

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



جامعة اعمار ثليجي بالآغواط

Université Amar Thelidji-Laghouat

كلية التكنولوجيا

FACULTE DES TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT MÉCANIQUE

MÉMOIRE DE MASTER



PRÉSENTÉ PAR :

Hakmi Houari

Dakmoussi Boubakeur

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

THÈME

**Maintenance des systèmes tournants par analyse
vibratoire**

Soutenu publiquement pour obtenir le diplôme de master II devant le jury
composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. MAATI Ahmed	Pr	Président
Mr. BACHIR Bendjedia	MCA	Examineur
Mr. HADJADJ Abdechafik	Pr	Encadreur

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

Tout d'abords nous remercions Dieu le tout puissant. De nous avoir accordé des connaissances de la science, qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements et à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail et en particulier notre Encadrant Hadjadj Abdechafik professeur à l'université de Laghouat pour son dévouement et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire et les conseils qui nous ont été très précieux.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude aux membres du comité d'évaluation, dirigé par le professeur Maati Ahmed du département de génie mécanique, et le professeur Bachir Bendjedia Bashir du département d'électrotechnique. Qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Notre reconnaissance s'adresse à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce modeste travail puisse voir le jour.

Dédicaces

Je tiens à dédier Ce mémoire de fin d'étude :

A mon maître de passion, de patience et de persévérance . . .

Mon père, A ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction . . . Ma mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis ;

Résumé

Le diagnostic des systèmes a pour objectif la maintenance prédictive afin d'intervenir précocement et en temps réel pour éviter les dégâts majeurs qui cause le dysfonctionnement des systèmes et des fois leurs arrêt total. Dans le système éolien si les pannes électriques sont rares, les pannes mécaniques sont assez courantes et peuvent être très fréquentes.

L'une des principales causes de ces défaillances mécaniques est le défaut de roulement. Ce dernier se compose de plusieurs organes qui peuvent être défectueux séparément l'un de l'autre. L'objectif de notre travail est de faire le diagnostic des défauts causés par les différents organes du roulement de l'axe rotorique de la génératrice dans un système éolien. La méthode de diagnostic que nous avons adoptée dans ce travail est basée sur l'analyse fréquentielle par FFT de la tension produite afin de déterminer les différentes signatures des défauts causés par les organes du roulement de l'axe du rotor.

Cette méthode représente une alternative aux méthodes basées sur la présence des capteurs de vibration.

Mots clefs

- Eoliennes
- Diagnostic
- Maintenance
- machines tournantes
- Défauts de roulements
- Défauts mécaniques
- Analyse de signal
- Transformée de Fourier

الملخص

الهدف من تشخيصات الأنظمة هو الصيانة التنبؤية، بحيث يمكن إجراء التدخل المبكر في الوقت الحقيقي لتجنب الأضرار الكبيرة التي قد تتسبب في تعطل الأنظمة أو حتى توقفها التام. في أنظمة طاقة الرياح، بالرغم أن الأعطال الكهربائية نادرة، إلا أن الأعطال الميكانيكية شائعة ويمكن أن تكون متكررة للغاية.

أحد الأسباب الرئيسية للأعطال الميكانيكية هو فشل المدحرجات. والهدف من عملنا هو تشخيص الأعطال التي تسببها المكونات المختلفة للمدحرج على عمود الدوار للمولد في نظام توربينات الرياح.

طريقة التشخيص المعتمدة في هذا العمل على تحليل التردد بواسطة FFT للجهد الناتج من أجل تحديد التوقع المختلفة للأعطال التي تسببها مكونات المدحرج في عمود الدوران. تمثل هذه الطريقة بديلاً للطريقة التي تعتمد على استعمال مجسات الاهتزاز.

الكلمات المفتاحية

- توربينات الرياح
- الصيانة
- عطل المحمل
- تحليل الإشارة
- التشخيص
- الألات الدوارة
- الأعطال الميكانيكية
- تحويل فورييه

Abstract

The objective of system diagnosis is predictive maintenance in order to intervene early and in real time to avoid major damage which causes the malfunction of the systems and sometimes their total shutdown. In the wind system, although electrical failures are rare, mechanical failures are quite common and can be very frequent.

One of the main causes of these mechanical failures is bearing failure. The latter consists of several organs which can be defective separately from each other. The objective of our work is to diagnose the faults caused by the different bearing parts of the rotor axis of the generator in a wind power system. The diagnostic method that we adopted in this work is based on the frequency analysis by FFT of the voltage produced in order to determine the different signatures of the defects caused by the bearing components of the rotor axis. This method represents an alternative to the method based on the presence of vibration sensors

Keywords:

Wind Turbines, Diagnosis, Maintenance, rotating machines, Bearing defects, Mechanical defects, Signal Analysis, Fourier Transform

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des Figures	viii
Liste des Tableau	x
Nomenclature	xi
Bibliographie	viii

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MAINTENANCE DES SYSTEMES EOLIENNES	
I-1 Introduction	4
1-1 Différents types de maintenance	4
1-1-1 La maintenance corrective	5
1-1-2 La maintenance préventive	5
1-1-3 La maintenance systématique	5
1-1-4 La maintenance conditionnelle	5
1-1-5 La maintenance prévisionnelle	6
1-1-6 La sécurité	6
1-2 Choix d'une politique de maintenance	7
I-2 Techniques d'analyse	7
2-3 Vibrations des machines tournantes	9
I-4 Analyse vibratoire	9
4-1 Objectifs	9
4-2 Surveillance	9
4-3 Diagnostique	10

TABLE DES MATIÈRES

I-5	La surveillance des machines	10
5-1	La mesure des vibrations :	10
5-2	Les mesures de vibration absolues	10
5-3	But de mesure	10
I-6	Historique	11
I-7	Energie éolienne	12
7-4	Définition de l'énergie éolienne	12
7-5	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	12
I-8	Etude du système éolien	13
8-1	Les différents types d'un système éolien	13
8-1-1	Eolienne à axe vertical	13
8-1-2	Eolienne à axe horizontal	15
8-2	Les principaux composants d'un système éolien	15
8-2-1	Structure générale d'une éolienne	15
8-2-2	Structure d'une nacelle [20]	16
I-9	Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	19
9-1	Générateur synchrone	19
9-2	Générateur asynchrone	19
I-10	Les principaux défauts mécaniques des éoliennes	20
10-1	Défauts de roulements Les roulements	20
I-11	Conclusion	21
CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE		
II-1	Introduction	24
II-2	Principe de conversion de l'énergie éolienne	24
2-1	La puissance du vent	24
2-2	La limite de BETZ	28
2-3	Zones de fonctionnement d'une éolienne	30
II-3	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	31

TABLE DES MATIÈRES

II-4	Modélisation de la turbine	32
4-1	Model de multiplicateur	32
4-2	Equation dynamique de l'arbre de transmission	32
II-5	Simulation du système éolienne	32
II-6	Partie mécanique	34
6-1	Résultats mécaniques	35
II-7	Partie électrique	37
1-7	Résulta électrique	38
II-8	Conclusion	39
CHAPITRE III : DIAGNOSTIQUE LES DÉFAUT MÉCANIQUE PAR L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE		
III-1	Introduction	41
III-2	Simulation d'un système éolien avec défaillance des roulements	41
III-3	Influence du défaut de roulement sur la tension	42
III-4	Diagnostic par l'analyse spectrale des signaux	43
4-1	Un signal spectral	44
4-1-1	Analyse spectrale	44
4-1-2	Spectre fréquentiel	44
4-2	Description de la méthode de diagnostic	44
III-5	Calcul des différents des défauts de roulement	45
5-3	Cas de génératrice a 1 paire de pole	46
5-3-3	Cas de roulements sains	47
5-3-4	Cas défaut de cage	47
5-3-5	Cas défaut de Bague externe.	49
5-3-6	Cas défaut de Bague interne.	50
5-3-7	Cas défaut de défaut de bille sur la bague interne ou externe.	51
8-3-5	Cas de défaillance de l'ensemble des composants du roulement	52
5-4	Cas de génératrice a 2 paires de pole	53
5-4-9	Cas défaut dans Cage et défaut de bille sur la bague interne FTF-BSF	53

TABLE DES MATIÈRES

5-4-10	Cas défaut la bague internet externe BPFI-BPFO	55
III-6	Conclusion	56
	Conclusion Générale	58

Liste des Figures

Figure I-1 : Méthodes de maintenance et les évènements associés.	6
Figure I-2 : Différentes méthodes d'analyse	8
Figure I-3: Évolution des dimensions des éoliennes	11
Figure I-4 : Principe de la conversion d'énergie	13
Figure I-5 : Eolienne de Savonius.	14
Figure I-6 : Eolienne de Darrieus.	14
Figure I-7 : Eolienne à axe horizontal	15
Figure I-8 : Structure générale d'une éolienne	16
Figure I-9 : Structure d'une nacelle.	18
Figure I-10 : Pannes provoqués par des sous-systèmes de l'éolienne	20
Figure I-11: Dimension du roulement à bille	21
Figure II-1 : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique	26
Figure II-2 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	27
Figure II-3 : Variation de la vitesse du vent	28
Figure II-4 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse	29
Figure II-5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne	30
Figure II-6 : Les composants principaux d'un système de turbine éolienne de l'intérieur.	33
Figure II-7 : Schéma bloc du modèle de la turbine.	33
Figure II-8 : Simulations de travail du système éolien.	34
Figure II-9 : Simulation turbine éolienne	34
Figure II-10 : Courbe de variation d'énergie en fonction du temps.	35
Figure II-11 : La vitesse de rotation de la turbine	36
Figure II-12 : La vitesse de rotation de l'arbre de la turbine	36
Figure III-13 : Le coefficient de puissance	36
Figure II-14 : Le couple de rotation mécanique	36
Figure II-15 : Simulation et modélisation Générateurs synchrones	37
Figure II-16 : Courbe des variations de tension en fonction du temps	38
Figure II-16 : Courbe de variation du courant électrique en fonction du temps	38
Figure II-18 : Courbe couple électromagnétique	38

LISTE DES FIGURES

Figure II-19 : Courbe Vitesse rotation Arber générateur	38
Figure III-1 : Synoptique de simulation du défaut de roulement	41
Figure III-2 : Modélisation et simulation le couple frottement	42
Figure III-3 : Courbe de variation du couple mécanique (C_{m1}) en fonction du temps	42
Figure III-4 : Courbe de variation du couple mécanique (C_{m2}) en fonction du temps	42
Figure III-5 : Couple électromagnétique $C_{ém}$	43
Figure III-6 : Vitesse rotation Arber générateur Ω_g	43
Figure III-7 : La tension électrique V_{ab}	43
Figure III-8 : La tension électrique V_{ab}	44
Figure III-9 : Valeurs maximales de la tension électrique V_a	45
Figure III-10 : Structure d'un roulement à bille	45
Figure III-11 : la tension électrique maximal	47
Figure III-12 : Spectre dans le cas de roulements sains	47
Figure III-13 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 0.3]	48
Figure III-14 : Spectre défaut de cage	48
Figure III-15 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 0.7]	49
Figure III-16 : Spectre défaut bague externe	49
Figure III-17 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 0.215]	50
Figure III-18 : Spectre défaut bague intérieure	50
Figure III-19 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1]	51
Figure III-20 : Spectre défaut de bille sur la bague interne ou externe	51
Figure III-21 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1.205]	52
Figure III-22 : Spectre défaut BFS-FTF-BPFI-BPFO	52
Figure III-23 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1.113]	54
Figure III-24 : Spectre défaut BFS-FTF	54
Figure III-25 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1.565]	55
Figure III-26 : Spectre défaut BPFI-BPFO	55

Liste des Tableaux

Tableau II-1 : Caractéristiques turbine éolienne	35
Tableau II-2 : Caractéristiques générateur synchrone	37
Tableau III-1 : paramètres Le roulement est de type SKF 6303-2Z	46
Tableau III-2 : Fréquence de défaut du roulement	46
Tableau III-3 : Fréquence de défaut du roulement	53
Tableau III-4 : Résultats numériques et Théorie des fréquences des roulements	56

