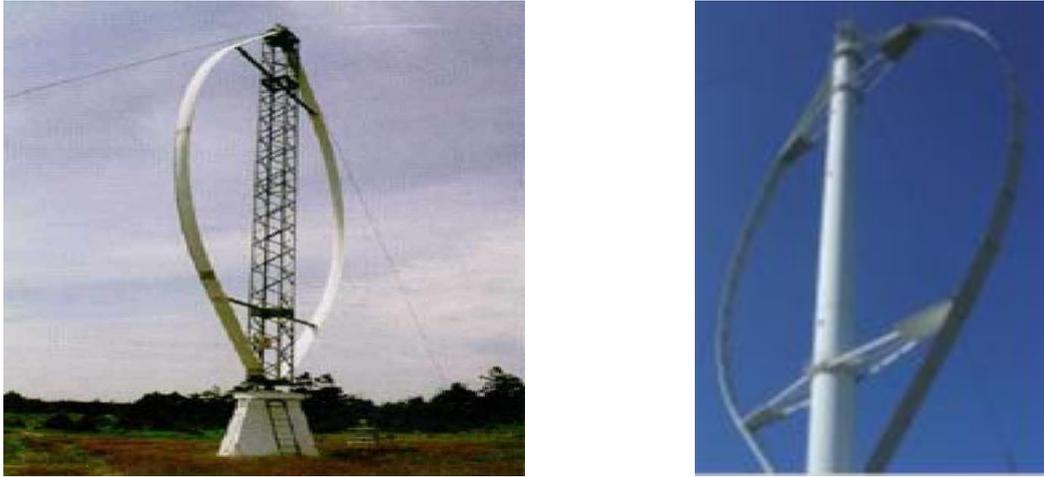


Figure I.5 : *Eolienne de Darrieus.*

I.4.1.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3 (**Figure I.6**). Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [11].



Figure I.6 : *Eolienne à axe horizontal.*

Nous pouvons distinguer deux classes pour les systèmes éoliens à axe horizontal [3] :

I.4.1.2.1 Les éoliennes à marche lente

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

I.4.1.2.2 Les éoliennes à marche rapide

Les éoliennes à marche rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles sont beaucoup plus répandues.

I.4.2 Les principaux composants d'un système éolien

I.4.2.1 Structure générale d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales [12].

- *La tour ou mat :*

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour à une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur est disposée les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.

- *La nacelle :*

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande (**Figure I.8**).

- *Le rotor et les pales :*

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite.



Figure I.7 : Structure générale d'une éolienne.

I.4.2.2 Structure d'une nacelle [13]

1- Pales :

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution et la corrosion.

2- Rotor :

Il doit toujours être orienté face au vent pour optimiser son rendement. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu.

3- Roulement de la pale :

Les roulements sont des éléments de haute capacité avec des composants de grande précision. Afin de tirer pleinement profit de la capacité des pales, le constructeur doit choisir le type de roulement approprié et bien adapter les caractéristiques des roulements à celles des pièces attenantes. De plus, le montage, le démontage, la lubrification, l'étanchéité et l'entretien sont de grande importance.

4- Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, où lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

5- *Système de ventilation :*

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 comportant un refroidissement à l'eau.

6- *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).

7- *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.

8- *Transformateur :*

Cet appareil transforme l'électricité produite par l'éolienne, qui est de l'électricité brute. Il faut en quelque sorte la filtrer et la stabiliser pour qu'elle puisse ensuite être distribuée aux habitants d'une ville ou d'un village.

9- *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.

10- *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.

11- *système de lubrification :*

Les centrales éoliennes doivent fonctionner de manière absolument fiable et ne doivent en aucun cas tomber en panne à cause d'un défaut évitable. Pour cela le rôle du système de lubrification c'est d'assurer le bon fonctionnement des composants d'entraînement mécaniques, une lubrification et un refroidissement fiables sont indispensables.

12- *Dispositif d'orientation de la nacelle:*

L'éolienne doit toujours être face au vent pour produire un maximum d'électricité. C'est le rôle de ce petit moteur qui entraîne une grande roue crantée appelée « couronne ». Ce dispositif d'orientation est opéré par le système contrôle-commande qui enregistre la

direction du vent grâce aux signaux émis par la girouette. Elle ne pivote que de quelques degrés à la fois, lorsque le vent change de direction.

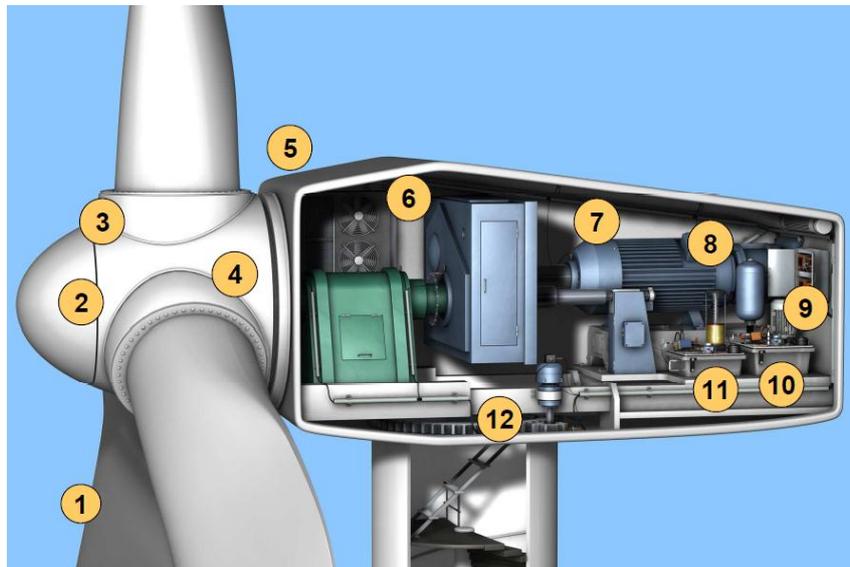


Figure I.8 : *Structure d'une nacelle.*

Nous pouvons trouver d'autres composants qui n'apparaissent pas dans la **Figure I.8** [12].

- *L'arbre principal :*

C'est sur ce gros bras qu'est fixé le rotor d'un côté et le multiplicateur de l'autre. Quand le vent fait tourner le rotor, cet arbre tourne également et entraîne tous les autres éléments du mécanisme. Il transmet ainsi toute la force du vent.

- *Disque de freinage :*

Il est déclenché à un seuil prédéterminé par un détecteur de vitesse de vent (anémomètre). Ce dispositif permet l'arrêt total de l'éolienne et pas seulement son ralentissement, ce qui assure la sécurité. Le frein est relâché lorsque le vent baisse d'intensité. Le dispositif peut aussi être déclenché lorsqu'il y a un problème sur le réseau.

- *L'anémomètre :*

L'anémomètre mesure la vitesse du vent et transmet ses informations au système de commande. L'ordinateur sait alors si le vent souffle suffisamment pour mettre en route l'éolienne ou si, au contraire, il faut la stopper parce qu'il souffle trop fort.

- *La girouette :*

Comme sur le toit des maisons, la girouette indique la direction du vent. Ainsi, le système de commande peut orienter l'éolienne face au vent. C'est dans cette position qu'elle fonctionne le mieux.

I.5 Types de machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

I.5.1 Générateur synchrone

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure [15].

I.5.2 Générateur asynchrone

La Machine Asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement. Ces variations de vitesses engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe. La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide) [15].

Il y a plusieurs type de machine asynchrone utiliser dans le domaine de l'énergie éolienne, la suite de notre étude sera baser sur les génératrices asynchrones doubles alimentations.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique sur le développement des éoliennes et leur introduction progressive dans le marché de l'énergie électrique.

Après avoir décrit la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans la production d'énergie, puis nous avons porté notre attention sur l'éolienne à axe horizontal, et ses différents éléments constitutifs et finalement nous avons cité quelques exemples parmi les machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.

Chapitre II

**Etat de l'art sur le diagnostic des
éoliennes**

II.1 Introduction

L'énergie éolienne représente actuellement une des plus importantes ressources d'énergie renouvelable. Ces installations sont généralement situées dans des sites isolés et cela sera renforcé avec le développement des installations off-shore. Il est donc important de mettre en place des techniques de surveillance et de détection de défaut dans les parcs éoliens. Actuellement, chez la plupart des constructeurs d'éoliennes, la détection de défaut est basée sur des dépassements de seuils de certains paramètres.

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom: FDI (Fault Détection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Ce chapitre résume un état de l'art sur le diagnostic. Après une présentation des concepts de base concerne les différentes notions et définitions utilisées en diagnostic et système de diagnostic en général, nous abordons la détection et la localisation de défauts, la mise en œuvre des techniques de diagnostic appropriées et en termine par l'étude des différents type de défaut *mécanique* des éoliennes.

II.2 Généralités sur le diagnostic

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » [16].

II.2.1 Les différentes notions utilisées en diagnostic

Afin de fixer une base commune sur le vocabulaire employé, il convient tout d'abord d'explicitier quelques définitions [16], [17], [18], [19] :

- **Une anomalie** est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.
- **Une défaillance** est une anomalie altérante ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, cet état de panne on pourra l'appeler mode de défaillance.
- **Une panne** est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Un défaut** est une anomalie de comportement d'un système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance donc de panne.
- **Une perturbation** consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, bon ou mal, représenté par un modèle de référence.
- **Un résidu** est un signal conçu comme un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
- **Un symptôme** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
- **Le diagnostic** consiste à déterminer le type, la taille, le lieu et l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défaut et inclut l'isolation et l'identification.
- **La surveillance** est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.
- **La supervision** est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défaut.

II.2.2 Diagnostic d'un système

Le diagnostic d'un système est l'identification du mode de fonctionnement, à chaque instant, par ses manifestations extérieures (symptômes). Son principe général consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la

connaissance que l'on a de son fonctionnement normal ou défaillant. Si le mode de fonctionnement identifié est un mode défaillant, le système de diagnostic devrait localiser sa cause. Il est évident que si l'on veut représenter tous les défauts possibles d'une installation industrielle, la tâche peut être considérable [20].

II.2.3 Procédure du diagnostic

Dans le but de faire un diagnostic des défaut qui peuvent se produire dans un système physique, avant l'échec total, et dans la mesure du possible déterminer les causes qui en sont à l'origine, une procédure de reconnaissance doit être appliquée, cette procédure comporte les étapes suivantes [17], [20] :

Détection La détection (Fault detection) est la première décision que doit prendre un système de surveillance. C'est le fait de décider qu'un indicateur de défaut est pertinent et donc de signaler si le système est défaillant ou pas. La détection revient à choisir entre deux hypothèses la première correspond au fonctionnement normal, la deuxième correspond au fonctionnement défaillant. Pour détecter les défauts d'un système, il faut donc être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Localisation La localisation (Fault isolation) est le fait de déterminer le(s) sous-ensemble(s) fonctionnel(s) défaillant(s). Cet ensemble a intérêt à être le plus réduit possible. La localisation est plus difficile dans le cas de défauts multiples où plusieurs défauts peuvent avoir lieu en même temps.

Identification L'identification ou l'estimation (Fault evaluation) vise à fournir des informations quantitatives sur les caractéristiques du défaut : instant d'apparition, valeur de l'écart d'un paramètre permettant de le quantifier. Dans le cas de défaut procédé, l'identification revient à connaître les valeurs de différents paramètres du système.

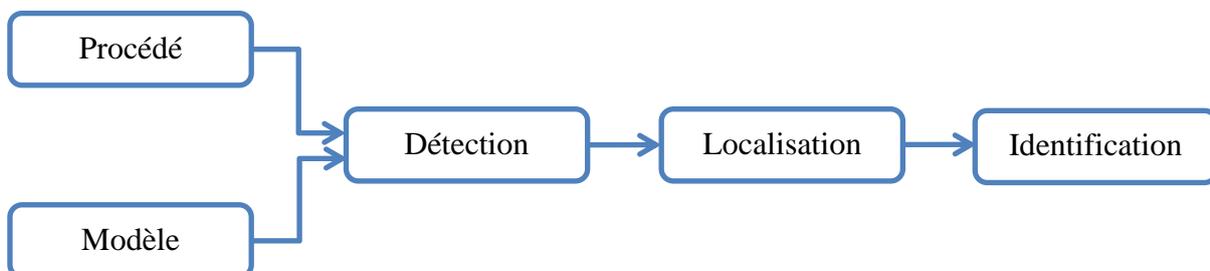


Figure II.1 : Procédure de détection et d'isolation des défauts.