Nomenclature

MS : machine synchrone	-
MAS : machine asynchrone	-
f_b : fréquence caractéristique des billes	HZ
$f_{b.int}$: fréquence caractéristique de la bague interne	HZ
$f_{b.ext}$: fréquence caractéristique de la bague externe	HZ
f_{cage} : fréquence caractéristique de la cage	HZ
f_r : fréquence de rotation du rotor	HZ
DC : Distance entre les centres des billes diamétralement opposées	cm
DB : Diamètre d'un élément roulant	cm
Nb : Nombre d'éléments roulants	-
α : Angle de contact des billes avec les bagues du roulement	°
FFT : Fast fourrier transforme	-
ρ : Densité volumique de l'air	$kg.m^3$
S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne	m^2
m : t la masse de l'air	kg
V_{ol} : le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne	m^3
C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne	-
R : rayon de la turbine	m
E : l'épaisseur des pales	m
t : Le temps en seconde	s
λ : rapport de vitesse de la turbine	-
β : Angle de calage des pales d'une éolienne	°
P_m : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice	w
v : vitesse du vent	m/s
Ω_T : Vitesse de rotation de la turbine	rd/s
Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'Arber	rd/s
Ω_g : Vitesse de rotation de la génératrice	tour/min
V_{ab} : La tension électrique	volt
$C_{aér}$: Couple aéroturbine éolien	N.m

NOMENCLATURE

J_T : inertie de la turbine	kg. m^2
J_G : inertie de la génératrice	kg. m^2
J_T : inertie total sur l'arbre	kg. m^2
f_T : coefficient des frottements	N.m/s
C_f : couple des frottements	N.m
C_{mec} : couple de la génératrice	N.m
C_{em} : couple électromagnétique	N.m
E_c : l'énergie cinétique	J

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle crucial dans le développement et l'avancement des sociétés humaines, que ce soit en améliorant les conditions de vie ou en favorisant le développement industriel. Son importance découle de sa polyvalence et de son implication croissante dans divers domaines d'activité. Les modes et les moyens de sa production sont en train de connaître des transformations profondes, notamment en raison du potentiel considérable des énergies renouvelables. Ces dernières peuvent répondre à la demande mondiale croissante en énergie tout en favorisant la diversification des sources d'approvisionnement et en réduisant les émissions polluantes. La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est en plein essor et devrait le rester dans le futur. Cependant, en raison de leur emplacement souvent inaccessible, que ce soit en mer ou sur des tours de plus de 20 mètres de hauteur, il est impératif de réduire constamment les coûts d'exploitation et de maintenance des éoliennes. [1]

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 une méthode d'analyse du signal que nous avons classés comme méthodes classiques (analyse de Fourier). Cette méthode est utilisée pour la détection et le diagnostic des défauts mécaniques d'une éolienne, défauts principalement liés aux roulements à billes. [2]

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble de la maintenance des éoliennes.

La nécessité de rechercher la forme optimale de maintenance capable d'améliorer la productivité y est soulignée. Les techniques de surveillance et de contrôle de l'état de fonctionnement des machines y sont également examinées.

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 présentons une étude et une simulation de la turbine éolienne ainsi que leur mise en équations (coefficient de puissance C_p , angle de calage β , modèle de l'arbre et du multiplicateur). Nous mettons en lumière les notions essentielles utilisées en diagnostique et les principaux défauts mécaniques rencontrés sur les éoliennes

De plus, nous simulons le fonctionnement du système de la turbine à l'aide de Simulink MATLAB et analysons les résultats de cette simulation.

Le dernier chapitre décrit les résultats obtenus en simulant le fonctionnement du système éolien avec le générateur et en diagnostiquant les roulements sur la base de l'analyse du signal de tension pour la détection des défauts provoquer par les différents organes du roulement.

Enfin, ce travail se conclut par une conclusion générale et quelques perspectives d'avenir.

Chapitre I

Généralités sur la maintenance des systèmes éoliennes

I-1 Introduction

La maintenance des équipements consiste à gérer la disponibilité des équipements dans le processus de production au coût le plus bas possible. Dans de nombreux cas, il s'agit d'un facteur clé dans l'amélioration de la productivité et de la compétitivité d'une entreprise. Elle a évolué pour devenir une discipline indépendante, avec son propre langage, ses règles, ses outils, ses méthodes, ses procédures contractuelles et ses normes standardisées. Elle peut être réalisée par un service interne de l'entreprise ou par un service externe spécialisé. Stratégie de maintenance [3]

Depuis l'avènement du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens a connu une progression constante. Les premiers prototypes d'éoliennes à pales profilées ont fait leur apparition dans les années quarante, marquant un succès notable dans la génération d'électricité. Les avancées se sont multipliées, offrant diverses technologies pour capter l'énergie éolienne, qu'il s'agisse de capteurs à axe vertical ou horizontal, avec des structures de plus en plus performantes.

Au-delà des caractéristiques mécaniques des éoliennes, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique joue un rôle crucial. De nombreuses méthodes ont été développées, notamment l'utilisation de machines synchrones et asynchrones. La gestion de ces machines et leur intégration au réseau visent à maximiser la capture d'énergie sur une large plage de vitesses de vent, dans le but d'optimiser la rentabilité des parcs éoliens.

Dans ce chapitre, présente une vue d'ensemble de la maintenance des éoliennes et nous retracerons l'évolution historique des éoliennes et présenterons les principes fondamentaux des différents types d'éoliennes. Cependant, l'accent sera mis sur les éoliennes à axe horizontal, les plus répandues et les plus efficaces. Nous examinerons en détail le processus de conversion de l'énergie éolienne en électricité, ainsi que les systèmes de génération d'électricité actuellement en usage.

1-1 Différents types de maintenance

La norme NF X60-010 définit la maintenance comme « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité. [4]

1-1-1 La maintenance corrective

Selon la norme AFNOR X60-010, la maintenance corrective est définie comme "une maintenance effectuée après défaillance". Dans ce cadre, les machines sont utilisées sans investissement spécifique pour l'entretien ou la surveillance, jusqu'à ce qu'un incident se produise. Chaque défaillance de la machine impacte l'exploitation, rendant la planification de la production difficile en raison de la nature imprévisible des arrêts. Il est donc impératif de procéder à la réparation dès que possible.

1-1-2 La maintenance préventive

La maintenance préventive est réalisée selon des critères prédéfinis afin de réduire la probabilité de défaillance d'un équipement ou la dégradation d'un service (norme AFNOR X 60010). Les interventions sont planifiées, préparées et programmées avant que la défaillance probable ne survienne. La première phase de cette maintenance comprend des visites périodiques pour surveiller l'état du matériel, identifier les lois de dégradation et définir les seuils d'acceptabilité. Une fois le comportement du matériel bien compris, on passe à la deuxième phase, qui consiste en une maintenance systématique. [5]

1-1-3 La maintenance systématique

En s'appuyant sur une gestion rigoureuse, et sur une connaissance statistique de la vie des composants de chaque machine, on programme l'arrêt du matériel pour une révision systématique avant usure ou panne. La maintenance préventive systématique, c'est l'ensemble des visites systématiques effectuées préventivement, préparées et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Attendre que la machine tombe en panne pour la réparer semble être à priori. La solution la plus mauvaise, c'est pourquoi certains utilisateurs choisissent la maintenance systématique périodique. Dans la maintenance préventive systématique les éléments sont remplacés alors qu'ils seraient encore utilisables ou des composants endommagés sont remis en état trop tardivement.

1-1-4 La maintenance conditionnelle

Selon la norme AFNOR X60-010, la maintenance conditionnelle se définit comme "une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostique, information d'un capteur, mesure d'une usure) révélateur de l'état de dégradation du bien".

La maintenance conditionnelle, également appelée maintenance "selon l'état" ou maintenance prédictive (terme réservé aux machines tournantes), permet un suivi continu du matériel en service afin de prévenir les défaillances potentielles.

Cette forme de maintenance est basée sur l'état de la machine, par exemple :

- Remplacement des composants uniquement lorsque les tolérances sont atteintes.
- Arrêt de la machine uniquement si son état le nécessite.
- Équilibrage du rotor si les tolérances sont atteintes.

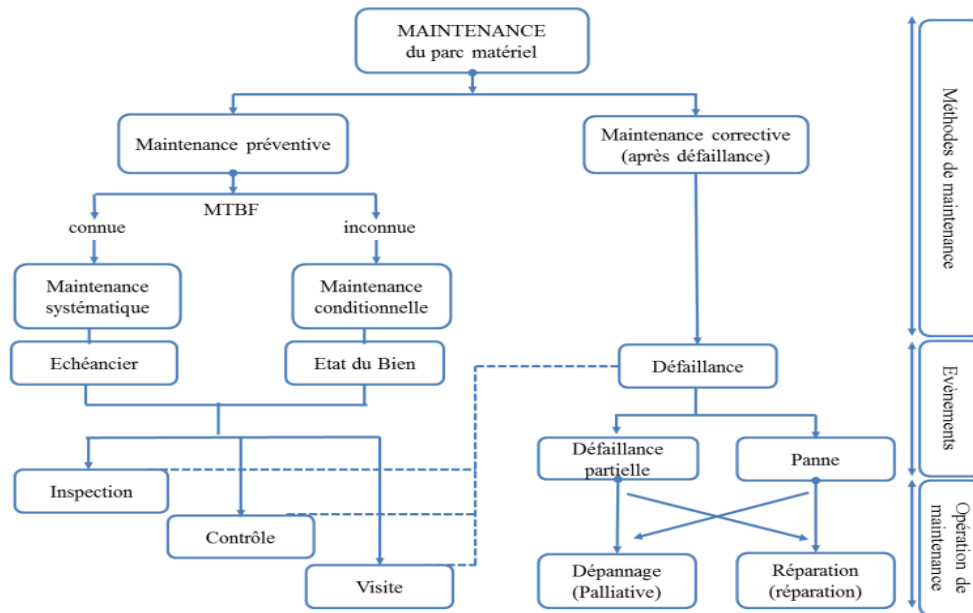


Figure I-1 : Méthodes de maintenance et les évènements associés.

1-1-5 La maintenance prévisionnelle

Il s'agit d'un type de maintenance conditionnelle permettant de réajuster les prévisions d'opérations de maintenance en estimant l'évolution potentielle d'un dysfonctionnement détecté sur un appareil, ainsi que la durée pendant laquelle l'appareil peut encore être utilisé avant une panne. Ces estimations sont basées sur des analyses périodiques de l'état de chaque équipement, obtenues grâce aux méthodes de maintenance conditionnelle et à l'utilisation de modèles d'usure.

1-1-6 La sécurité

La sécurité reste un terme très général, il n'existe pas actuellement de consensus pour normalisation. Les définitions probables associée reste donc dépendantes des approches. Une définition est donnée par la référence [AFNO 88] : « aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques ». L'évaluation de la sécurité est actuellement n'est pas limitée et effectuée pour les installations mécanique, chimique..., elle est basée sur les études statistiques d'impacts des accidents (réels, expérimentés ou simulés) sur l'homme et l'environnement (notion de gravité) [5].

1-2 Choix d'une politique de maintenance

Les critères à considérer pour choisir une politique de maintenance sont principalement économiques et humains. L'objectif est de trouver une politique capable de réduire les coûts de maintenance. Pour cela, une méthode de suivi de l'état de fonctionnement d'un organe de machine doit être établie, afin d'améliorer la disponibilité et d'estimer plus précisément le risque de panne.

L'idéal serait de trouver des indicateurs externes facilement accessibles et de mettre en place un système de mesures qui limite le nombre de paramètres et de mesures à réaliser. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer les pannes les plus fréquentes par une analyse statistique et d'identifier les composants les plus problématiques par une analyse technologique. [6]

Les turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs, etc., sont toutes des machines dites tournantes, car elles comprennent des organes en rotation. Ces machines sont caractérisées par des composants fragiles (roulements, engrenages, etc.) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de défaillance sont donc multiples, telles que :

- Écaillage d'un roulement
- Rupture d'une dent d'un engrenage
- Désalignement d'un des axes, etc.

Pour certaines machines vitales dans un processus de production, ces défauts peuvent avoir de lourdes conséquences. Afin d'éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques associées, il est crucial de surveiller en permanence ces équipements et de détecter tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Pour ce faire, il existe une variété de techniques.

I-2 Techniques d'analyse

La surveillance d'un équipement de machine se fait en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance. Diverses techniques d'analyse peuvent être utilisées, telles que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et lubrifiants, et la variation de résistance dans un circuit électrique, entre autres (voir Figure I-2). Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur vibratoire est particulièrement efficace pour détecter la plupart des défauts. Une courbe d'évolution de l'indicateur est alors établie au fil du temps, avec des seuils correspondant aux niveaux d'alerte, d'alarme et de défaillance. Ces seuils sont déterminés soit par l'expérience, soit en appliquant

des normes spécifiques (par exemple, pour les roulements, des abaques de sévérité vibratoire sont utilisés pour définir les différents seuils).