II.2.4 Type de défaut

Un défaut peut être défini comme une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant. Un système défaillant (qui subit un défaut) est incapable d'accomplir correctement ça où ces fonctions avec les performances requises. Comme le montre la **Figure II.2**, nous distinguons trois types de défauts [17], [20], [21] :

Défauts capteurs : défauts représentant l'ensemble des problèmes liés à la prise d'information sur l'état physique du système (mauvais étalonnage du capteur, vieillissement de l'organe récepteur d'un capteur, etc...).

Défauts actionneurs : défauts qui agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système (perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, etc...).

Défauts système : défauts identifiés à la modification des caractéristiques du système proprement dit. Soit due à une variation significative des paramètres du modèle (vieillesse des matériaux par exemple) soit à un changement structurel causant une modification du flot d'informations entre les différentes variables (tel qu'une fuite dans une cuve).

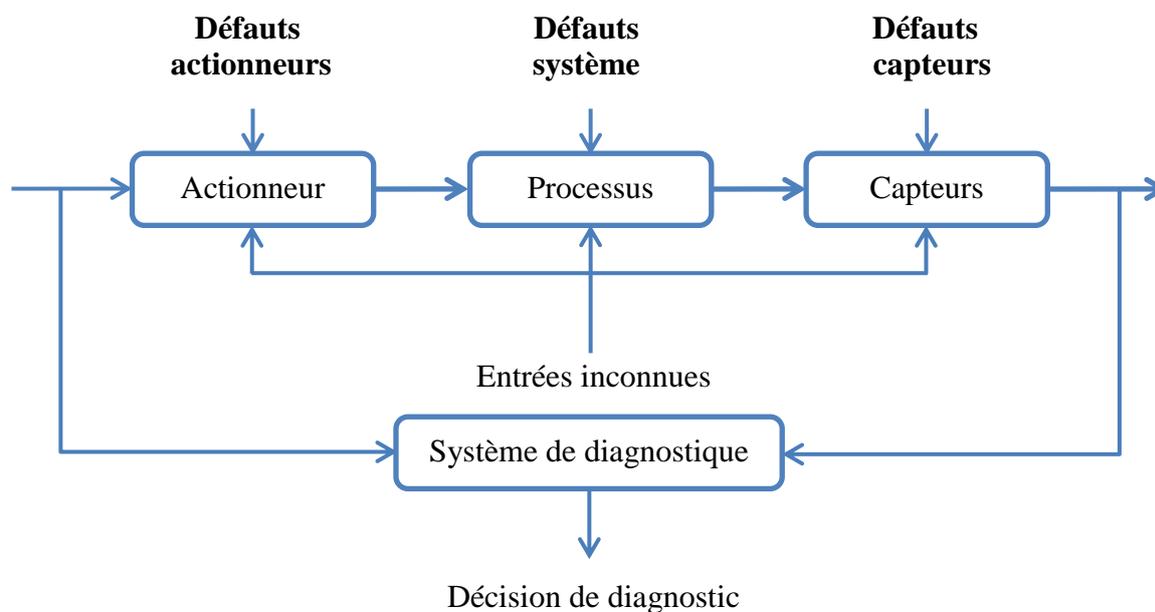


Figure II.2 : Description des types de défauts.

II.3 Aperçu sur les méthodes du diagnostic

Actuellement, il existe différentes communautés de recherche, telles que la communauté de l'automatique, de l'intelligence artificielle, de génie électrique, du traitement de signal qui s'intéressent au diagnostic.

La littérature sur le diagnostic de défauts dans les processus industriels est vaste, étendant des méthodes analytiques à l'intelligence artificielles. D'un point de vue de modélisation, selon que l'on dispose, ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes familles. Dans la première, la plus familière aux automaticiens, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement où l'état du système puis décider s'il est normal ou anormal. Dans la deuxième, c'est l'analyse des données fournies par une base de connaissance (reconnaissance de signature déjà observée) qui permet de décider de son état [18].

Les méthodes de diagnostic industriel tel qu'elles sont présentées dans ce paragraphe sont illustrées sur la **Figure II.3**. D'autre façon de classer les diverses méthodes et techniques de diagnostic ont été proposées dans [16], [17], [22], [23].

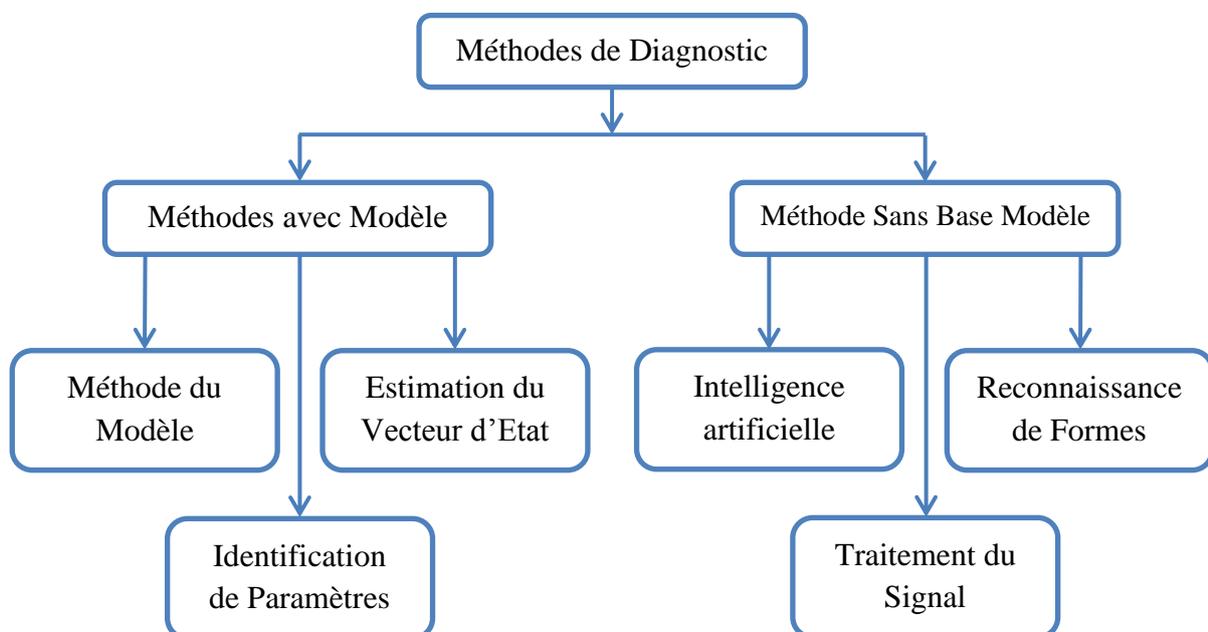


Figure II.3 : Les différentes méthodes de diagnostic.

II.3.1 Les méthodes à base de modèle (Les méthodes internes)

Les méthodes de diagnostic à base de modèle sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles prennent en compte les équations régissant les phénomènes internes du système et qui expriment les connaissances profondes sous la forme d'un modèle mathématique (équations d'état, forme matricielle).

II.3.2 Les méthodes s'appuyant sur une base de connaissance (Les méthodes externes)

Ces méthodes ont la particularité de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé. Seulement la disponibilité de grande quantité de données historiques du processus (signatures déjà observées) est nécessaire. Il y a diverse façon de traiter ces données et de les présenter en tant que connaissance a priori pour le diagnostic.

II.3.2.1 Détection des défauts par traitement du signal

Les caractéristiques des signaux fournis par des capteurs sont les données disponibles contenant les informations pertinentes pour le diagnostic. Les méthodes de diagnostic à base de traitement du signal associent, suite à l'analyse des signaux, des signatures propres au fonctionnement sain ou défaillant du système surveillé. La précision de l'analyse effectuée est essentielle pour une bonne décision suite au diagnostic.

Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les transformées de Fourier, les fonctions d'auto corrélation ou la densité spectrale de puissance (DSP) [24], [25].

Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'un défaut. Il faut également citer les méthodes temps-fréquence qui peuvent être, dans certain configuration (signaux non-stationnaires), plus riche que l'analyse spectrale, citons comme exemple les ondelettes [26], [27], [28].

II.4 Les principaux défauts mécaniques des éoliennes

Un résumé de panne des composants de turbine est tracé sur la **Figure II.4**. Les données représentent environ 27 turbines, s'étendent de 500 KW à 5 MW, pour les applications sur terre et mer. Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ce type de machine ce qui explique le taux élevé des pannes dues à la boîte de vitesse (gearbox) ainsi que le générateur et les roulements qui ensemble engendre la majorité des pannes de l'éoliennes [29].

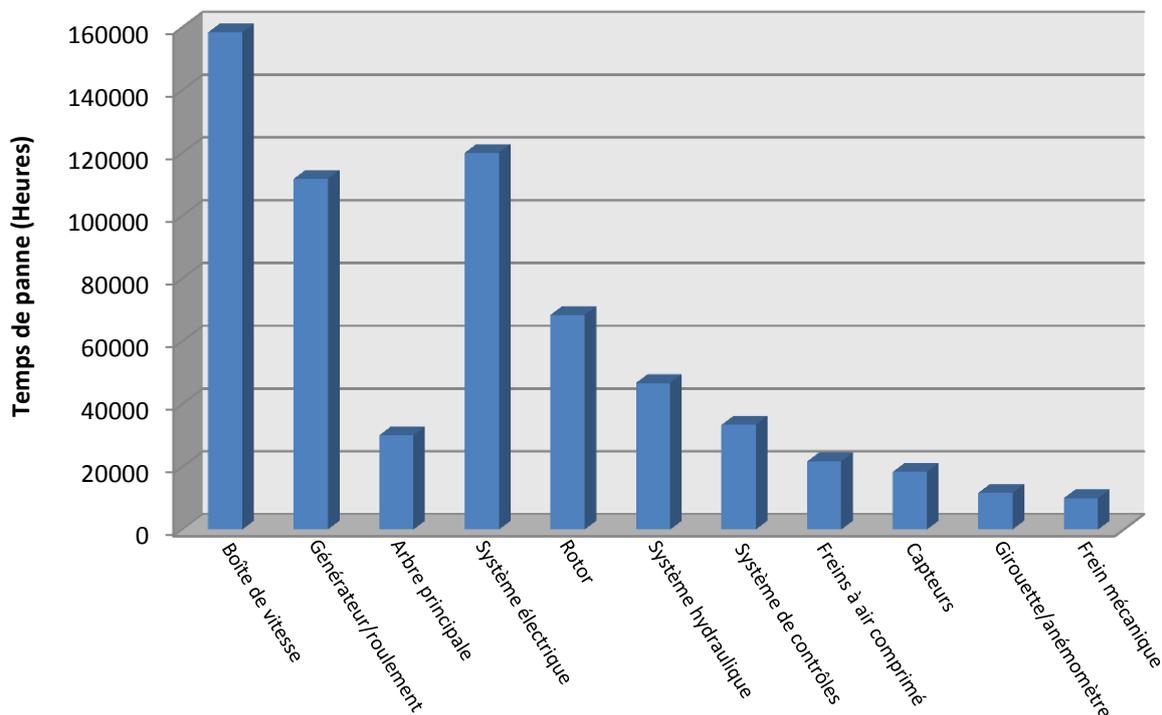


Figure II.4 : Pannes provoqués par des sous-systèmes de l'éolienne.

II.4.1 Défauts de roulements

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre les quelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (**Figure II.5**). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations [24], [30].