L'analyse vibratoire : est la plus connue et la plus largement utilisée [7] car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

L'analyse d'huile : est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement.

La thermographie infrarouge : suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

L'analyse acoustique : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

Le contrôle par ultrasons : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

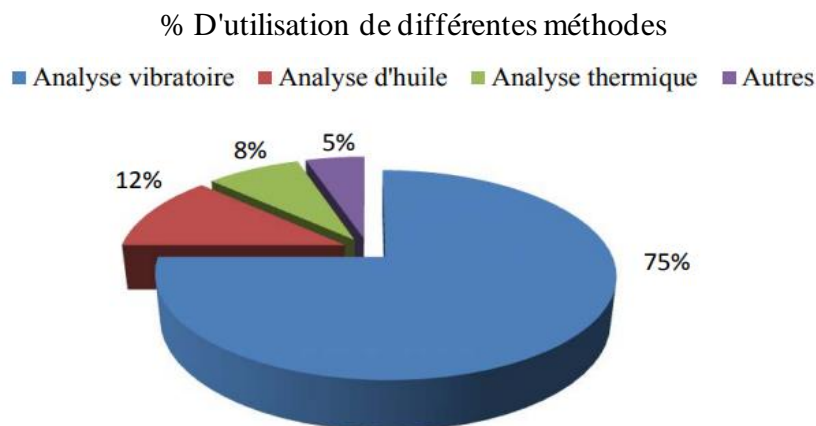


Figure I-2 : Différentes méthodes d'analyse

2-3 Vibrations des machines tournantes

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, avec le vieillissement de la machine, les fondations se modifient, les pièces se déforment et s'usent, et des changements mineurs dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, et les jeux augmentent. Tous ces facteurs entraînent une augmentation de l'énergie vibratoire, excitant les résonances et ajoutant une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures fournissent des informations précieuses sur l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques de la machine analysée. Grâce à l'analyse de ces vibrations, il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil de vibration limite est atteint, il devient possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement actuelles, en se basant sur les lois d'endommagement connues. [8]

I-4 Analyse vibratoire

4-1 Objectifs

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts
- L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

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

4-2 Surveillance

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation

dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire. [9]

4-3 Diagnostique

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire d'utiliser des outils mathématiques sophistiqués. Ces outils doivent assister l'opérateur et lui permettre d'identifier l'origine des défauts. Cependant, les signaux vibratoires seuls ne suffisent pas pour établir un diagnostic complet. Il est donc indispensable de connaître non seulement la cinématique de la machine, mais aussi les caractéristiques de ses composants et leurs différents modes de dégradation. La compréhension de ces modes de défaillance et de leur impact sur le niveau de vibration est essentielle pour réaliser un diagnostic précis et une surveillance fiable. [9]

I-5 La surveillance des machines

5-1 La mesure des vibrations :

Les vibrations d'une machine tournante reflètent les forces internes qui agissent en son sein. Ces forces, représentatives du comportement mécanique de la machine, se transmettent du rotor à la structure à travers les paliers.

5-2 Les mesures de vibration absolues

Le type de capteur utilisé pour la mesure des vibrations dépend directement du type de palier rencontré. Les accéléromètres permettent la mesure des vibrations absolues et sont utilisés pour l'instrumentation des paliers à roulement. Les sondes de déplacement, quant à elles, permettent la mesure des déplacements relatifs de l'arbre dans le palier et sont utilisées pour l'instrumentation des paliers fluides. En particulier, les sondes de déplacement sont adaptées aux paliers lisses, où elles permettent de mesurer les déplacements des arbres. Lorsqu'elles sont utilisées par paire dans une direction radiale, elles permettent notamment la visualisation de l'arbre.

5-3 But de mesure

Le but essentiel de la mesure est d'obtenir le spectre des fréquences (FFT). Cela permet de déterminer les fréquences auxquelles correspondent les plus grandes amplitudes. En connaissant ces différentes fréquences, il devient possible d'identifier les sources générant les vibrations. [10]

I-6 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 moudre le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas. [11]

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 [12].

Actuellement, des milliers d'éoliennes fonctionnent dans diverses régions du monde, avec une capacité totale allant de 93800 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 [13]

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 [14].

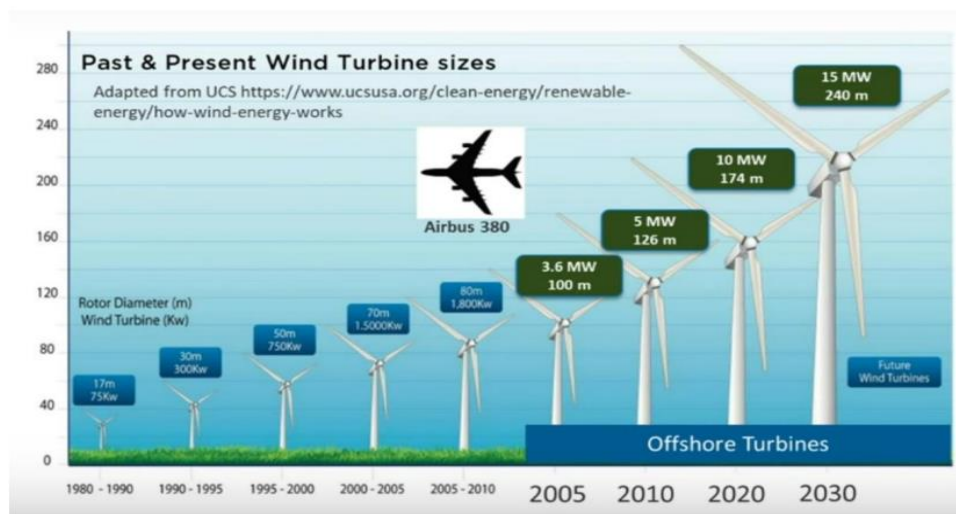


Figure I-3: Évolution des dimensions des éoliennes

I-7 Energie éolienne

7-4 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne, dérivée du mouvement des masses d'air, est une source d'énergie renouvelable non altérée, nommée d'après Éole, le dieu du vent de la Grèce antique. [15]

Elle se distingue par son caractère non polluant, ne produisant ni émissions atmosphériques ni déchets radioactifs. De plus, elle présente une corrélation saisonnière, étant souvent plus abondante en hiver, période de forte demande énergétique. Cependant, sa nature aléatoire dans le temps et sa capture restent des défis à relever. [16]

La ressource éolienne tire son origine du mouvement des masses d'air, lui-même résultant du réchauffement et du refroidissement inégaux de différentes régions de la Terre par le soleil. Cette disparité crée des variations de pression, entraînant le déplacement continu des masses d'air. L'énergie éolienne représente ainsi l'énergie cinétique du vent, convertie en énergie mécanique puis en énergie électrique grâce à des aérogénérateurs.

Le vent est caractérisé par sa direction et sa vitesse, qui varient en fonction des régions géographiques et des saisons. Pour évaluer la viabilité d'un parc éolien, il est essentiel de comprendre la vitesse moyenne du vent ainsi que sa variation en fonction de l'altitude.

Les installations peuvent être situées à terre, mais de plus en plus, elles sont implantées en mer, dans ce qu'on appelle les fermes éoliennes offshore. Cette option présente un avantage significatif en termes de productivité, car les vents en mer sont souvent plus forts, plus constants et plus énergétiques. [17]

7-5 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Les éoliennes sont des dispositifs permettant de transformer l'énergie du vent en énergie électrique. Ce processus de conversion s'effectue en deux étapes distinctes :

- Au niveau de la turbine, également appelée rotor, une partie de l'énergie cinétique du vent est capturée pour être convertie en énergie mécanique. C'est là que se produit l'extraction initiale de l'énergie du vent.
- Au niveau de la génératrice, l'énergie mécanique obtenue est ensuite convertie en énergie électrique. Cette dernière est alors transmise au réseau électrique pour être utilisée.
- Le schéma général de fonctionnement est représenté par la Figure I-4. Tout le processus de conversion implique une diversité de domaines, incluant l'aérodynamique, la mécanique, l'électrique et l'automatique, ce qui soulève divers défis technologiques à relever. [18]

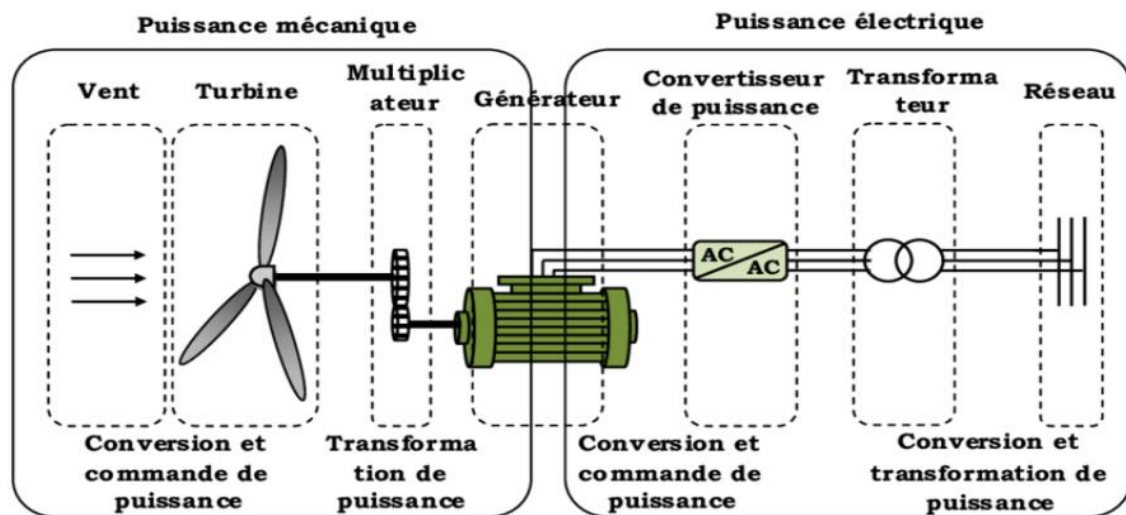


Figure I-4 : Principe de la conversion d'énergie

I-8 Etude du système éolien

8-1 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 où horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [13] :

8-1-1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures conçues pour la production d'électricité. Leur principal avantage réside dans le fait que les organes de commande et le générateur sont situés au niveau du sol, ce qui les rend facilement accessibles. [19] Depuis les années vingt, de nombreuses variantes de ces éoliennes ont été testées, mais la plupart n'ont pas rencontré le succès escompté. Cependant, deux structures ont réussi à atteindre le stade de l'industrialisation :

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 [12].

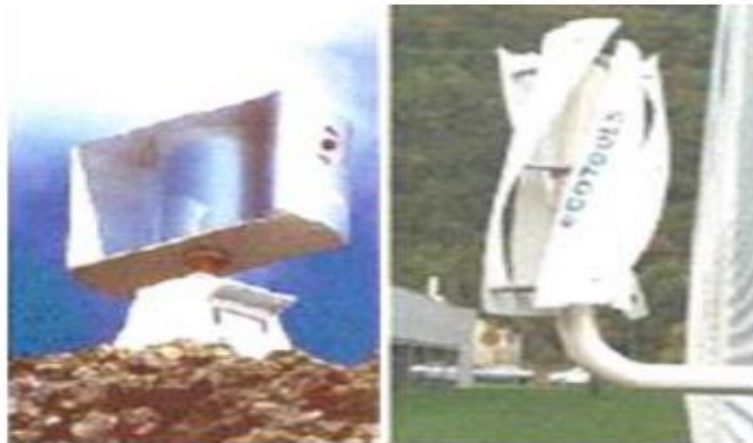


Figure I-5 : Eolienne de Savonius.