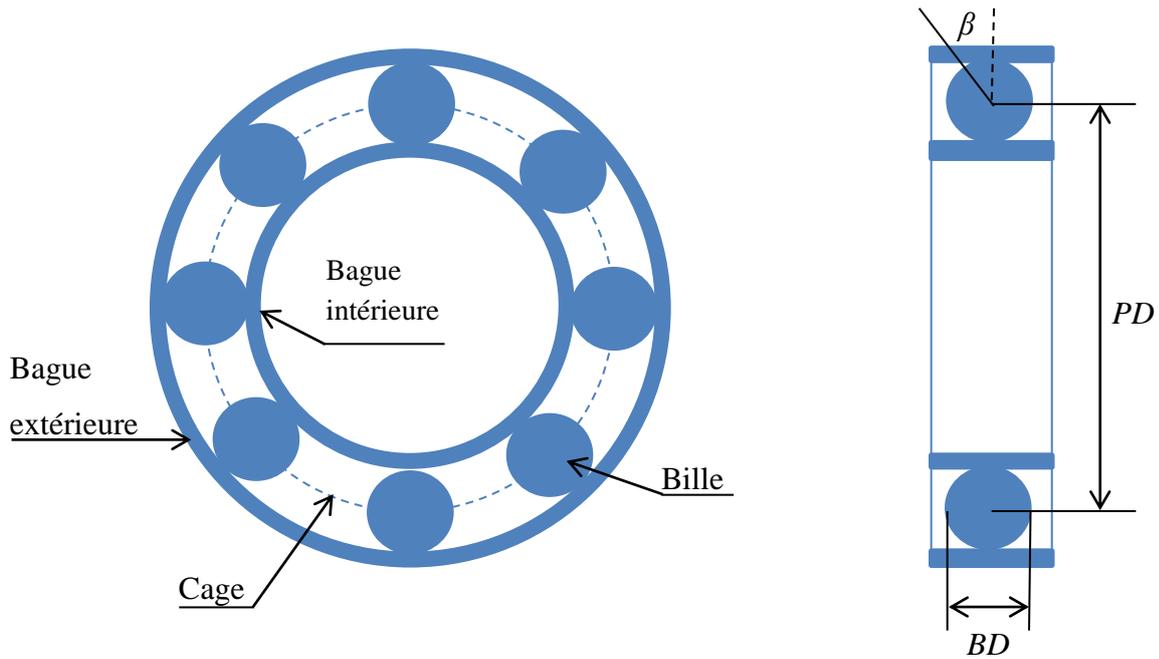


Figure II.5 : Dimension du roulement à bille.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement, ainsi que la vitesse de rotation (f_{rot}).

Selon [24], [25], les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (\text{II. 1})$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (\text{II. 2})$$

- **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (\text{II. 3})$$

où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, n_b est le nombre d'éléments roulants, β angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor.

II.4.2 Défauts de la boîte à vitesse

Le rôle principale de la boîte à vitesse est de multiplier la vitesse de rotation de l'arbre principale. Elle est munie d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

La boîte de vitesse est la partie la plus importante de la turbine. En raison des longues conditions de travail, ses défauts sont divers [29], [31], [32] :

- **Usure** : phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement relatif de deux surfaces l'une sur l'autre.
- **Usure par adhésion** : apparaît lorsque la pression de contact entre les deux surfaces « frottant » l'une sur l'autre est suffisante pour provoquer des déformations plastiques, des microsoudures ou des adhésions locales.
- **Grippage** : résulte de la rupture du film lubrifiant sous l'action d'une surchauffe ou d'une pression excessive en fonctionnement, provoquant un contact métal/métal entre les surfaces, soudure puis arrachement.
- **Usure à trois corps** : causée par la présence d'un troisième corps (en général abrasif) « véhiculé » entre les deux surfaces en contact par le lubrifiant.
- **Usure par interférence** : Produite au début où en fin d'engrènement par les interférences de fonctionnement entre les dents conjuguées (mauvaise conception géométrique, flexion exagérée des dents en service).
- **Corrosion** : attaque chimique où électrochimique du matériau.
- **Fatigue de contact** : détérioration des surfaces de contact due aux contraintes répétées à la surface où en sous-couche dont les valeurs dépassent les limites d'endurance à la pression des matériaux.
- **Ecaillage** : endommagements profonds initiés en sous-couche des dents d'engrenages traités superficiellement, à la profondeur de la contrainte de cisaillement maximum.

II.4.3 Autres défaillances mécaniques

Les éoliennes sont conçues pour le travail à long terme dans le vent, pluie, neige et d'autres environnements durs, les unités peuvent facilement mener au déséquilibre de rotor, des lames et corrosion de moyeu et d'autres défauts. En revanche, le taux de défaut des pales est relativement petit [29], [31], [32].

II.4.3.1 Rotor

Les causes des défaillances au niveau du rotor

- Défaut d'ajustement des pales ;
- Vieillessement, fissuration ;
- Endommagements (par ex. coup de foudre).

II.4.3.2 Système d'orientation de la nacelle

La direction du vent change avec le temps, et les générateurs du vent doivent être face au vent pour employer leurs énergies au maximum. Les défauts du système d'orientation n'est pas précis, la majorité est due aux engrenages ce qui donnent un bruit anormal et fuite de lubrifiant, etc.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur le diagnostic des éoliennes. Vu que chaque famille de machines possède des caractéristiques différentes, les méthodes de diagnostic qui leur sont associées sont également différentes. De même, la puissance et le coût des machines à surveiller jouent un rôle important dans la méthode de diagnostic choisie. Deux catégories de méthodes ont été présentées : les méthodes à base de modèles, les méthodes sans base de modèles. Le choix d'une de ces méthodes dépend essentiellement des connaissances disponibles sur le procédé, sans oublier les considérations techniques et économiques.

Nous avons présenté, également, les différents défauts mécaniques qui apparaissent dans les éoliennes. Nous avons fait un survol sur les différentes méthodes de diagnostic et nous avons opté sur l'approche signal dans le domaine spectral. La variation du spectre est donc un moyen correct pour détecter et même parfois pour localiser un défaut car les défauts donnent naissance à des raies spectrales bien particulières.

Chapitre III

Diagnostic par l'analyse spectrale des signaux vibratoires

III.1 Introduction

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc..., ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Le principe des méthodes d'analyse du signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première partie de ce chapitre concerne la présentation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel. La deuxième partie consiste à une mise en œuvre du diagnostic par l'approche de Fourier sur des signatures vibratoire issues d'une éolienne à axe horizontal.

III.2 Bref historique

Nous devons nos connaissances du traitement du signal en majeure partie au Baron Joseph FOURIER (Auxerre 1768 - Paris 1830) qui, en étudiant la propagation de la chaleur, découvrit les séries trigonométriques dites séries de FOURIER. Il améliora ce puissant outil mathématique pour l'appliquer à tout type de signal. Depuis quelques années seulement, les outils électroniques ont permis de mettre en application ces formules mathématiques, grâce notamment aux américains COOLEY et TUKEY. Ils ont donné naissance à l'algorithme de calcul FFT (Fast Fourier Transform) que l'on retrouve dans la plupart des analyseurs du spectre [33].

III.3 Généralité sur le traitement du signal

III.3.1 Définitions de base

Un **signal** est la représentation physique de l'information qu'il transporte de sa source à son destinataire. Il sert de vecteur à une information. Il constitue la manifestation physique d'une grandeur mesurable (courant, tension, force, température, pression, etc.).

La **théorie du signal** a pour objectif fondamental la « description mathématique » des signaux. Cette représentation commode du signal permet de mettre en évidence ses principales caractéristiques (distribution fréquentielle, énergie, etc.) et d'analyser les modifications subies lors de la transmission ou du traitement de ces signaux.

Le **traitement du signal** est la discipline technique qui, s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, a pour objet l'élaboration ou

l'interprétation des signaux. Son champ d'application se situe donc dans tous les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux.

III.3.2 Principales fonctions du traitement du signal

Les fonctions du traitement du signal peuvent se diviser en deux catégories : l'élaboration des signaux (incorporation des informations) et l'interprétation des signaux (extraction des informations). Les principales fonctions intégrées dans ces deux parties sont les suivantes :

- Élaboration des signaux :
 - synthèse : création de signaux de forme appropriée en procédant par exemple à une combinaison de signaux élémentaires ;
 - modulation, changement de fréquence : moyen permettant d'adapter un signal aux caractéristiques fréquentielles d'une voie de transmission ;
 - codage : traduction en code binaire (quantification), etc.
- Interprétation des signaux :
 - filtrage : élimination de certaines composantes indésirables (bruit) ;
 - détection : extraction du signal d'un bruit de fond ;
 - identification : classement d'un signal dans des catégories préalablement définies ;
 - analyse : isolement des composantes essentielles ou utiles d'un signal de forme complexe (transformée de Fourier) ;
 - mesure : estimation d'une grandeur caractéristique d'un signal avec un certain degré de confiance (valeur moyenne, énergie, etc.).

III.4 Représentation des signaux

III.4.1 Modélisation des signaux

Un signal expérimental est une grandeur physique et doit donc être physiquement réalisable. Les mesures macroscopiques analogiques, réalisées à partir d'appareils de mesures comme un oscilloscope, fournissent des courbes « tension en fonction du temps » du type de celle représentée sur la **Figure III.1**. Ces signaux physiques sont représentés par des fonctions $s(t)$ à valeurs réelles d'une variable réelle t . Par conséquent, le signal possède les caractéristiques suivantes [34] :

- énergie bornée ;
- amplitude bornée ;
- continu temporellement ;
- causal ($s(t) = 0$ pour $t < 0$) ;
- spectre du signal borné (tend vers 0 lorsque f tend vers ∞).

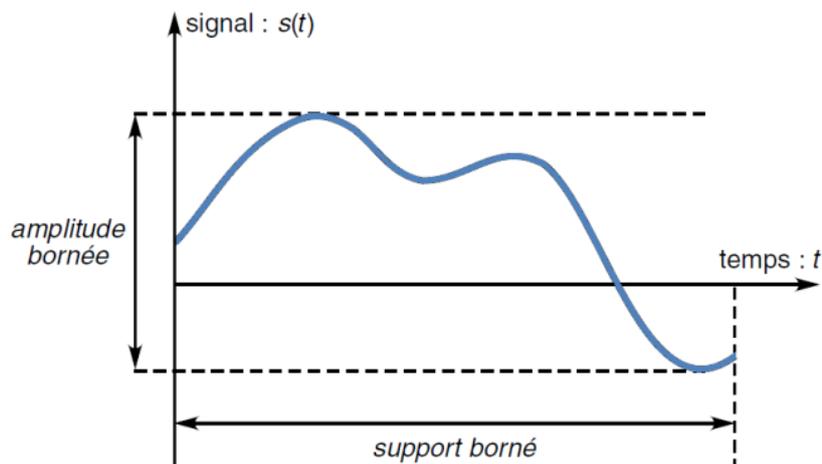


Figure III.1 : Représentation d'un signal physique réel.

III.4.2 Classification des signaux

Pour faciliter l'étude des signaux, différents modes de classification peuvent être envisagés [34] :

- représentation temporelle ;
- représentation spectrale.

III.4.2.1 Représentation temporelle des signaux

La première classification, basée sur l'évolution du signal en fonction du temps, fait apparaître deux types fondamentaux :

Les **signaux certains** (ou déterministes) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat.

Les **signaux aléatoires** (ou probabilistes) dont le comportement temporel est imprévisible et pour la description desquels il faut se contenter d'observations statistiques.

III.4.2.2 Représentation spectrale (fréquentielle)

Un signal peut être classé suivant la distribution de son amplitude, sa puissance où son énergie en fonction de la fréquence (spectre du signal). Le domaine des fréquences occupé par son spectre est aussi appelé la *largeur de bande spectrale du signal* ΔF (**Figure III.2**) :

$$\Delta F = F_{max} - F_{min} \quad (\text{III. 1})$$

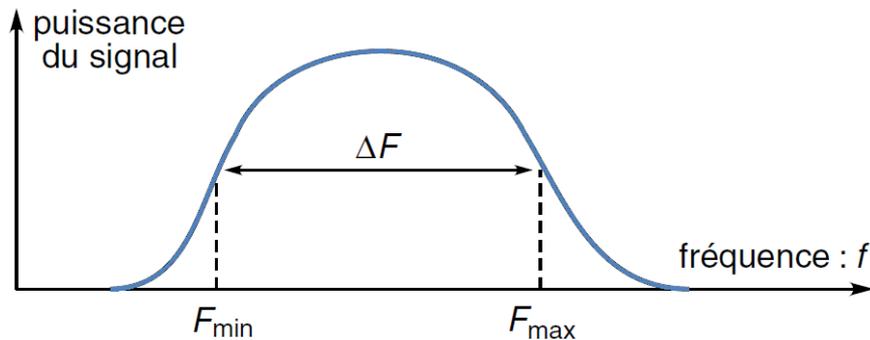


Figure III.2 : *Distribution spectrale d'un signal.*

Cette caractéristique, exprimée en hertz (Hz). Aussi il est nécessaire de la comparer au domaine de fréquences dans lequel se situe le signal. En considérant la fréquence moyenne $F_{moy} = (F_{max} + F_{min})/2$, on peut distinguer deux types de signaux :

- les signaux à bande étroite avec $\Delta F / F_{moy}$ petit (soit $F_{max} \approx F_{min}$) ;
- les signaux à large bande avec $\Delta F / F_{moy}$ grand (soit $F_{max} \gg F_{min}$).