4-1-1-2 Le rotor de Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus sont parmi les plus répandues, ayant été développées par l'ingénieur français Darrieus qui a déposé le brevet au début des années 1930. Leur principe de fonctionnement repose sur le fait qu'un profil placé dans un flux d'air à différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. Ces forces combinées génèrent un couple moteur qui entraîne la rotation du dispositif. Cependant, cette rotation ne peut pas démarrer spontanément, car elle dépend de la vitesse propre du profil et de celle du vent. Par conséquent, lorsque l'éolienne est à l'arrêt, elle doit être lancée à l'aide d'un dispositif auxiliaire, tel que le montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou l'utilisation de la génératrice en tant que moteur. [12]

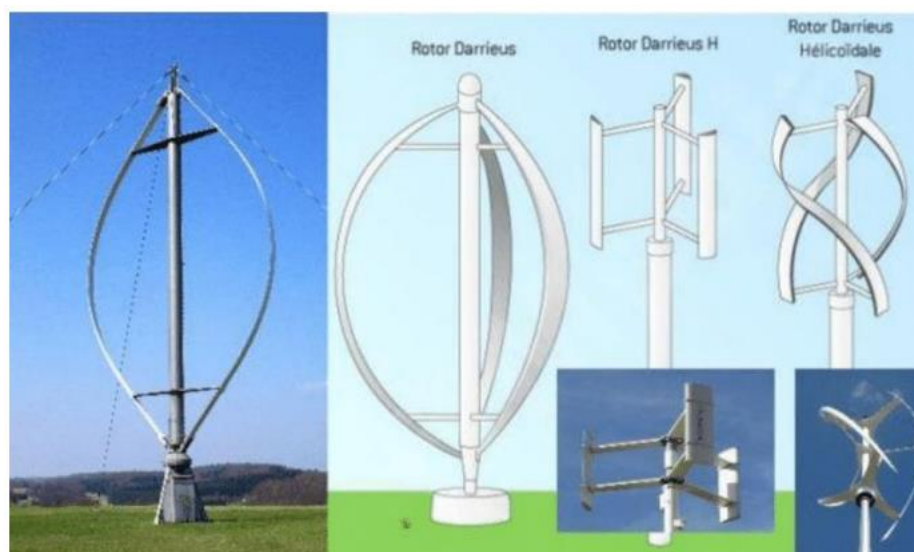


Figure I-6 : Eolienne de Darrieus.

8-1-2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal s'inspirent de la technologie ancienne des moulins à vent. Elles se composent de plusieurs pales profilées aérodynamiquement, similaires aux ailes d'avion. Contrairement à l'utilisation de la portance pour maintenir un avion en vol, dans ce cas, la portance est exploitée pour produire un couple moteur qui entraîne la rotation de l'éolienne. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie généralement entre 1 et 3, comme illustré dans la Figure I-7. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur les éoliennes à axe vertical en raison de leur coût moins élevé, de leur moindre exposition aux contraintes mécaniques, et de l'efficacité favorisée par la position du rotor, situé à plusieurs dizaines de mètres du sol. [19]



Figure I-7 : Eolienne à axe horizontal

Nous pouvons distinguer deux classes pour les systèmes éoliens à axe horizontal [13] :

4-1-1-1 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.

4-1-1-2 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.

8-2 Les principaux composants d'un système éolien

8-2-1 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 a 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 II-6).

➤ 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.

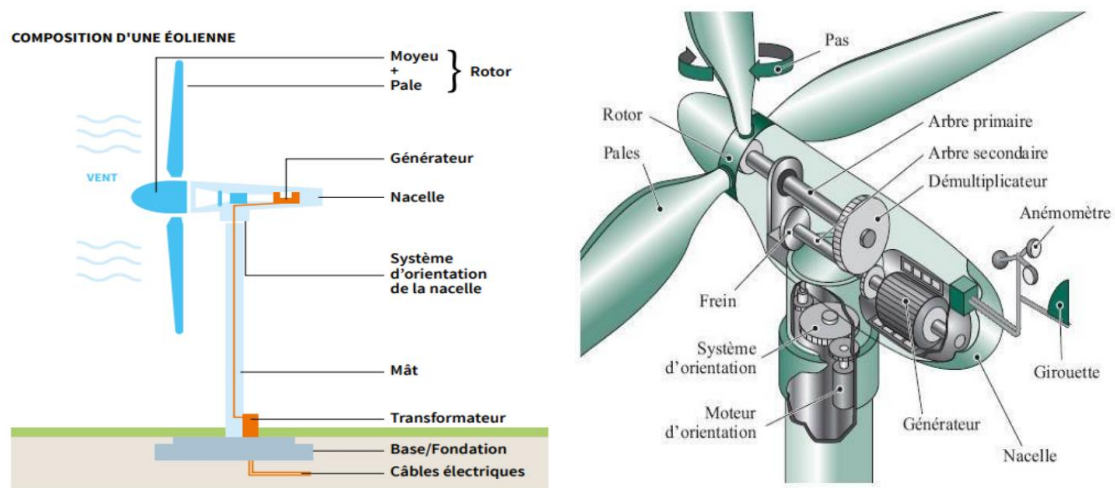


Figure I-8 : Structure générale d'une éolienne

8-2-2 Structure d'une nacelle [20]

➤ 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.

➤ 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.

➤ Roulement de la pale

Les roulements sont des éléments de haute capacité avec des composants de grande précision. Afin de tirer pleinement profit de 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.

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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).

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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 de 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.

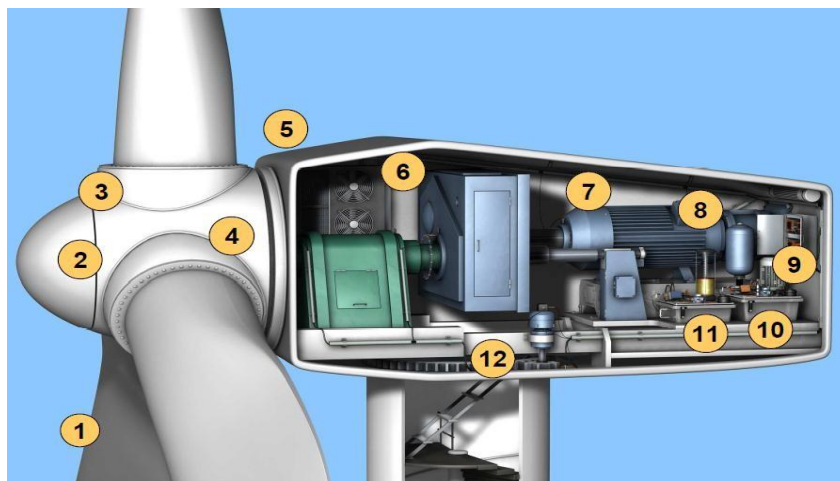


Figure I-9 : Structure d'une nacelle.

Nous pouvons trouver d'autres composants qui n'apparaissent pas dans la Figure II-7 [21].

➤ 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-9 Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

9-1 Générateur synchrone

La génératrice synchrone, également connue sous le nom de Machine Synchrone (MS), peut être utilisée dans un système d'entraînement direct lorsque la connexion mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans nécessiter l'utilisation d'un multiplicateur. Cependant, dans ce scénario, il est indispensable que la génératrice soit connectée au réseau électrique via des convertisseurs de fréquence. En revanche, si la génératrice est dotée d'aimants permanents, elle peut fonctionner de manière autonome car elle ne requiert pas d'excitation externe. [22]

9-2 Générateur asynchrone

La Machine Asynchrone (MAS) est largement utilisée dans la plupart des cas, notamment dans les éoliennes, en raison de sa capacité à supporter des variations de vitesse, ce qui est crucial dans un environnement où la vitesse du vent peut fluctuer rapidement. Ces variations de vitesse peuvent entraîner d'importantes contraintes mécaniques sur le système, mais elles sont réduites avec une machine asynchrone par rapport à une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe.

La génératrice asynchrone fonctionne à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui nécessite l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide). [22]

Dans le domaine de l'énergie éolienne, il existe plusieurs types de machines asynchrones, mais notre étude se concentrera principalement sur les génératrices asynchrones à double alimentation.

I-10 Les principaux défauts mécaniques des éoliennes

Un résumé de panne des composants de turbine est tracé sur la Figure II-10 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 ainsi que le générateur et les roulements qui ensemble engendrent la majorité des pannes de l'éolienne [23].

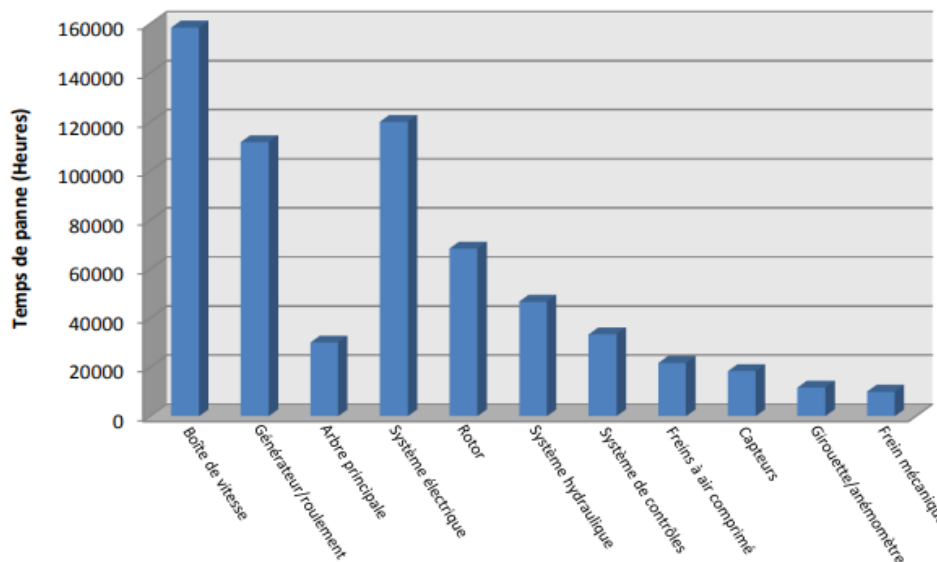


Figure I-10 : Pannes provoqués par des sous-systèmes de l'éolienne

10-1 Défauts de roulements Les roulements

Se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants Figure II-8. 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]

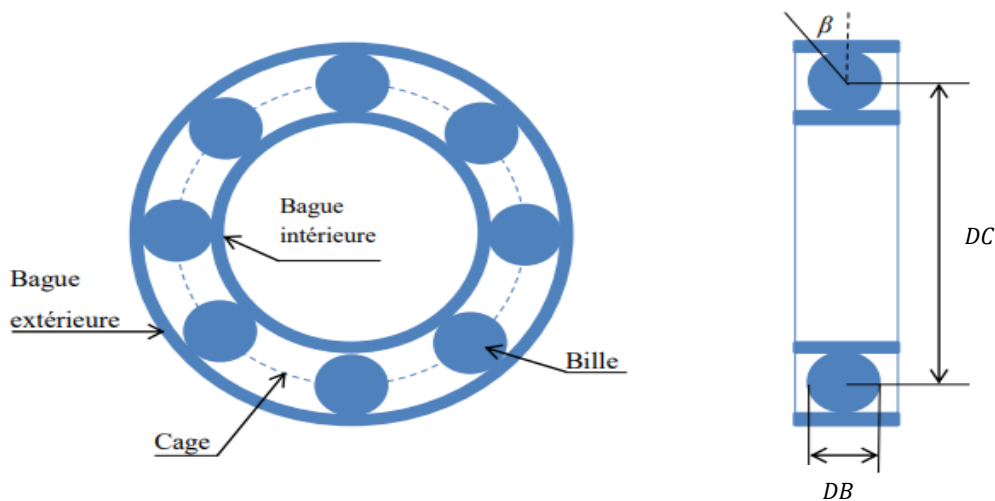


Figure I-11 : Dimension du roulement à bille

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

$$\text{Défaut de bague externe : } f_{b.ext} = BPFO = \frac{Nb}{2} * f_r * \left(1 - \frac{DB}{DC} * \cos(\beta)\right) \quad (\text{I-1})$$

$$\text{Défaut de bague interne : } f_{b.int} = BPF1 = \frac{Nb}{2} * f_r * \left(1 + \frac{DB}{DC} * \cos(\beta)\right) \quad (\text{I-2})$$

$$\text{Défaut de bille : } f_b = BSF = \frac{DC}{2DB} * f_r * \left(1 - \frac{DB^2}{DC^2} * \cos^2(\beta)\right) \quad (\text{I-3})$$

$$\text{Défaut de cage : } f_{cage} = FTF = 0.5 * f_r * \left(1 - \frac{DB}{DR} * \cos(\beta)\right) \quad (\text{I-4})$$

Où DB le diamètre d'un élément roulant, DC la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, Nb est le nombre d'éléments roulants, β angle de contact des billes avec les bagues du roulement et Frot est la fréquence de rotation du rotor.

I-11 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents types de maintenance dans un environnement industriel et des principales étapes et outils nécessaires à la mise en place d'un système de surveillance et de diagnostique.

Avant de tester l'efficacité de certaines des méthodes mentionnées ci-dessus et de contribuer à l'analyse de l'état des systèmes en cas de défaillance,

Nous estimons qu'il est utile d'introduire des défaillances mécaniques telles que des défaillances de roulements qui peuvent affecter la machine d'énergie éolienne, de manière à ce qu'elle soit en mesure de fonctionner correctement.