III.5 Analyse de Fourier

L'analyse de Fourier consiste à décomposer l'énergie du signal analysé par bandes de fréquence. Il en résulte une analyse plus fine, avec la possibilité de dissocier dans le domaine fréquentiel. L'analyse dans le domaine fréquentiel est la contrepartie indispensable de l'analyse dans le domaine temporel du signal ; il n'est en effet pas rare que des phénomènes difficilement discernables dans l'un des domaines apparaissent clairement dans l'autre.

Outre son importance dans la compréhension des phénomènes physiques en acoustique et vibrations (modes de résonances, fréquences caractéristiques,...), l'analyse de Fourier permet la surveillance et le diagnostic par le suivi des changements du spectre fréquentiel. Il est classique de fixer un gabarit fréquentiel, caractéristique d'un état sain, et d'y confronter les mesures courantes. L'analyse de Fourier est particulièrement bien adaptée à la surveillance et au diagnostic des machines tournantes dont les signaux répartissent leur énergie sur des harmoniques bien localisés en fréquence. L'amplitude et la position de ces

harmoniques constituent une véritable « signature mécanique » de l'état de la machine. Toute déviation anormale indique l'apparition d'un défaut, également susceptible d'être identifié par reconnaissance de sa signature fréquentielle [35].

III.5.1 Les séries de Fourier

Nous allons voir qu'à l'aide de la décomposition en séries de Fourier, il est simple de mettre en évidence les fréquences contenues dans un signal périodique. La décomposition en séries de Fourier d'un signal est constituée d'une infinité de fréquences multiples de la fréquence du fondamental.

III.5.1.1 Développement en série de Fourier

Soit $s(t)$ un signal périodique de période $T_0 = \frac{1}{f_0}$, $s(t)$ peut se décomposer en une somme infinie de fonctions sinusoïdales et cosinoïdales dépendant du temps, la fonction $s(t)$ peut être développée sous la forme de la série suivante [38] :

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cos(nw_0t) + b_n \sin(nw_0t) \quad (\text{III. 2})$$

Avec $w_0 = 2\pi f_0$

a_n et b_n sont les coefficients de la série de Fourier, f_0 représente la fréquence du fondamental. Ils se calculent à partir des relations suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) dt \quad (\text{III. 3})$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) \cos(nw_0t) dt \quad (\text{III. 4})$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) \sin(nw_0t) dt \quad (\text{III. 5})$$

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

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

a_0 Représente la valeur moyenne du signal $s(t)$.

III.5.1.2 Développement sous forme complexe

Il est possible également de mettre le développement (III.2) sous la forme complexe suivante [33] :

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp(jn\omega_0 t) \quad (\text{III. 6})$$

Les coefficients C_n s'obtiennent par :

$$C_n = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) \exp(-jn\omega_0 t) dt \quad (\text{III. 7})$$

III.5.2 Transformation de Fourier

III.5.2.1 Définition

Par définition, la transformée de Fourier d'un signal $s(t)$ s'écrit [20], [22], [33] :

$$S(f) = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (\text{III. 8})$$

$S(f)$ est une fonction de f , en général complexe, qui comprend donc une partie réelle $Re [S(f)]$ et une partie imaginaire $Im [S(f)]$:

$$Re[S(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cos(\omega t) dt \quad (\text{III. 9})$$

et

$$Im[S(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \sin(\omega t) dt \quad (\text{III. 10})$$

La transformation inverse est obtenue par :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \exp(+j\omega t) df \quad (\text{III. 11})$$

avec $\omega = 2\pi f$.

III.5.2.2 Conditions de validité

Pour que la transformée de Fourier de $s(t)$ existe et soit réciproque, il suffit que $s(t)$ soit une fonction de carré sommable. Cela signifie que $s(t)$, ainsi que sa transformée de Fourier, sont à énergie finie. Toutes les fonctions existant physiquement vérifient ces conditions parce qu'on les observe sur un temps fini [34].

III.5.3 Transformée de Fourier discrète TFD

Un échantillon discret est l'ensemble des valeurs d'un signal continu prises aux instants $t_i = t_0 + i\Delta t$, i étant un entier positif. La discrétisation d'un signal induit une perte d'information qui peut être préjudiciable au diagnostic. Cette perte d'information est liée au nombre des composantes des fréquences élevées qu'introduit le processus de discrétisation (théorème de Shannon), ($f_e \leq 2f_{max}$) [36].

L'opération de discrétisation est effectuée périodiquement sur le signal temporel à une période T_e . La fréquence d'échantillonnage équivaut alors à $f_e = \frac{1}{T_e}$ comme le montre la

Figure III.3 :

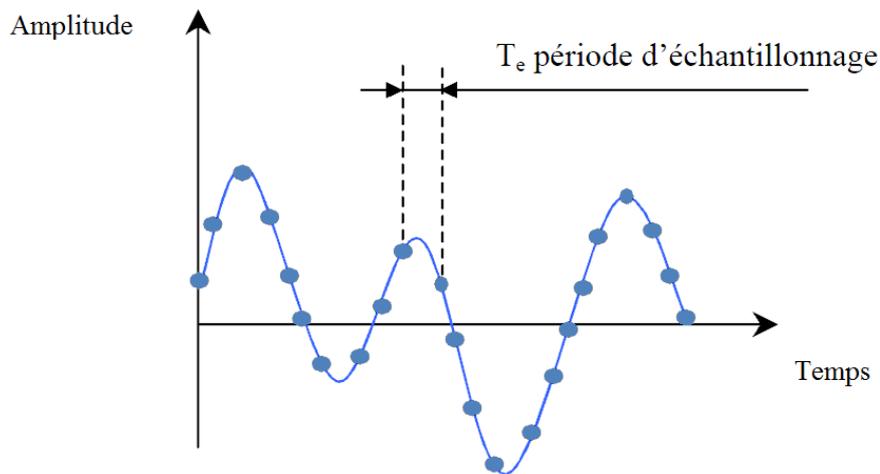


Figure III.3 : Discrétisation du signal.

III.5.3.1 Définition de la TFD

On appelle Transformée de Fourier Discrète (TFD ou DFT : *Discrete Fourier Transform*) d'un signal défini par N échantillons, la suite de N termes définie par [20], [33], [34] :

$$S(f) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp(-j2\pi fk) \quad (\text{III. 12})$$

Si les N échantillons ont été prélevés avec une fréquence d'échantillonnage F_e ($F_e = \frac{1}{T_e}$), la durée du signal échantillonné, sur laquelle a été calculée la transformée de Fourier discrète, est donnée par :

$$\tau = N \cdot T_e = \frac{N}{F_e} \quad (\text{III. 13})$$

En conséquence, le spectre de ce signal échantillonné, composé aussi de N termes, est calculé sur un domaine fréquentiel $[0, F_e]$ avec une précision ou résolution fréquentielle entre points égale à :

$$\Delta f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{N \cdot T_e} = \frac{F_e}{N} \quad (\text{III. 14})$$

III.5.4 Transformation de Fourier rapide TFR

La transformée de Fourier rapide **TFR** ou **FFT** (*Fast Fourier Transform*) est tout simplement un algorithme permettant de réduire le nombre d'opérations, en particulier le nombre de multiplications, pour calculer la TFD. Ce temps de calcul est en effet primordial pour réaliser des systèmes numériques en « temps réel » [20], [34].

III.6 Mise en œuvre

Nous avons vu qu'il existait de nombreuses causes de pannes dans les systèmes éoliens. L'étude effectuée dans le Chapitre II a montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des éoliennes considérées.

Lorsqu'un défaut localisé apparaît en un point d'un des éléments du roulement, cela entraîne une vibration à la fréquence caractéristique associée à l'élément en défaut. En effet, si un défaut se situe sur le chemin de roulement d'une des bagues ou sur une bille, il se produit un choc mécanique à chaque fois que le défaut est confondu avec un point de contact bille/bague. Ces chocs répétés se traduisent alors par des vibrations. De manière simplifiée, cette vibration peut être modélisée par un signal périodique dont la période fait intervenir la période caractéristique de l'élément en défaut. On pourra alors parler de fréquence de défaut [37].

III.6.1 Caractéristiques des défauts de roulement

Nous nous intéressons à la détection du défaut de roulement de type RS 6028-2RS dans une éolienne à axe horizontal, un défaut d'écaillage sur la bague externe a été introduit.

Ce défaut engendre des vibrations dont la fréquence dépend des caractéristiques géométriques du roulement et de la fréquence de rotation.

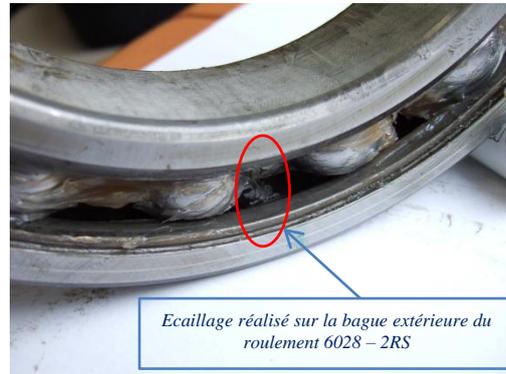


Figure III.4 : Ecaillage du roulement.

Nous effectuons le calcul de la fréquence d'apparition du défaut bague externe avec :

DB = diamètre d'un élément roulant = 20.5 mm.

PD = diamètre du roulement = 175 mm.

f_{rot} fréquence de rotation = 50 Hz.

n_b = nombre des billes du roulement = 16.

La fréquence du défaut bague externe :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (\text{III. 15})$$

Avec β : Angle de contact entre la bille et la bague $\approx 0^\circ$;

Les résultats sont illustrés sur le tableau suivant :

Vitesse (tr/mn)	Fréquences du roulement dégradé (Hz)			
	f_{cage}	f_b	$f_{b.ext}$	$f_{b.int}$
3004 (V5)	0.28	5.40	4.53	5.73

Tableau III.1 : Fréquence théoriques des défauts.

III.6.2 Analyse des signaux vibratoire dans le domaine temporel

L'analyse temporelle d'un signal est une étape utile, car elle permet de se renseigner sur le commencement, la fin et la durée de ses éléments caractéristiques à savoir : les

discontinuités, les changements de rythme, etc. Mais elle ne renseigne pas sur certaines périodicités cachées.

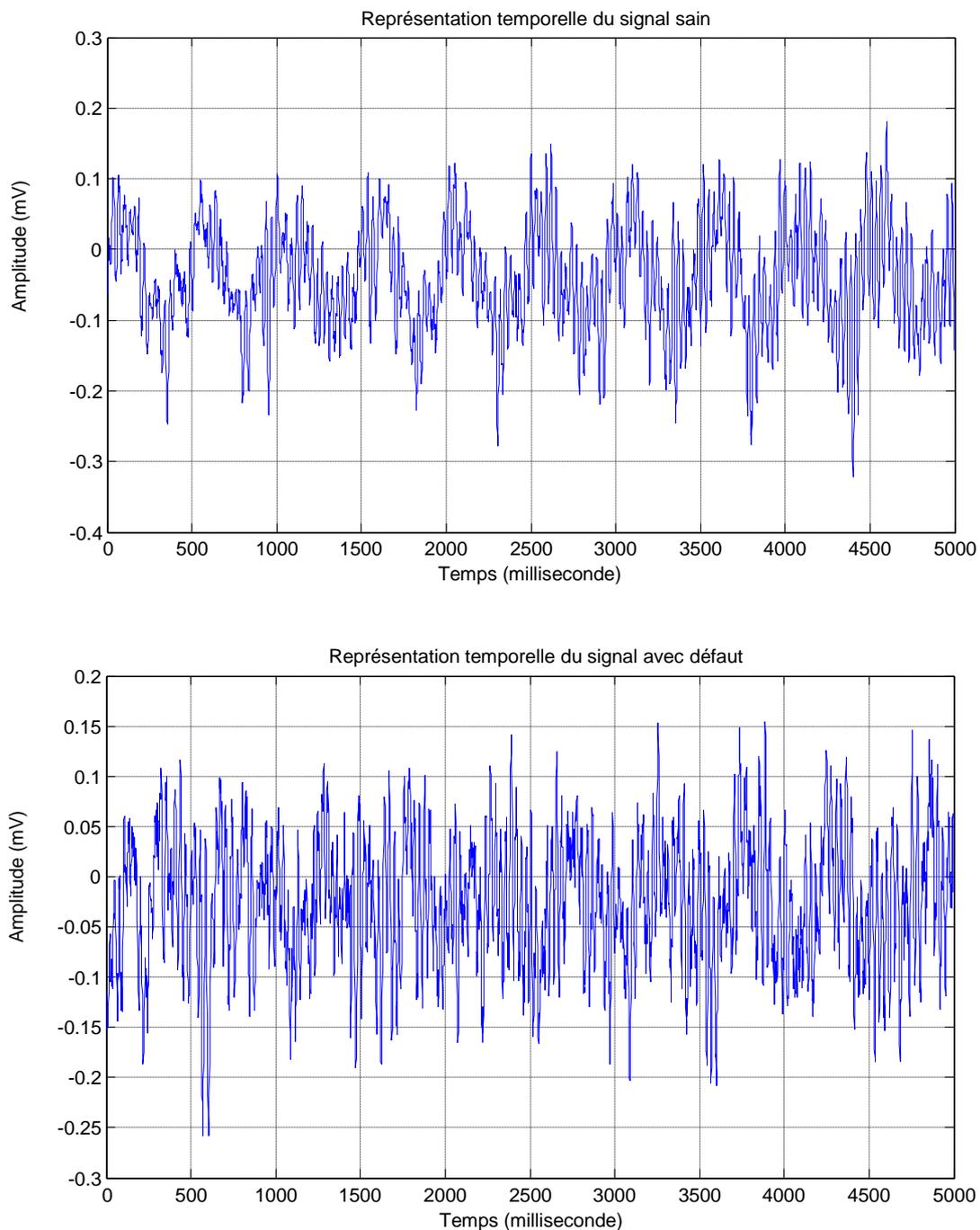


Figure III.5 : Représentation temporelle du signal sain et du signal avec défaut.

Une étude statistique est réalisée sur les deux signaux réel, les résultats sont donné dans le tableau ci-dessous :

	Moyenne	Ecart type	Kurtosis	Skewness
Cas sain	0.0409	0.0749	2.6605	0.0081
Avec défaut	0.0258	0.0654	2.8511	0.0312

Tableau III.2 : Etude statistique des deux signaux.

A partir de la **Figure III.5** et du **Tableau III.2** on remarque une différence entre l'évolution de l'amplitude d'un cas sain et d'un cas avec défaut ainsi que dans les caractéristiques statistiques. Donc on peut différencier les deux cas mais on ne peut pas identifier la nature du défaut, d'où le passage au domaine fréquentiel.

III.6.3 Étude dans le domaine spectral

Les vibrations se présentent sous la forme de la répétition temporelle à la période caractéristique du défaut. La première méthode à investiguer pour détecter ces harmoniques dans un signal est l'analyse spectrale.

Selon la localisation du défaut où sa sévérité, les vibrations font intervenir des multiples de la fréquence caractéristique du défaut créant ainsi un *peigne d'harmoniques*, mais également d'autres fréquences caractéristiques comme la fréquence de la cage ou la fréquence de rotation mécanique (f_{rot}).

III.6.3.1 Densité spectrale de puissance

On définit la **Densité Spectrale de Puissance** (*DSP* en abrégé, *Power Spectral Density* ou *PSD*) comme étant le carré du module de la "Transformée de Fourier" qui sera présenté sur la **Figure III.6** pour un signal sain et avec défaut [36].

On peut remarquer sur le spectre du signal avec défaut une modulation autour d'une porteuse $f_p = 120$ Hz et plus exactement dans la plage [100,150] Hz, l'apparition d'un ensemble d'harmoniques équidistantes à la fréquence caractéristique du défaut bague externe (4.6 Hz). Cette modulation a été créé suite à l'existence du défaut bague externe qui à une vitesse $V_5 = 3000$ tr/mn génère une fréquence de roulement dégradé de (4.53 Hz).

Des harmoniques supplémentaires, issus de combinaisons entre les fréquences caractéristiques peuvent apparaître dans le spectre vibratoire.

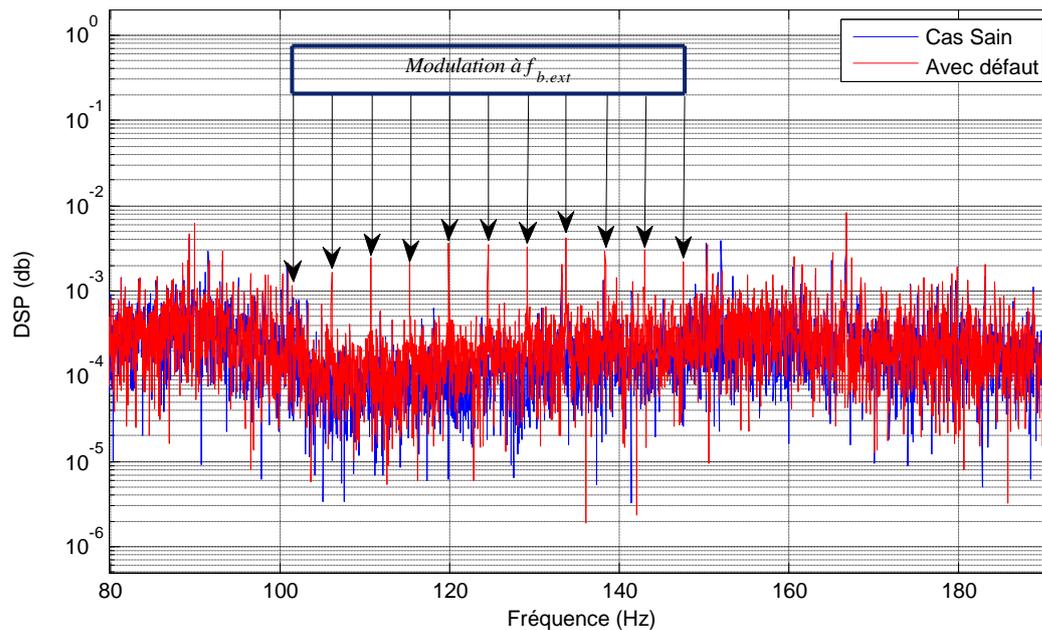


Figure III.6 : *DSP d'un signal sain et d'un signal avec défaut.*

III.7 Conclusion

Les techniques du traitement du signal ont largement fait leurs preuves dans le domaine du diagnostic. Elles permettent de détecter de façon précoce l'apparition d'un défaut, et même, pour certaines d'entre elles, d'en connaître l'origine.

Une analyse temporelle, et surtout fréquentielle, permet d'en déduire une mine d'informations : l'amplitude des chocs dépend de la dimension et de la géométrie du défaut, de la vitesse de rotation, de la charge, leur fréquence de répétition est liée notamment à la localisation du défaut (bague, bille, etc.). En comparant le signal obtenu avec un certain nombre de fréquences "caractéristiques" connues, on en déduit alors la nature du défaut.

Chapitre IV

**Application de l'analyse
temps-échelle en diagnostic
vibratoire**

IV.1 Introduction

Lors de la transformation vers le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier l'information du temps est perdue, on est ainsi incapable de définir quand un événement prend place. Pour remédier à cet inconvénient, une nouvelle technique de traitement s'est généralisée ces dernières années, bien qu'elle ait vu le jour au début du siècle. La méthode des ondelettes ou wavelets en anglais est sans doute un outil très efficace pour chiffrer, décrire, modéliser ou localiser tant de signaux dans plusieurs domaines : scientifique, technique, médical, ...etc.

Ce chapitre commence par des définitions nécessaires pour introduire la transformée en ondelettes à la détection des défauts et en analyse vibratoire des éoliennes.

IV.2 Historique sur les ondelettes

Les ondelettes ont vu le jour lorsque certains sujets d'étude ont nécessité une analyse en fréquence et en temps. En 1909, *Alfréd Haar* définissait une fonction composée d'une courte impulsion négative suivie d'une courte impulsion positive, connue pour être la première ondelette (Ondelette de Haar). En 1946, *Dennis Gabor*, mathématicien hongrois, inventa une transformation de fonction analogue à celle de *Joseph Fourier*, appliquée sur une fenêtre temporelle exprimée par une fonction gaussienne. Finalement, le terme d'ondelette a été introduit dans le langage mathématique par *Jean Morlet* et *Alex Grossmann* en 1984. Terme initialement français, il a été ensuite traduit en anglais par *wavelet*, avec le terme *wave* (onde) et le diminutif *let* (petite). En 1986, *Yves Meyer*, reconnu comme un des fondateurs de la théorie des ondelettes, rassembla toutes les découvertes précédentes, il en a dénombré 16, puis définit les ondelettes orthogonales. En 1986 également, *Stéphane Mallat* fit le lien entre les ondelettes et l'analyse multi-résolution. Enfin, en 1987, *Ingrid Daubechies* mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies, facilement implémentables [38].

IV.3 Transformée en ondelettes

La transformation en ondelettes permet de caractériser un signal simultanément dans le domaine temporel et fréquentiel, et donc de palier l'inconvénient de la transformation de Fourier qui a le désavantage de la perte de toute l'information temporelle. Pour cela, il existe plusieurs types : la transformée en ondelettes continue (CWT pour *Continuous Wavelet Transform*), la discrète (DWT pour *Discret Wavelet Transform*), et la transformée en paquets d'ondelettes (WPT pour *Wavelet Packet Transform*). Chaque transformation a ses avantages et ses inconvénients.

IV.3.1 Principe de la décomposition

L'idée de base de la transformation en ondelettes consiste à utiliser des fenêtres de pondération de fonction réelle à deux paramètres a et b de la forme $w_{a,b}(t)$. Une telle fonction se caractérise par :

- Le facteur d'échelle a : il mesure l'étirement ou la contraction de l'ondelette. Une faible valeur de a signifie une ondelette contractée temporellement ;
- b est le facteur de translation, tel qu'au cours du glissement du support d'analyse, la localisation de l'ondelette sur l'axe des temps change.

Le couple (a,b) constitue la variable temps-échelle de l'analyse. Par rapport à la transformée de Fourier, la différence réside dans l'utilisation d'une ondelette de base qui se déforme. Le concept d'échelle de dilatation est introduit à la place de la fréquence. C'est l'analyse multi-échelle [39], [40].

IV.3.2 Relation entre échelle et fréquence

Le terme « échelle » désigne la corrélation entre la taille de l'ondelette et celle des composantes que l'on recherche.

De manière générale, les ondelettes étendues (grandes échelles) conviennent pour voir la tendance du signal aux basses fréquences, autrement dit les composantes de longue durée. En effet, étirer les oscillations fait baisser leur fréquence. Par contre, celles qui sont fines ou contractées (petites échelles) permettent de se concentrer sur les hautes fréquences correspondant aux composantes transitoires en général. Elles poursuivent les variations rapides et fournissent des informations sur le temps d'apparition d'un évènement.

C'est ainsi que les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal [40].

IV.3.3 Choix des ondelettes

En raison de sa forme, l'ondelette de Daubechies se prête naturellement à l'analyse des signaux de type réponses impulsionnelles à un choc, ce type d'ondelette est aussi bien adapté pour détecter de brusques changements (discontinuités et impulsions) dans les signaux vibratoires venant d'un roulement défectueux [41].

IV.3.4 Transformée en ondelettes continue (CWT)

De l'analyse de Fourier ressortent des coefficients qui sont multipliés par des sinusoides de fréquences appropriées, permettent de reconstituer le signal initial. Dans l'analyse par ondelettes, les coefficients d'ondelettes (liés au type d'ondelette utilisé) pour une transformation sont donnés par [39], [40] :

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) w_{a,b}(t) dt \quad (\text{IV.1})$$

$s(t)$ étant le signal temporel, $w_{a,b}(t)$ la fonction de base de l'Ondelette. Tout se déroule comme si on projetait le signal sur une base des fonctions analysantes. Ces dernières sont de la forme :

$$w_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} w^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (\text{IV.2})$$

où $w^*(t)$ représente la fonction complexe conjuguée de $w(t)$.

et sont construites à partir de la fonction génératrice (en général complexe) appelée ondelette-mère. La **Figure IV.1** montre l'exemple de l'ondelette de Morlet et de chapeau mexicain.