Il est donc important de connaître ses composants internes et leur fonctionnement, nous avons donné un aperçu des différentes éoliennes utilisées pour la production d'électricité, puis nous nous sommes concentrés sur les éoliennes à axe horizontal et leurs différents composants, nous avons également présenté les différentes défaillances mécaniques qui se produisent dans les éoliennes et, enfin, nous avons donné quelques exemples de machines électriques utilisées pour produire de l'électricité à partir du vent.

Chapitre II

Modélisation de la turbine éolienne

II-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation et le contrôle des éoliennes. La première partie consiste à étudier l'aérodynamique de la turbine afin de déterminer les principaux paramètres de fonctionnement, tels que les coefficients de puissance et de couple, ainsi que la limite de Betz.

Nous explorerons également différentes stratégies de contrôle visant à réguler et à limiter la puissance aérodynamique de l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint des niveaux élevés. [26]

II-2 Principe de conversion de l'énergie éolienne

2-1 La puissance du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur son arbre. L'énergie cinétique des particules d'air, ayant une masse m et se déplaçant à une vitesse V , est donnée par : [27]

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II-1})$$

D'où

E_c : C'est l'énergie cinétique en (joule)

v : C'est la vitesse du vent en (m/s)

m : C'est la masse de l'air en (Kg) Si on applique cette relation sur les éoliennes donc on doit préciser sur la masse qui tourne les pâles de l'éolienne, cette masse est donnée par la formule

$$m = \rho V_{ol} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

ρ : Est la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1.25 Kg/m³

Vol : C'est le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en m³ et ce volume est donné par la formule suivante

$$V_{ol} = Se \quad (\text{II-3})$$

D'où :

S : C'est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²)

e : Est l'épaisseur des pales en (m)

Donc on peut introduire l'énergie théoriquement récupérable par les éoliennes est donnée par la formule : $E_c = \frac{1}{2}\rho Sev^2$ (II-4)

Mais on sait que la puissance P est donnée par la relation suivante :

$$p = \frac{E}{t} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

P : La puissance en watts (W)

E : L'énergie en joule (j)

t : Le temps en seconde (s)

Donc si on remplace la formule (III.4) on obtient la formule suivante :

$$p = \frac{\frac{1}{2}\rho S v^2}{t} \quad (\text{II-6})$$

Avec

$$v = \frac{e}{t} \quad (\text{II-7})$$

Donc la formule sera

$$p = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II-8})$$

S Peut être donné par la formule $S = \pi R^2$ avec R c'est le rayon de rotor en (m), donc la formule sera :

$$p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{II-9})$$

Ce qui nous montre que la puissance absorbée de l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et de carrée de rayon de rotor (la longueur de la pale). [27]

Une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent donc il y a un coefficient que nous sommes obligées d'en tenir compte dans notre formule c'est le coefficient de puissance C_p . Donc la formule (III.9) sera :

$$p = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{II-10})$$

Le coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient varie d'une éolienne à une autre car il est fonction de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β (l'angle formé par le vent par rapport à l'axe de la pale). [27]

La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne est donnée par la formule :

$$v = R\Omega \quad (\text{II-11})$$

Avec :

v : C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

R : La longueur des pales en (m)

Ω : La vitesse angulaire des pales en (rad/ s)

Et comme les éoliennes ont différentes longueurs de pales donc chaque éolienne est caractérisée par sa vitesse résultante de déplacement des pales. On peut introduire maintenant le rapport entre cette vitesse v et la vitesse du vent primaire par la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v_1} \tag{II-12}$$

Cette vitesse est une caractéristique importante pour les éoliennes, chaque éolienne a sa vitesse spécifique nominale λ_{nom} et d'après cette vitesse on peut classer les éoliennes.

Dans la pratique il ya des rotors avec $0,9 < \lambda < 15$, dans des cas exceptionnels $\lambda = 20$. La vitesse spécifique nominale λ_{nom} permet cataloguer les rotors de la suivante façon : ceux qui avec λ jusqu'à les environs de 3 on les appelé éoliennes lentes et ceux qui avec λ supérieur à 4 on les appelé éoliennes rapides Figure II-1. [28]

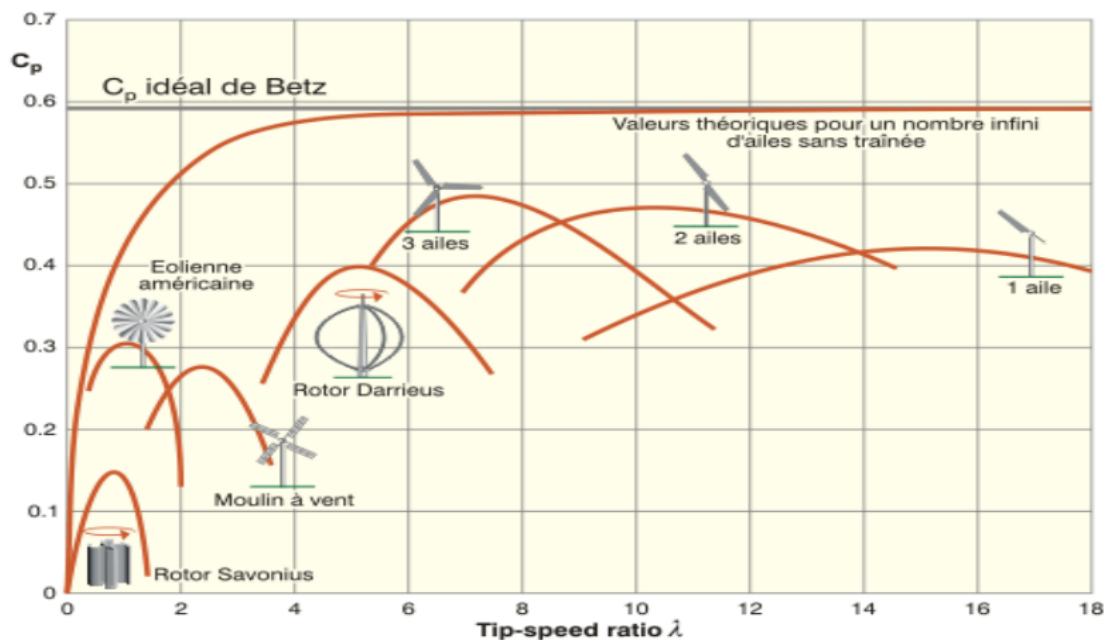


Figure II-1 : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

L'autre paramètre qui influe sur le coefficient de puissance est l'angle de calage β .

La Figure II-2 illustre la variation du C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β .

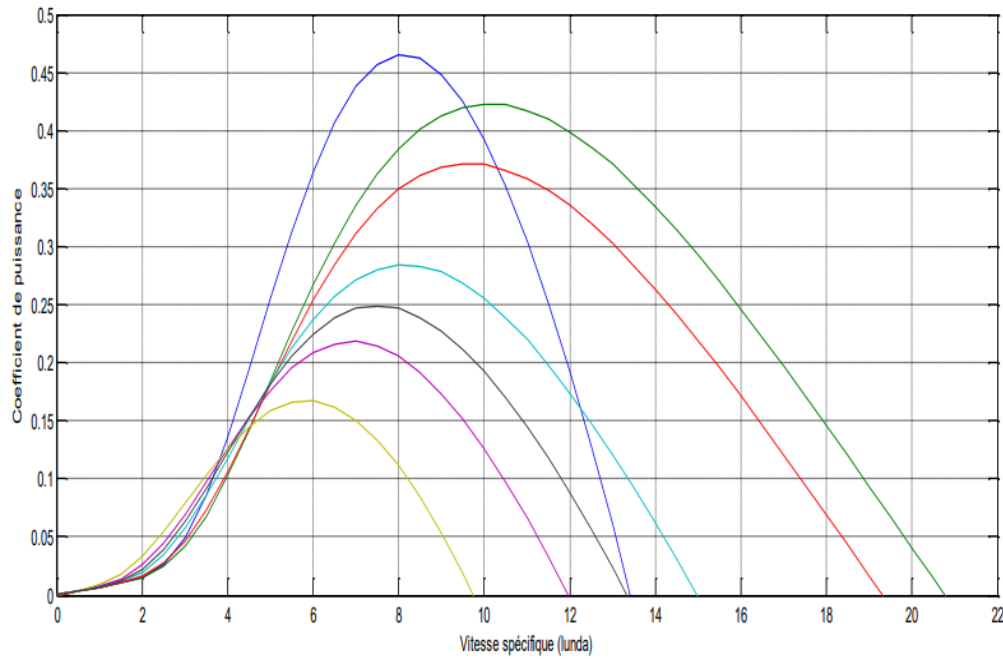


Figure II-2 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + \lambda C_6 \quad (II-13)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (II-14)$$

$$C_1 = 0.5$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = 21$$

$$C_6 = 0.0068$$

Sur la (Figure II-2), plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet ($\beta=0$). Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1$; $C_{pmax} = 0.475$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, provoque la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

2-2 La limite de BETZ

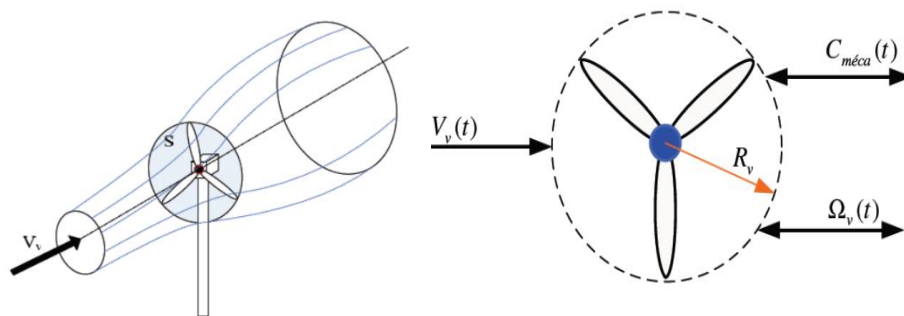


Figure II-3 : Variation de la vitesse du vent

Dans le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II-3, nous considérons la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé en amont de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après le passage à travers le rotor V_2 , cela peut être exprimé comme suit :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{II-15}$$

La masse d'air en mouvement m_t (Kg/s) de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est

$$m_t = \rho sv \tag{II-16}$$

Avec v c'est la vitesse moyenne du vent traversant le rotor en (m/s) donc la formule sera :

$$m_t = \rho s \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{II-17}$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton $p = \frac{E_{ent} - E_{sort}}{2}$)

$$p_m = \frac{1}{2} m_t (v_1^2 - v_2^2) \tag{II-18}$$

P_m : La puissance extraite par le rotor en (W)

m_t : Est la masse par seconde (Kg/s)

v_1 : La vitesse avant le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V_2 : La vitesse après le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

Soit en remplaçant mt par son expression dans (III.18) nous obtenons

$$p_m = \frac{\rho s}{4} (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \tag{II-19}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_0 correspondante serait alors :

$$p_{mt} = \frac{1}{2} \rho s v_1^3 \tag{II-20}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$C_p = \left(\frac{p_m}{p_{mt}} \right) = \frac{1}{2} \left(\left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right) \right) \tag{II-21}$$

La puissance totale d'un flux d'air non perturbé, p_m est exprimée en watts (W).

Si l'on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus dans la Figure II-4, on observe que le rapport $\frac{p_m}{p_{mt}}$ également appelé coefficient de puissance C_p , atteint un maximum de $\frac{16}{27}$, soit environ 0,59.

Cette limite maximale théorique, connue sous le nom de limite de Betz, fixe la puissance maximale qui peut être extraite pour une vitesse de vent donnée. En pratique, cette limite n'est jamais atteinte, et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de la vitesse relative λ , qui représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent, ainsi que de l'angle d'orientation de la pale β . [27]

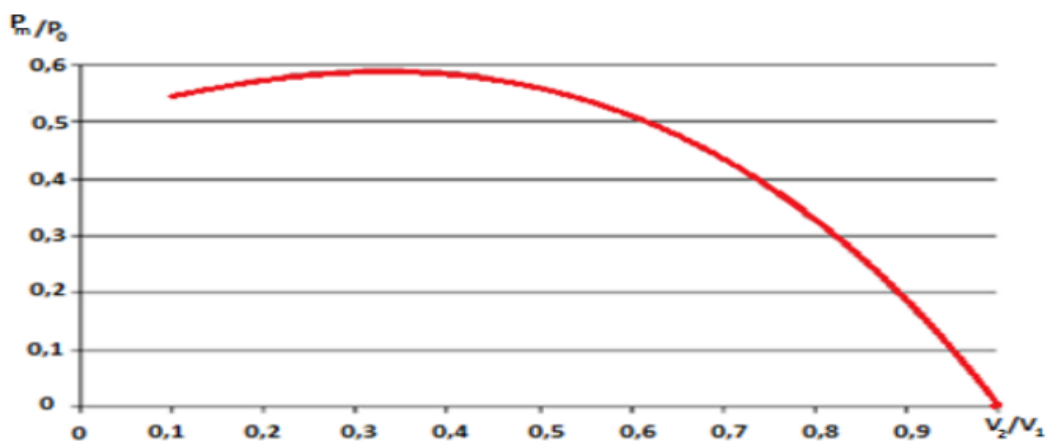


Figure II-4 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse

On peut voir que la fonction atteint son maximum pour $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$, (freinage du vent à $\frac{1}{3}$ de sa vitesse originale) la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant de 0,59 ou $16/27$ de la puissance totale contenue dans le vent [28].