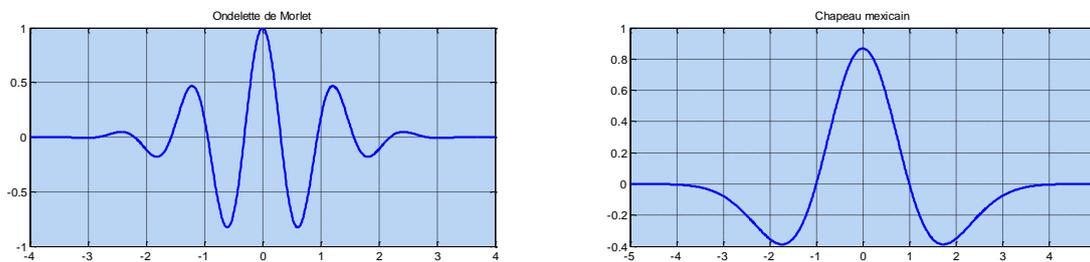


Figure IV.1 : Exemple d'ondelette mère.

Dès lors, une transformée en ondelettes continues s'écrit :

$$TO_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) w^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{IV.3})$$

La transformation inverse permet de reconstruire le signal original :

$$x(t) = k. \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w^* \left(\frac{t-b}{a} \right). TO_x(a, b). da db \quad (\text{IV.4})$$

La différence par rapport à la transformée de Fourier est l'utilisation de déformation (dilatation ou contraction) du motif de l'ondelette originale. La notion de fréquence laisse la place à la notion d'échelle de dilatation (d'où le nom d'analyses multi-échelles ou de représentation temps-échelle).

IV.3.4.1 Procédure de la CWT

La procédure permettant d'arriver à la transformation en ondelettes continues est décrite comme suit [40] :

1. Choisir une Ondelette d'analyse et la comparer à une portion au début du signal ;

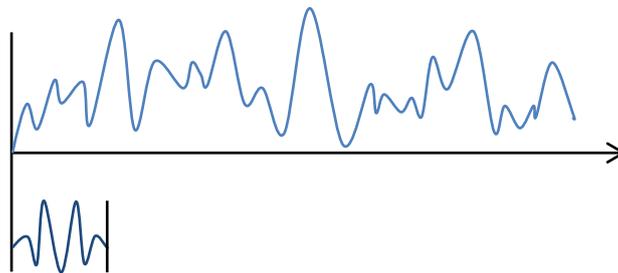


Figure IV.2 : Première phase pour la transformation en ondelettes continue.

2. Calculer le coefficient d'ondelette C représentant la valeur de la corrélation entre l'ondelette et le signal ;
3. Déplacer l'ondelette et refaire les opérations 1. et 2. jusqu'à balayer intégralement le signal,

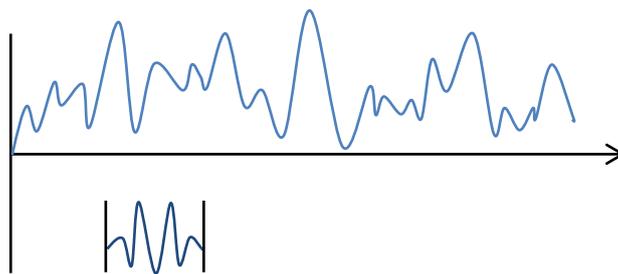


Figure IV.3 : Troisième phase pour la transformation en ondelettes continue.

4. Varier l'échelle de l'ondelette et répéter les opérations 1. à 3. puis les étapes 1. à 4. pour toutes les échelles.

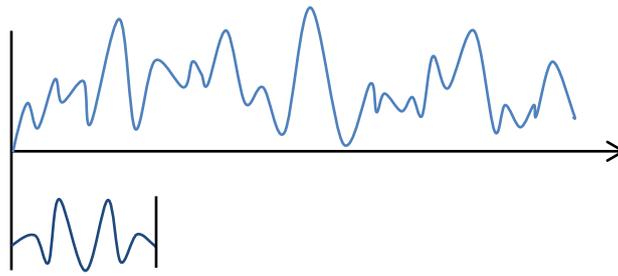


Figure IV.4 : *Quatrième phase pour la transformation en ondelettes continue.*

A la fin, on obtient les coefficients d'ondelettes aux différentes échelles et positions.

IV.3.4.2 Application de la CWT sur des signaux réels

En effectuant la transformée en ondelettes continue sur le signal sain et sur le signal mesuré lorsque le roulement avec défaut de piste est placé. Le roulement tourne à une vitesse de 3000 tr/min, le signal est conditionné avec une fréquence d'échantillonnage de 25 KHz, on obtient la **Figure IV.5**. Bien évidemment, la plage fréquentielle observée comprend la fréquence recherchée.

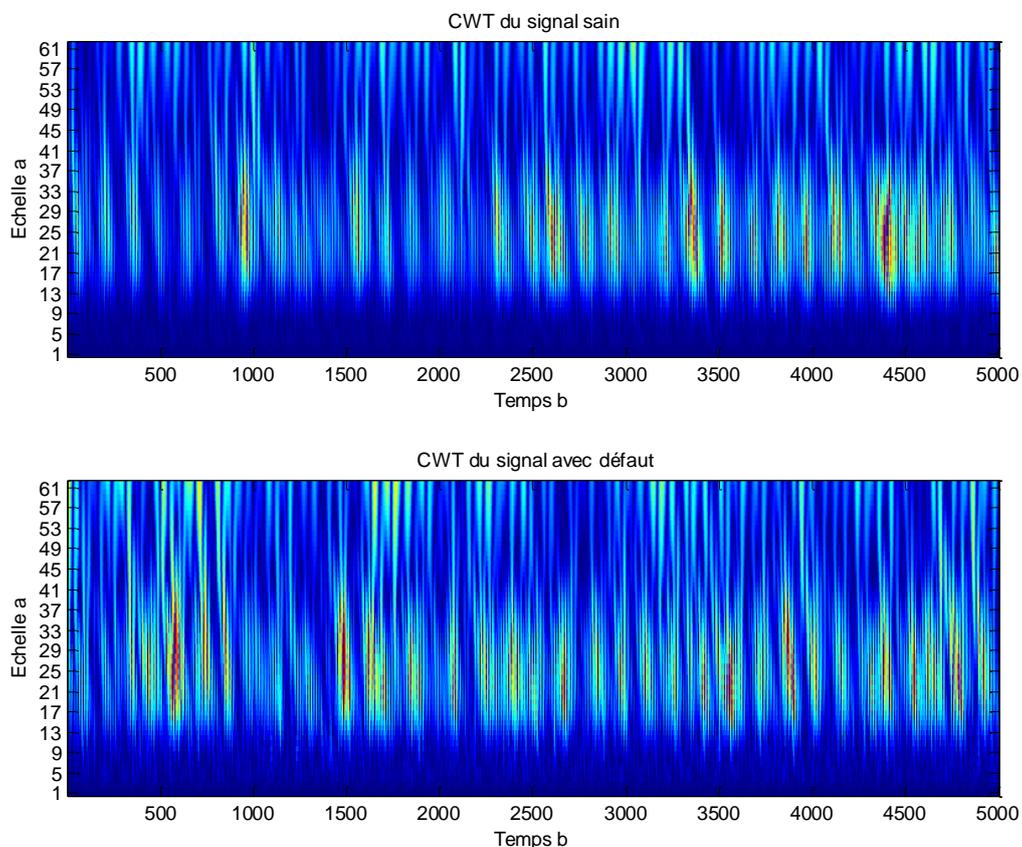


Figure IV.5 : *Application de la CWT sur des signaux réels.*

A partir de cette figure, il est difficile de dire si un défaut est présent ou pas. Les zones foncées sont plus importantes dans le cas avec défaut. Des légères raies peuvent être constatées en trouvant beaucoup plus dans le signal avec défaut, mais rien de réellement significatif. Il est impossible de se prononcer précisément : la CWT semble donc mal adaptée à ce genre de détection d'où le passage à la DWT.

IV.3.5 Transformée en ondelettes discrète [41], [42]

Il est possible de diminuer et même d'éliminer la redondance de la transformée ondelette continue en discrétisant les paramètres a et b tels que :

$$a = a_0^m, m \in \mathbb{Z} \quad \text{et} \quad b = nb_0 a_0^m, n \in \mathbb{Z}$$

où $a_0 > 1$ est un pas de résolution et $b_0 > 0$ dépend de l'ondelette choisie. La transformée ondelette mise en œuvre sur des valeurs discrètes de ces deux derniers paramètres est appelée transformée ondelette discrète ou DWT. Selon les choix de base d'ondelette et du schéma de discrétisation, la transformée ondelette discrète conduit à des informations redondantes ou non.

La famille d'ondelette ainsi obtenue est définie par :

$$w_{m,n} = a_0^{-\frac{m}{2}} w(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (\text{IV. 5})$$

et la transformée discrète en ondelettes d'un signal $s(t)$ est donnée par :

$$C(m,n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) w(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (\text{IV. 6})$$

En général, le facteur de dilatation a est une puissance de 2. C'est comme si on procède par échantillonnage avec des échelles égales à des puissances de 2. Le nombre de coefficients est ainsi considérablement réduit.

IV.3.5.1 Analyse multi-résolution

Dans la multi-résolution on examine le signal à résolution grossière, à l'aide d'ondelettes larges, et d'un petit nombre de coefficients, pour en tracer l'ébauche, ensuite on analyse aux résolutions fines, en utilisant un grand nombre de petites ondelettes, qui scrutent les détails. De cette manière les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal : elles utilisent une fenêtre étroite pour regarder les composantes transitoires de haute

fréquence, et une fenêtre large pour regarder les composantes de longue durée, de basses fréquences [42], [43].

IV.3.5.2 Algorithme de Mallat

Stéphane Mallat a donné un algorithme de décomposition en ondelettes qui permet d'obtenir une analyse multi-résolution du signal.

Cet algorithme consiste à faire introduire le signal à analyser dans deux filtres passe-bas (L) et passe-haut (H). A ce niveau, deux vecteurs seront obtenus : cA_1 et cD_1 . Les éléments du vecteur cA_1 sont appelés *coefficients d'approximation*, ils correspondent aux plus basses fréquences du signal, tandis que les éléments du vecteur cD_1 sont appelés *coefficients de détail*, ils correspondent aux plus hautes fréquences d'entre elles. La procédure peut être répétée avec les éléments du vecteur cA_1 et successivement avec chaque nouveau vecteur cA_k obtenu. Le processus de décomposition peut être répété n fois, avec n le nombre maximal de niveaux.

Lors de la décomposition, le signal $s(t)$ et les vecteurs cA_k subissent un sous échantillonnage, c'est la raison pour laquelle les coefficients d'approximation cA_k et de détail cD_k passent à nouveaux à travers deux filtres de reconstruction (L) et (H). Deux vecteurs en résultent : A_k appelés approximations et D_k appelés détails, satisfaisant la relation :

$$A_{k-1} = A_k + D_k \quad (\text{IV. 7})$$

$$s = A_k + \sum_{i \leq k} D_i \quad (\text{IV. 8})$$

où i et k sont des entiers.

Désignant par F_{\max} la fréquence maximale du signal mesuré, la bande de fréquence de chaque niveau i revient à $\left[0 - \frac{F_{\max}}{2^i}\right]$ pour les approximations et $\left[\frac{F_{\max}}{2^i} - \frac{F_{\max}}{2^{i-1}}\right]$ pour les détails. La **Figure IV.6** représente un exemple de décomposition pour $n = 3$.

Le choix du nombre de niveaux de la décomposition en ondelettes était de prendre un nombre suffisamment grand pour ne pas perdre les informations utiles, d'un autre côté il ne fallait pas le prendre si grand de telle sorte qu'on passe aux très basses fréquences et calculer donc des niveaux inutiles.

Notre approche est de ne conserver que les niveaux qui comprennent l'information, il est par ce fait inutile d'aller dans des niveaux où la fréquence du défaut n'est même pas

incluse dans la bande fréquentielle de détail du niveau final, ce serait chercher une information dans un endroit où elle n'existe même pas.

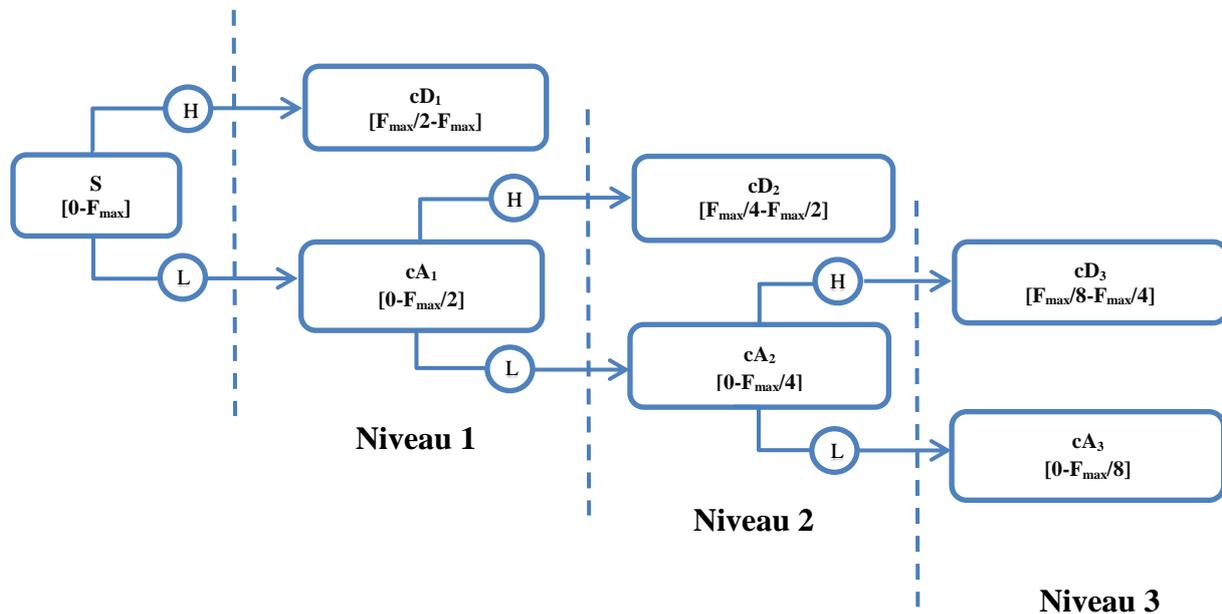


Figure IV.6 : Exemple de décomposition à trois niveaux.

IV.3.5.3 Application de la DWT sur des signaux réels

La méthode proposée, basée sur l'algorithme Mallat, a été appliquée sur le signal issu du roulement avec défaut du type 6028-2RS sur lequel un défaut a été simulé sur sa bague extérieure. Le roulement tourne à une vitesse de 50 Hz.

L'approche utilisée est de chercher les impacts, signe de la détérioration du roulement, parmi plusieurs autres composantes du signal. Le but est de détecter ces impacts en choisissant le détail, issu de la décomposition en ondelettes du signal, qui permet la meilleure détection temporelle ou fréquentielle par le spectre et ceci par le choix et l'optimisation de plusieurs paramètres influents : type d'ondelette, niveau optimal, nombre de niveaux.

La Figure IV.7 montre la décomposition de la bande fréquentielle du signal avec défaut à 8 niveaux avec une fréquence maximale calculée à partir du théorème de Shannon.

Le 7^{ème} niveau (D_7) est un niveau important qui a une largeur de bande de **[97.65-195.31] Hz** contenant la bande de modulation de défaut qui a été déjà obtenue par l'analyse spectrale classique (DSP) **[100-150] Hz**. L'avantage de l'analyse multi-résolution, c'est de déterminer cette bande sans recourir à l'étude de tout le spectre du signal avec défaut.

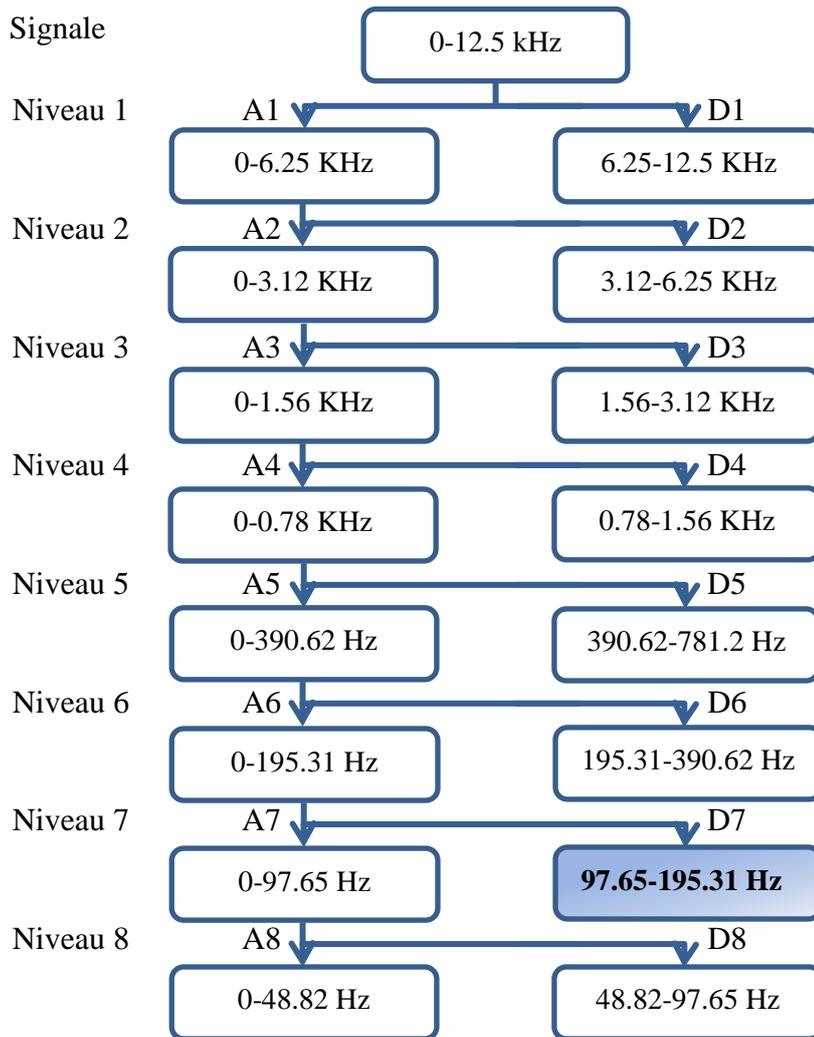


Figure IV.7 : Décomposition du signal avec $f_{max} = 12.5$ KHz.

Les détails calculés à partir de l'analyse multi-résolution de signal avec défaut sont représentés par la **Figure IV.8**.

Les spectres correspondants ont été calculés également. On constate que l'analyse en multi-résolution a séparé les basses fréquences des plus hautes fréquences permettant de localiser chaque fréquence dans un niveau adapté et avec une bonne résolution. Le détail 7 a permis la localisation de la bande spectrale du défaut **[97.65-195.31] Hz**.

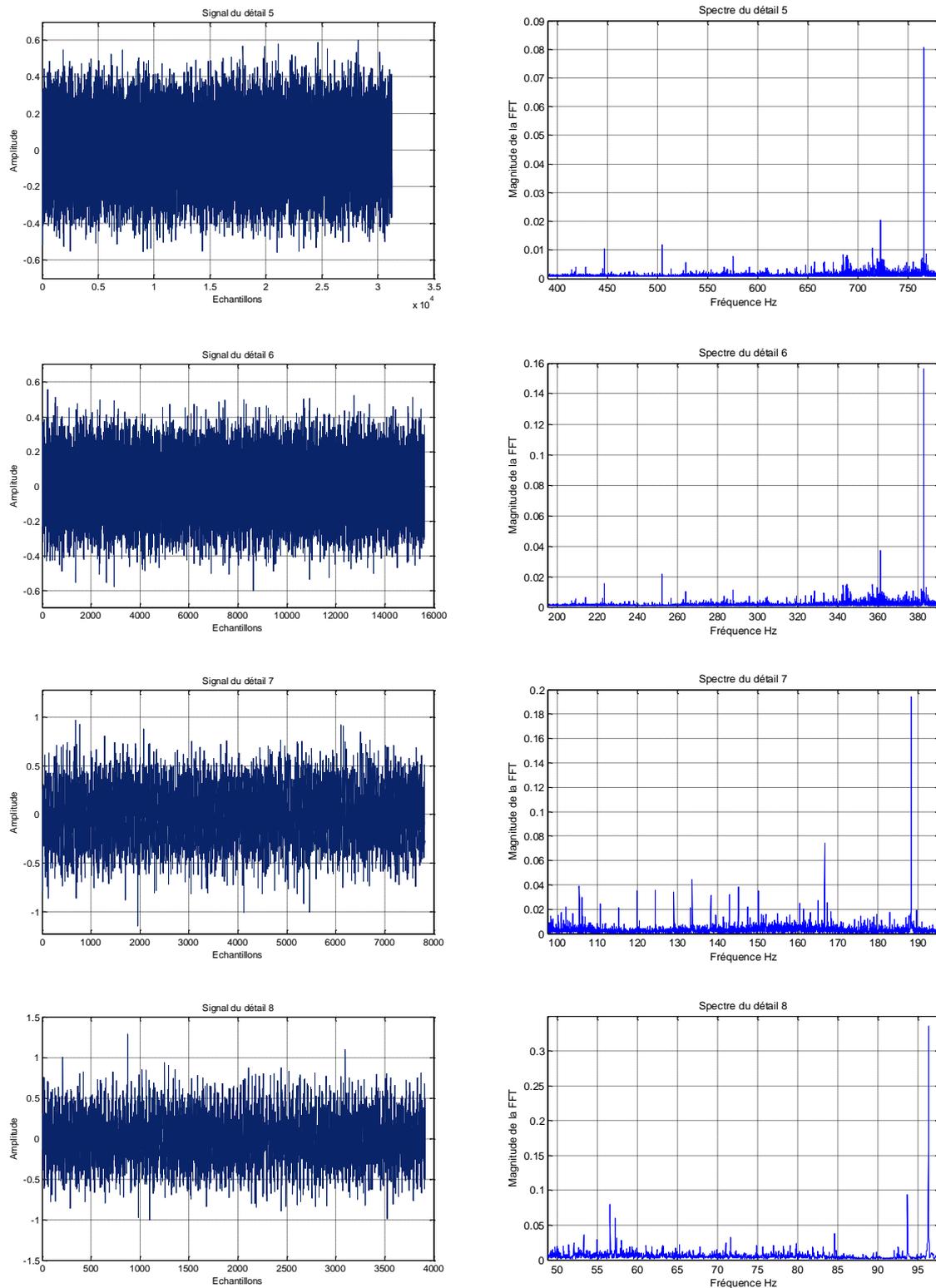


Figure IV.8 : Spectre des détails 5,6,7 et 8.