Il est important de souligner que le coefficient de puissance peut être en fonction de la vitesse relative $C_p(\lambda)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système à décrochage aérodynamique "stall" ou en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage β , $C_p(\lambda, \beta)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système d'orientation des pales "pitch" [29]

2-3 Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent
Figure II-5

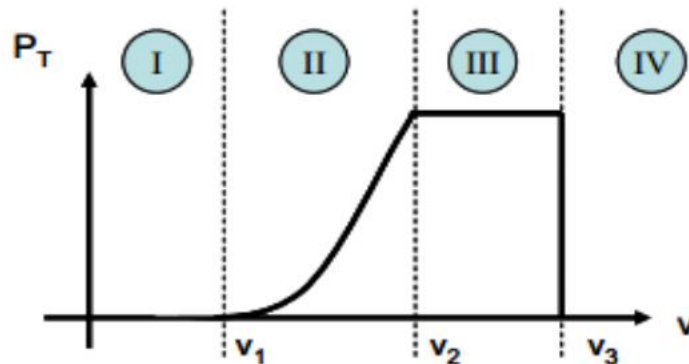


Figure II-5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s [27].

Zone I : $V < V_1$

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_2$

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_2 < V < V_3$

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $V > V_3$

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90^\circ$). Donc la puissance extraite est nulle.

II-3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine. Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir.

➤ Le système « pitch »

Le système de régulation active par vérins hydrauliques, également appelé "pitch control", implique la modification de l'angle de calage des pales de l'éolienne afin de tirer le meilleur parti du vent instantané et de limiter la puissance lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale. En général, ce système ajuste l'angle de calage des pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent, de sorte que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, permettant ainsi d'extraire la puissance maximale à tout moment. Cette technologie permet de réguler la puissance générée, notamment en cas de vents forts. [27]

➤ Le système « stall »

Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, également appelée "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu. Elles sont spécialement conçues pour subir des décrochages progressifs lors de vents forts, c'est-à-dire que lorsque le vent atteint une vitesse critique [10], les pales décrochent pour réduire la puissance générée.

Comparé au "pitch control", le "stall control" présente l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles ni de systèmes de régulation dans le rotor, ce qui simplifie la construction et réduit les coûts. Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de ne pas permettre le contrôle actif de la puissance générée. [28]

➤ Le système "stall actif"

Le système "stall actif" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux. [30]

II-4 Modélisation de la turbine

4-1 Model de multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (II-22)$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (II-23)$$

4-2 Equation dynamique de l'arbre de transmission

Le modelé mécanique proposé considéré l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{mach} \quad (II-24)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d(\Omega_{mec})}{dt} = C_{mec} \quad (II-25)$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II-26)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : le couple résistant du aux frottements.

$$C_f = f\Omega_{mec} \quad (II-27)$$

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

II-5 Simulation du système éolienne

- Dans la simulation, le travail du système éolien est incorporé sur la base des équations précédentes où la vitesse du vent est fixée à 12 (m /s) et l'angle des pales à 0 degré

Le type de turbine et de générateur est le suivant

- Type de turbine : horizontal
- Type de générateur : Générateurs synchrone (MS)

Dans des conditions normales, la quantité d'énergie mécanique produite est contrôlée par l'angle des pales. Ainsi, cette turbine est soumise à des lois physiques qui déterminent sa capacité à supporter les conditions environnementales et les contraintes mécaniques.

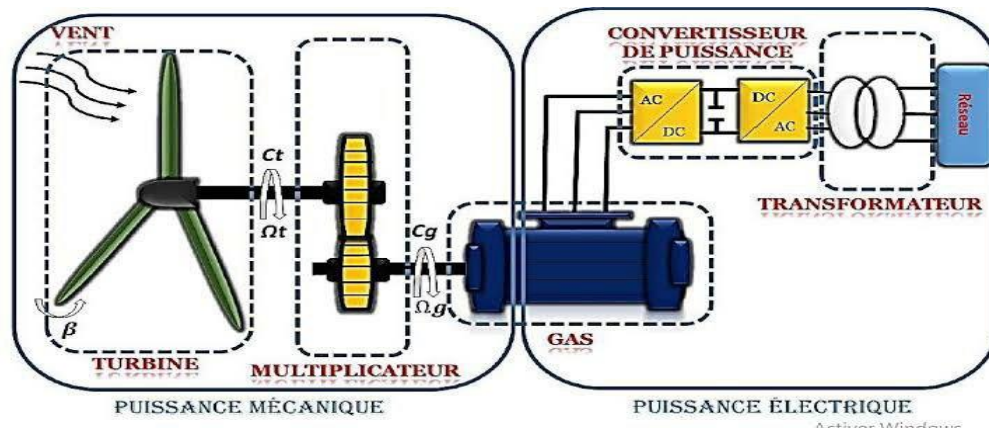


Figure II-6 : Les composants principaux d'un système de turbine éolienne de l'intérieur.

Au début du mouvement de rotation de la turbine, un couple de rotation spécifique est produit, puis les engrenages entrent également en mouvement pour amplifier la rotation. Le boîtier de transmission est relié à un arbre soudé à l'arbre de rotation du générateur, ce qui génère un couple de rotation pour la sortie de la turbine éolienne. En même temps, ce couple est considéré comme l'entrée principale du générateur. Lorsque le générateur tourne, nous avons une induction électromagnétique, ce qui produit une tension électrique, qui est la sortie de ce générateur.

Dans les simulations de turbine avec générateur, des éléments clés sont intégrés selon le schéma suivant, illustrant le fonctionnement du système de turbine éolienne avec générateur.

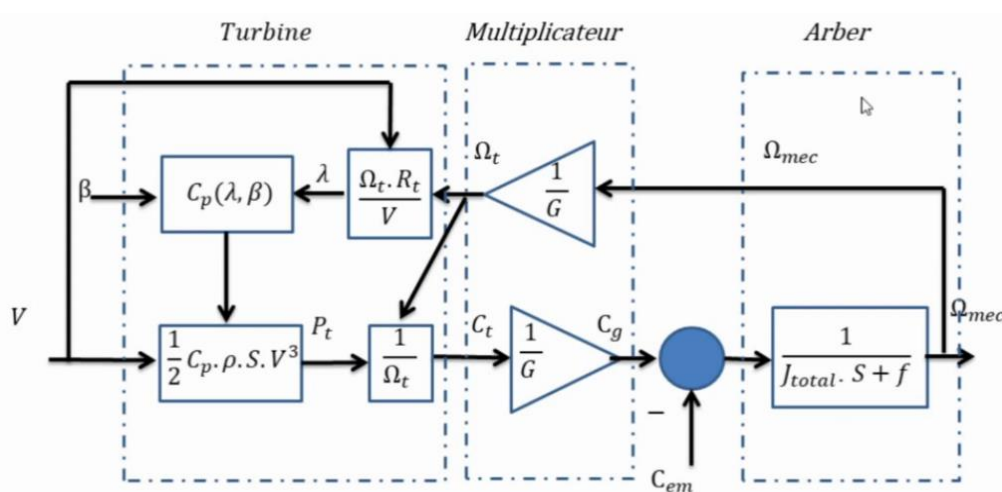


Figure II-7 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

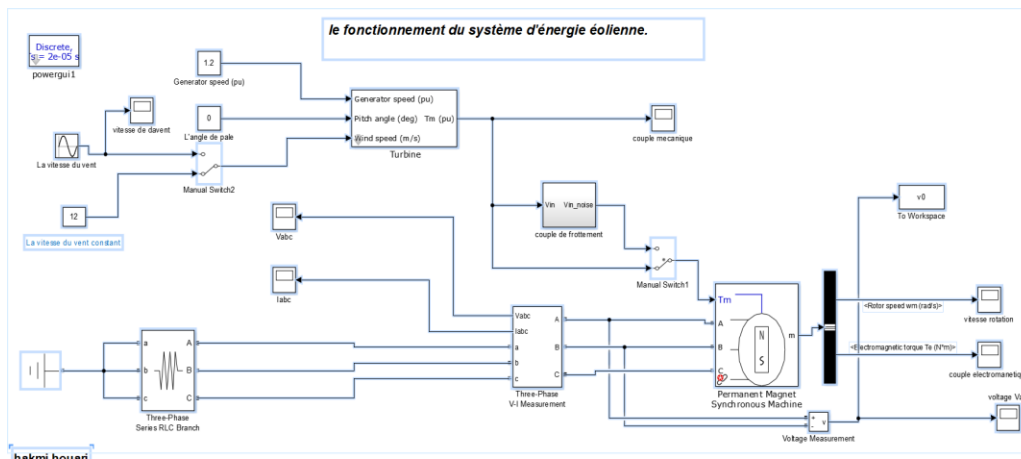


Figure II-8 : Simulations de travail du système éolien.

Les simulations sont divisées en deux catégories principales :

II-6 Partie mécanique

Simulation de la partie mécanique comprenant la partie éolienne et le multiplicateur avec l'arbre du rotor.

Les équations précédentes auxquelles l'éolienne est soumise sont introduites.

La Figure II-9 suivante montre l'intégration du système éolien dans Simulink :

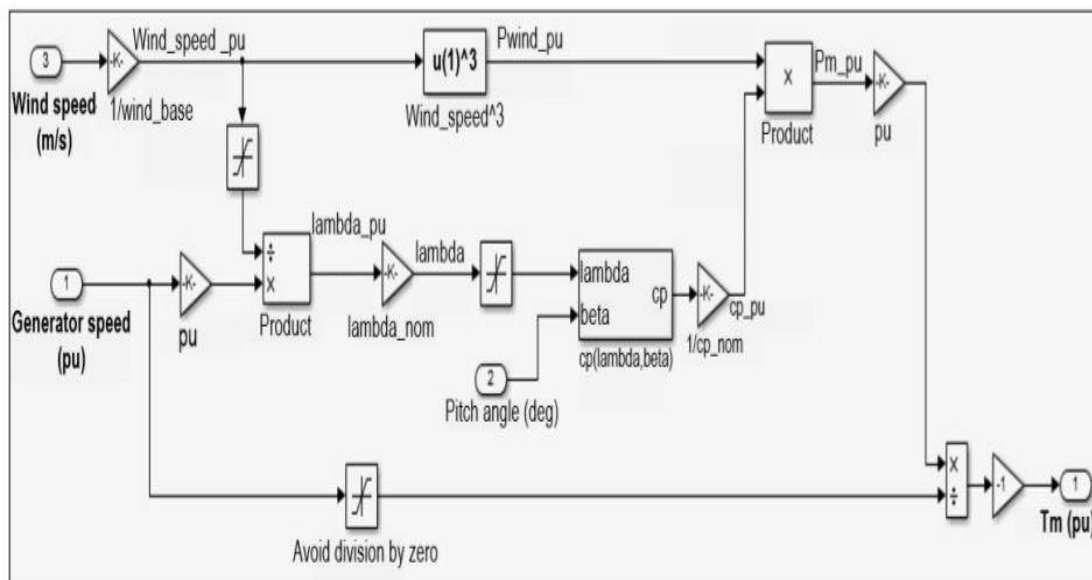


Figure II-9 : Simulation turbine éolienne

Dans cette simulation, nous utilisons une éolienne ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Valeur et unité
Puissance de sortie mécanique	1.5e6 W
Puissance de base du générateur électrique	1.5e6/0.9 VA
Vitesse de vent de base	12 m/s
Puissance maximale à la vitesse de vent de base de la puissance mécanique nominale	0.73 p. u
Vitesse de rotation de base de la vitesse du générateur	1.2 p. u
Angle de pales β	0°

Tableau II-1 : Caractéristiques turbine éolienne

La puissance produite par une éolienne varie en fonction du type d'éolienne, comme indiqué dans le chapitre précédent.

6-1 Résultats mécaniques

Lorsque la vitesse est fixée à 12 m/s et que l'angle de pale est de 0°, les résultats sont les suivants :

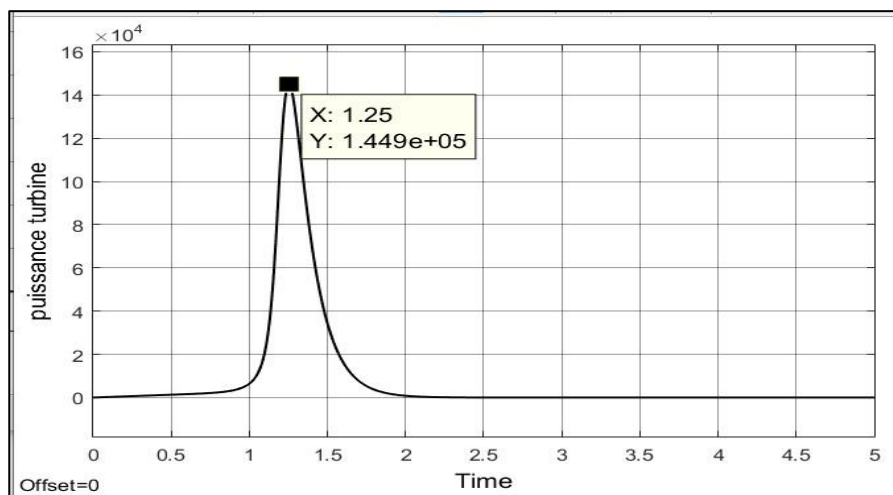


Figure II-10 : Courbe de variation d'énergie en fonction du temps.

De la Figure II-10, il ressort que puissance atteint une valeur de $1.44e5$ à 1.25 (s) puis commence à diminuer jusqu'à zéro.

$$P_t(1.25)=1.44e5 \text{ (Watt)}$$

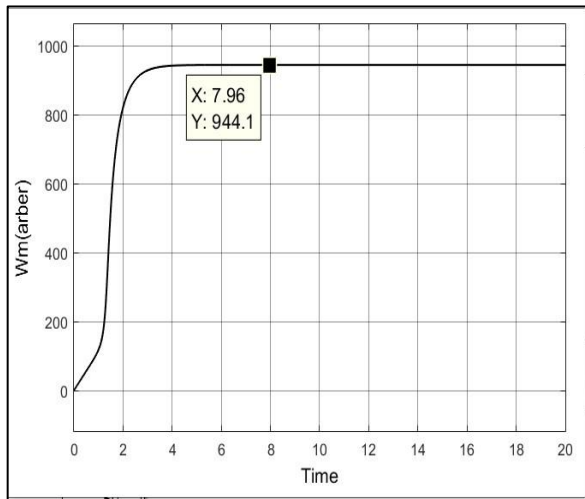


Figure II-12 : La vitesse de rotation de l'arbre de la turbine

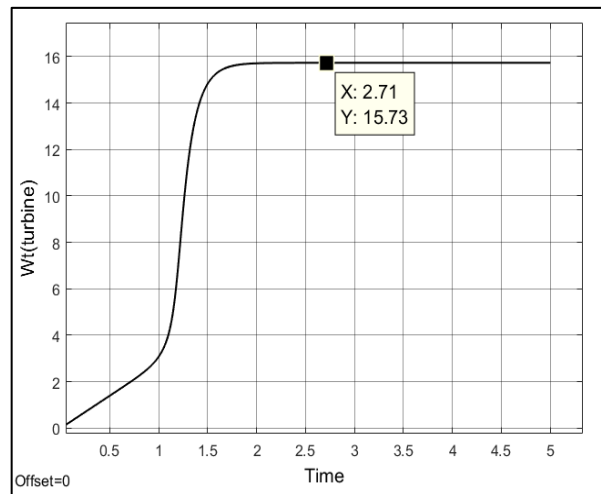


Figure II-11 : La vitesse de rotation de la turbine

Les résultats représentent la vitesse de rotation de l'arbre et de la turbine au cours du temps.

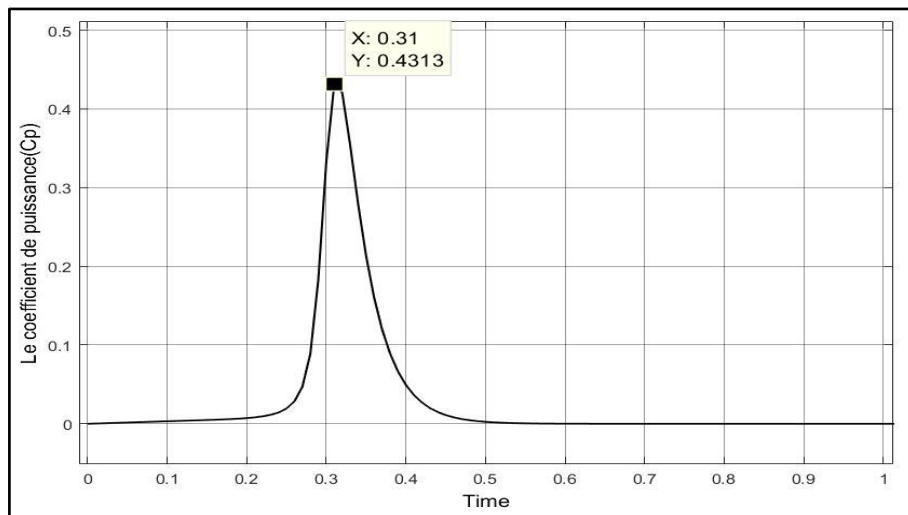


Figure II-13 : Le coefficient de puissance

Selon la loi de Bétz, le coefficient de puissance ne dépasse pas 0,5

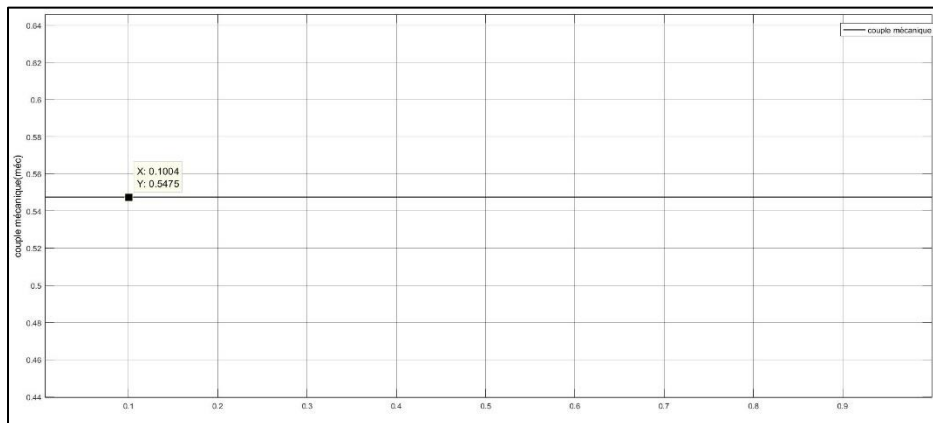


Figure II-14 : Le couple de rotation mécanique

En cas de défaillance mécanique ou d'influence extérieure sur la machine, la valeur du couple mécanique change, c'est-à-dire que nous connaissons l'état de fonctionnement de la machine à partir de la courbe de couple.

II-7 Partie électrique

Dans la simulation, le générateur sélectionné est un générateur synchrone ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Valeur et unité
Forme d'onde de force électromotrice de contre-réaction	Sinusoidal
Type de rotor	Salaient pole
Entrée mécanique	Couple (Cm)
Résistance de phase du stator	0.00867 Ω
Inductances (Ld)	0.00286 H
Inductances (Lq)	0.00344 H
Liaison de flux	0.175 Vs.
Constants de tension	126.966 Ω
Constants de couple	1.05 Nm

Tableau II-2 : Caractéristiques générateur synchrone

Le travail du générateur est lié à la rotation de la turbine. Ce mouvement génère un champ électromagnétique à l'intérieur du générateur, qui produit un couple électromagnétique

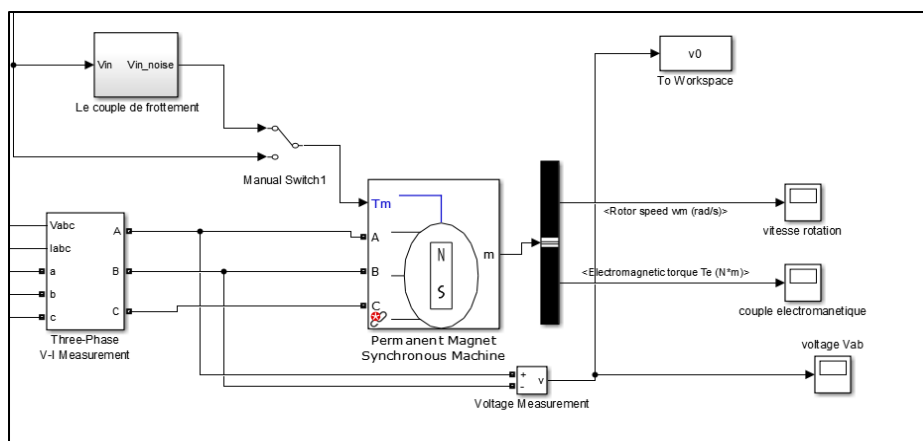


Figure II-15 : Simulation et modélisation Générateurs synchrones

La Figure II-15 suivante représente le générateur utilisé connecté à la turbine

7-1 Résultats électriques

Les résultats sont les valeurs mesurées par le générateur

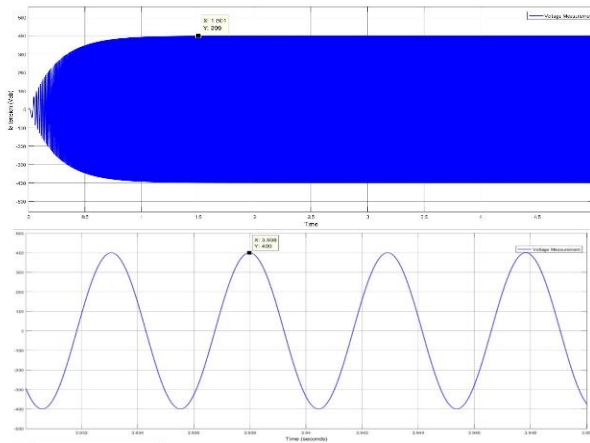


Figure II-16 : Courbe des variations de tension en fonction du temps

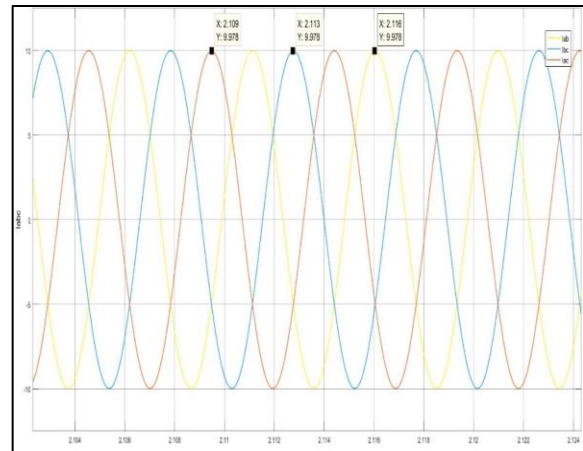


Figure II-17 : Courbe de variation du courant électrique en fonction du temps

Nous pouvons voir que le graphique de la tension est une onde sinusoïdale avec une valeur maximale de 400 volts.

Les valeurs de courant dans les trois phases ont la même valeur et le signal est sinusoïdal. Ces valeurs indiquent que le générateur est en bon état de fonctionnement.