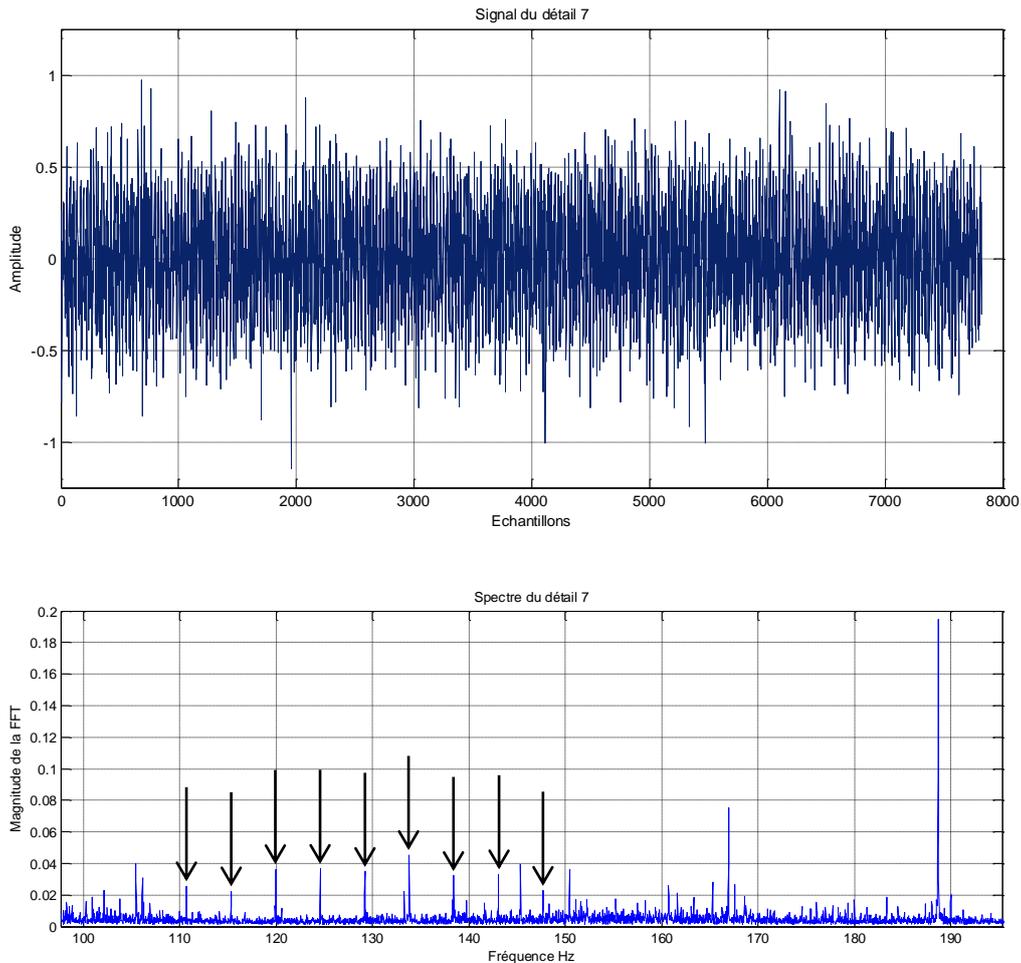


Figure IV.9 : *Signal reconstruit et son spectre des coefficients d'ondelettes du détail 7*

La **Figure IV.9** illustre des impacts qui sont dus au défaut de bague externe, le signal reconstruit apparaît donc plus informatif que celui mesuré. Le spectre des coefficients d'ondelettes a été calculé à partir de la transformée de Fourier (FFT), mettant en évidence la fréquence du défaut (4.53 Hz) ainsi que plusieurs de ses harmoniques, on constate aussi une porteuse autour de 120 Hz ($f_p = 120$ Hz). En réalité un petit écart, de 0,2 Hz, entre la fréquence théorique calculée (4.53 Hz) et celle réelle du spectre (4.73 Hz) est tout à fait normale. Ceci peut avoir pour causes plusieurs facteurs, la différence entre la vitesse programmée et celle réelle de rotation du roulement (fluctuation), un peu moins le sous échantillonnage lors de l'opération du filtrage en cascade.

IV.4 Conclusion

La transformée en ondelettes continue est un outil particulier : elle permet de résoudre le problème de « non stationnarité » et de « non périodicité » en représentant le signal dans le plan temps-échelle. Toutefois, il semble que celle-ci soit mal adaptée à l'analyse directe des signaux avec défaut car les fréquences caractéristiques des défauts n'apparaissent pas dans le plan temps-échelle.

La décomposition du signal vibratoire en plusieurs niveaux nous a permis l'extraction de la signature du défaut et plusieurs de ses harmoniques. La validation expérimentale, réalisée sur des roulements défectueux, valide à grande échelle cette approche. Les résultats ont montré la capacité de l'analyse multi-résolution dans la détection de ce type de défaut.

Conclusion Générale

Ce travail apporte une contribution au domaine des énergies renouvelables, particulièrement dans le secteur dit du « petit éolien ». L'objectif de cette étude était d'apporter des éléments de modélisation et de traitement du signal pour permettre de détecter et diagnostiquer les défauts mécaniques des éoliennes et plus particulièrement au niveau des roulements, notre travail s'est donc orienté vers l'axe signal.

Nous avons montré 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. La présence d'un défaut affecte le spectre en faisant apparaître des nouvelles raies spectrales. L'analyse spectrale classique (DSP) permet la détection des défauts mais son inconvénient est la recherche de la bande spectrale qui contient le défaut, ce qui présente une limitation d'une telle approche vu la richesse et la complexité du spectre ; pour cela nous avons introduit l'analyse par ondelette qui est relativement récente en diagnostic.

Cette technique est basée sur la décomposition en ondelettes des signaux vibratoires en plusieurs niveaux, qui nous a permis de constater la richesse du signal vibratoire d'une éolienne avec défaut par rapport au cas sain. Le spectre du signal détail nous a permis de détecter la fréquence de répétition des chocs qui est proche à celle obtenue théoriquement. L'avantage de l'analyse multi-résolution, est de déterminer la bande de répétition des chocs sans recourir à l'étude de tout le spectre du signal avec défaut. L'analyse multi-résolution, semblait la plus intéressante à appliquer.

Une technique plus intéressante apparaît en perspective, c'est l'utilisation des composantes spectrales des niveaux de décomposition en ondelettes des signaux. En effet, leur contenu harmonique possède des caractéristiques utilisable pour la classification des défauts et fournissent une alternative attrayante à l'analyse spectrale classique en vue d'une maintenance en temps réel.

Cette étude a permis, en outre, de jumeler la décomposition en ondelettes avec les méthodes classiques, analyse de Fourier (FFT), ce qui a permis d'avoir une méthodologie offrant une détection aussi claire.

Bibliographie

- [1] Mukund R. Patel, « *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation Systems* » Second Edition. Taylor & Francis Group. 2006.
- [2] M. SIDDO, S. NOUHOU, « *Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne* », mémoire de fin d'études, ENP, Alger, 2007.
- [3] R. DRARENI, Z. OUAHRANI, « *Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC* », mémoire d'ingénieur, ENSP, Algérie, 2009.
- [4] Bulletin des Energies Renouvelables, Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Semestriel N° 7 Juin 2005.
- [5] http://www.espace-eolien.fr/Eolien/Kesaco_tech.htm.
- [6] B. MULTON, "*Energies éoliennes*", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [7] A. ABDELLI, «*Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive* », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [8] N. LAVERDURE, « *l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires* », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [9] A. BOYETTE, « *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 2006.

- [10] F. MERRAHI, « *Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [11] schumi6.free.fr//TPE_Energie_renouvelables.htm
- [12] S. AMEZIANE, « *Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [13] M. BELAIDI, « *Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne* », mémoire de fin d'étude, ENP, Alger, 2006.
- [14] M. KLUGE, P. KNAACK, "wind power applications" IFM electronic, http://www.ifm.com/obj/ifm_wind_power_applications_FR.pdf, 2010.
- [15] N. CHERFIA, « *Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens* », Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [16] N.BESSOUS, « *Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones* », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [17] A N.ALLALOU, « *Diagnostic de Défauts par Observateurs Non Linéaires : Application aux Processus Chimique* », Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2006.
- [18] M Y. KAIKAA, « *Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer. Application au diagnostic* », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2010.
- [19] B. NAIT SLIMANI, « *Synthèse d'observateurs non linéaire : Application au diagnostic de défauts* », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.

- [20] I. BOUCHARBEB, « *Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrones à Réductance Variable* », Mémoire de Magister, Université Constantine, 2009.
- [21] M. CHAKIR, « *Commande Robuste Tolérante aux Défauts Application à la MSAP* », Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2006.
- [22] R. MERAD, « *Outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil* », Mémoire de Magister, Université Constantine, 2006.
- [23] D. DIALLO, M.E.H. BENBOUZID, « *Méthode de détection et de diagnostic de défaut dans les systèmes électriques* », SEEDS, Sud du Paris énergie électricité, 2007.
- [24] F. TAFININE, « *Nouveaux Outils de Traitement du Signal Appliqués en Diagnostic des Systèmes Electro-Energétiques* », SETIT IEEE, Sousse Tunisie, 2012.
- [25] B. TRAJIN, « *Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques* », JCGE'08 LYON, 2008.
- [26] Wenxian Yang, P. J. Tavner, Michael Wilkinson, « *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of a Wind Turbine with a Synchronous Generator using Wavelet Transforms* », IET International Conference, PEMD, 2008.
- [27] Baoping Tang, Wenyi Liu, Tao Song, « *Wind turbine fault diagnosis based on Morlet wavelet transformation and Wigner-Ville distribution* », Renewable Energy 35, pp. 262-266, 2010.
- [28] Yonghua Jiang, Baoping Tang, Yi Qin, Wenyi Liu, « *Feature extraction method of wind turbine based on adaptive Morlet wavelet and SVD* », Renewable Energy 36, pp. 246-253, 2011.

- [29] S. Sheng, H. Link, W. LaCava, J. van Dam, B. McNiff, P. Veers, J. Keller S. Butterfield and F. Oyague, « *Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing* », Technical Report, NREL/TP, 2011.
- [30] R. BOUSSEKSOU, « *Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic* », Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [31] Bin Lu Yaoyu Li, Xin Wu, Zhongzhou Yang, A, « *Review of Recent Advances in Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis* », IEEE, 978-1-4244-4936-1, 2009.
- [32] Ma yang, He Chengbing, Feng Xinxin, « *Institutions Function and Failure Statistic and Analysis of Wind Turbine* », Physics Procedia 24, pp. 25 – 30, 2012.
- [33] E. TISSERAND, J F. PAUTEX, P. SCHWEITZER, « *Analyse et traitement des signaux : Méthode et application au son et à l'image* », 2^e édition, DUNOD, 2008.
- [34] F. COTTET, « *Traitement du signal* », DUNOD, pp 254, 2000.
- [35] J. ANTONI, M SIDAHMED, « *Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires* », Spécial congrès Surveillance 5, 2009.
- [36] P. ESTOQ, « *Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes* », Thèse de Doctorat, Université de REIMS CHAMPAGNE ARDENNE, 2004
- [37] B. TRAJIN, « *Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones Application à la surveillance des roulements à billes* », Thèse de Doctorat, Université de TOULOUSE, 2009.
- [38] F. TRUCHETET, « *Ondelettes pour le signal numérique* », Editions Hermès, 1998.

- [39] O. RIOU, J F. DURASTANTI, G M. RAKOTO RAZAFINDRAZATO, « *Détection de défaut sur motoréducteur à engrenage en utilisant la transformée en ondelettes* », Science & Maintenance[®], Afim[®], 2012.
- [40] G M. RAKOTO RAZAFINDRAZATO, « *Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes* », Thèse de Doctorat, Université Paris Est Créteil, 2010.
- [41] J P. MASSAT, « *Modélisation du comportement dynamique du couple pantographe-caténaire. Application à la détection de défauts dans la caténaire* », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de LYON, 2007.
- [42] A. DJEBALA, « *Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques* », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [43] A. DJEBALA, N. OUELAA, N. HAMZAOU, S. GUENFOUD, « *Application de la Transformée en Ondelettes Discrète dans la Détection des Défauts de Roulements* », Congrès Algérien de Mécanique, Algérie, Guelma, 2011.

Résumé

Le diagnostic des systèmes électro-énergétiques (éolienne) 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. Alors que les défauts électriques sont peu fréquents, les défauts mécaniques sont par contre assez nombreux et peuvent provenir du système lui-même ou de la charge entraînée. L'une des raisons principales de ces défaillances reste les défauts de roulements à billes. Pour cela nous exposerons dans ce travail quelques méthodes de traitement du signal dans le diagnostic vibratoire actuellement très répandu en industrie. Comme toute méthode de diagnostic, les techniques proposées ont pour rôle de cerner l'apparition d'éventuelles caractéristiques des défauts. Le diagnostic se fera par comparaison entre les signaux enregistrés et le signal sain. L'analyse spectrale classique (DSP), l'analyse par ondelette ont été abordées. Les résultats obtenus sur des signaux réels délivrés par le Centre des Techniques des Industries Mécaniques (CETIM-France) prouvent l'efficacité de ces méthodes dans la détection des défauts.

Mots clefs

- Eoliennes
- Défauts mécaniques
- Diagnostic
- Défauts de roulements
- Traitement du signal
- Analyse spectrale
- Analyse en ondelettes
- Algorithme de S. Mallat