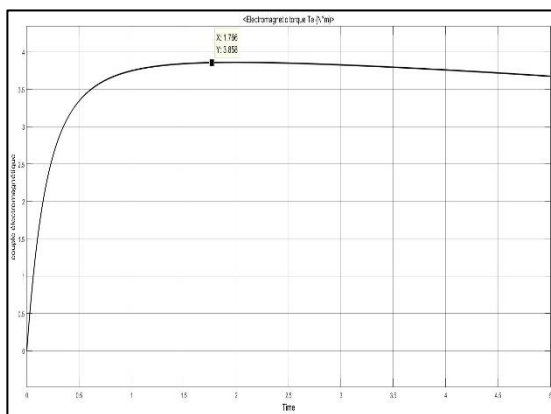


Figure II-18 : Courbe couple électromagnétique

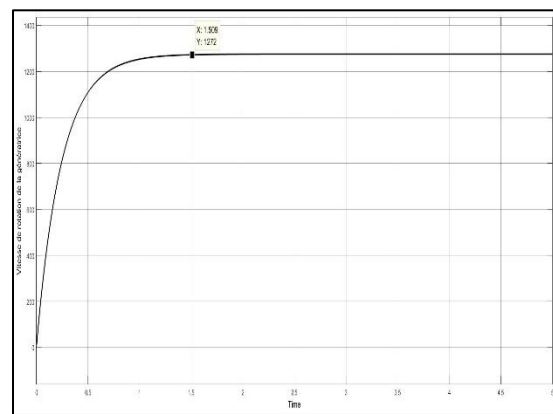


Figure II-19 : Courbe Vitesse rotation Arber générateur

Les résultats obtenus à partir de l'éolienne et de la génératrice permettent de déterminer l'état de la machine pendant son fonctionnement.

II-8 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un système éolien, basé sur une turbine et son convertisseur mécanique, le multiplicateur.

Le fonctionnement du système a été simulé et les résultats ont indiqué que le système d'énergie éolienne fonctionnait dans de bonnes conditions.

Nous avons introduit le concept de défaillance des roulements et son effet sur le fonctionnement de l'éolienne, car elle produit un couple de frottement qui s'oppose au mouvement de l'arbre de l'éolienne.

Au chapitre 4, nous simulons le fonctionnement du système en cas de défaillance d'un roulement et nous diagnostiquons cette défaillance.

Chapitre III

Diagnostic des défauts
mécaniques par l'analyse
fréquentielle

III-1 Introduction

Dns cette partie nous allons faire le diagnostique de notre système éolien avec un défaut de roulement au niveau de l'arbre de rotation du générateur, le diagnostique se fait par une analyse spectrale du signale de tension afin de déterminer les différent défaut qui peuvent exister dans le roulement.

III-2 Simulation d'un système éolien avec défaillance des roulements

Afin de voir l'effet des défaillances des défauts de roulement dans le système éolien étudier nous appliquons, dans les simulations, une contrainte mécanique qui représente le frottement généré par les roulements. Ce frottement génère un moment spécifique appelé couple de frottement, qui influence le fonctionnement de la machine et entraîne des tensions produites avec des formes d'ondes indésirables.

Le frottement dans les roulements peut survenir à cause :

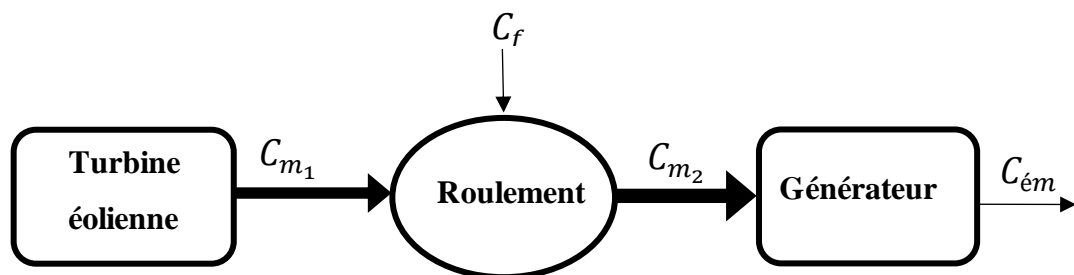
D'un mauvais graissage des roulements.

Ecaillage des surfaces de la bagues externe et de la bague interne.

Des fissures ou de ruptures dans les billes.

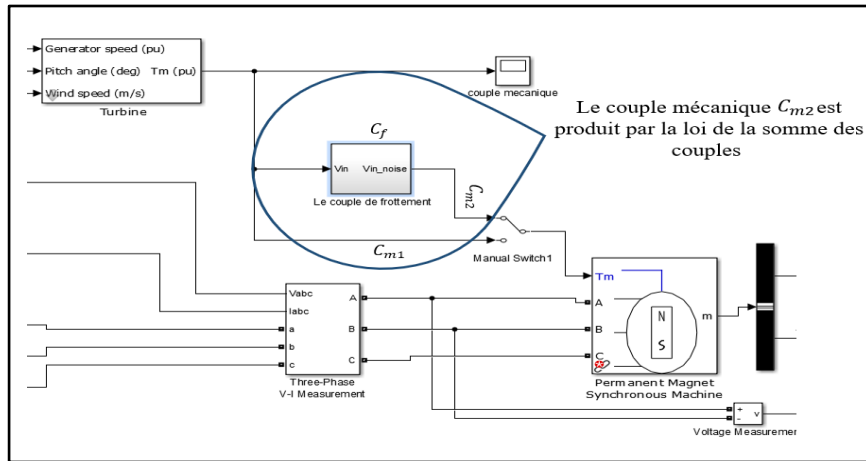
Mauvaise installation des roulements.

Notre étude est schématisée par le synoptique de la figure IV-1. Comme cité déjà auparavant les défauts engendrent un couple de frottement qui s'oppose au mouvement de rotation de l'arbre mécanique du générateur.



FigureIII-1 : Synoptique de simulation du défaut de roulement

La figure suivante figure III -1 représente le schéma bloc de la simulation d'un défaut de roulement avec ses différents cas déjà cité auparavant



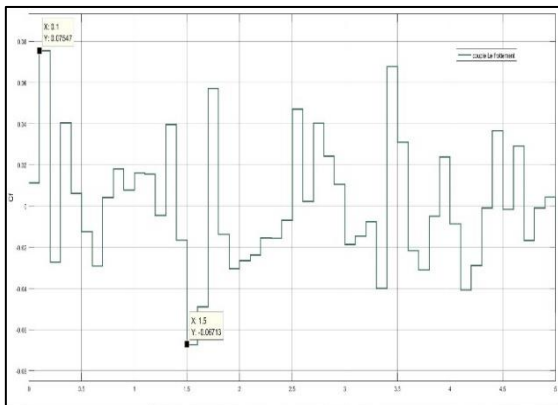
FigureIII-2 : Modélisation et simulation le couple frottement

Le couple de frottement résiste au mouvement de rotation de l'arbre du générateur, ce qui entraîne une modification du cycle et de la valeur du couple mécanique ce qui provoque une forme non sinusoïdale de l'onde de tension produite.

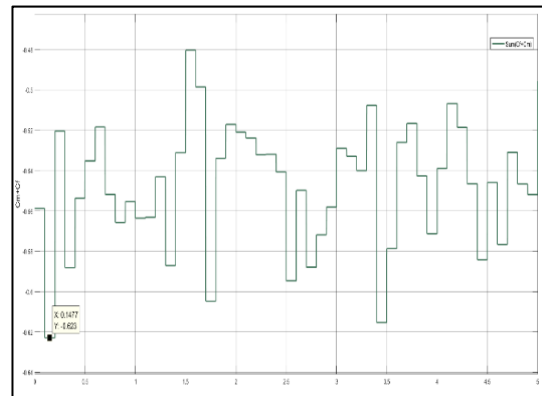
III-3 Influence du défaut de roulement sur la tension

Dans ce qui suit nous allons montrer l'influence d'un défaut au niveau des roulement sur la qualité de la tension produite à savoir l'amplitude et forme de l'onde de tension. Pour ce faire nous allons voir par simulation le comportement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et la tension du générateur en présence d'un couple de défaut provoqué par le roulement

Les valeurs du couple de frottement varient dans le temps, comme le montre les courbes dès la figures IV-3 et IV-4. Les résultats de simulation obtenus voir figure IV-7, nous montrent clairement l'influence de ce type de défaut sur la qualité de la tension produite. Cela nous permet de faire le diagnostic et par la suite la maintenance d'un défaut mécanique on se basant sur une analyse fréquentielle de la tension produite.



FigureIII-3 : Courbe de variation du couple mécanique (C_{m1}) en fonction du temps



FigureIII-4 : Courbe de variation du couple mécanique (C_{m2}) en fonction du temps

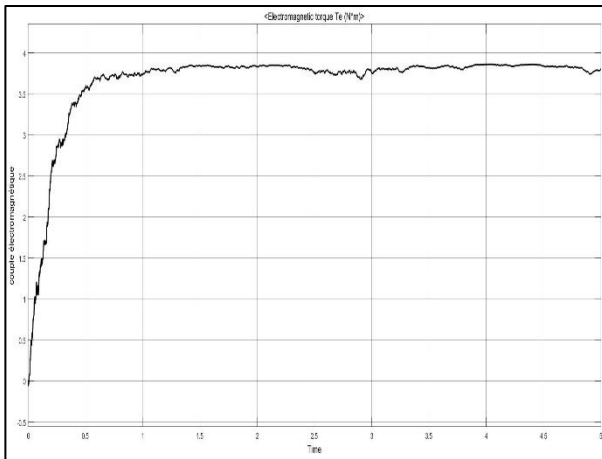


Figure III-5 : Couple électromagnétique C_m

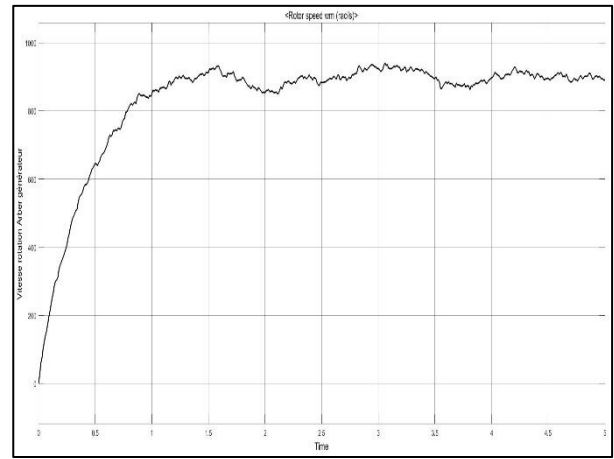


Figure III-6 : Vitesse rotation Arbre générateur Ω_g

Dans ce processus, un ensemble de valeurs de couple de frottement est appliqué au système toutes les 0,01 secondes.

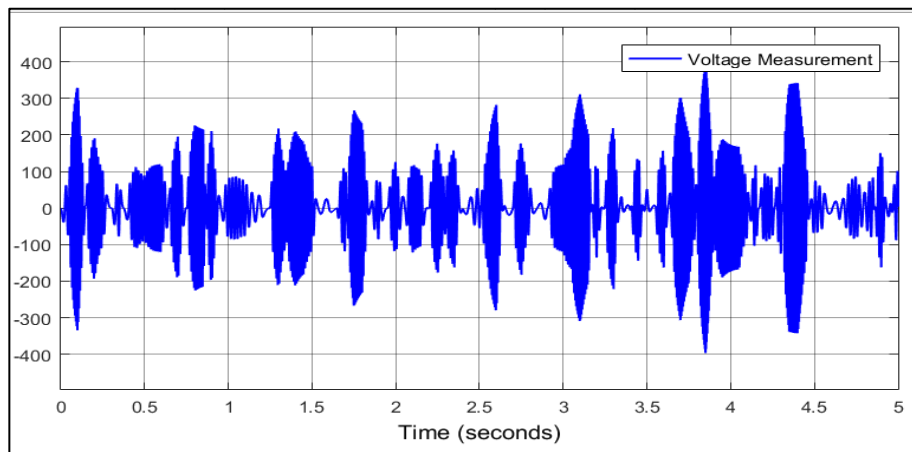


Figure III-7 : La tension électrique Vab

La rotation de l'arbre du générateur est affectée en cas de défaut d'un roulement, ce qui a un impact sur le couple mécanique.

- $C_{m_2} = C_{m_1} - C_f$
- C_f : Le couple de frottement N.m
- C_{m_1} : Le couple mécanique N.m
- C_{m_2} : Couple totale N.m
- T : temps (s) Les valeurs de temps s'étendent de 0 à 5 secondes.

III-4 Diagnostic par l'analyse spectrale des signaux

Le diagnostic par analyse spectrale des signaux se base sur les éléments suivants à savoir ;

4-1 Un signal spectral

Un signal spectral est une représentation d'un signal dans le domaine des fréquences plutôt que dans le domaine temporel. Lorsque nous parlons d'un signal spectral, nous entendons l'analyse du signal en ses composantes de fréquence, ce qui est connu sous le nom d'analyse spectrale.

4-1-1 Analyse spectrale

L'analyse spectral est utilisée pour transformer le signal du domaine temporel au domaine fréquentiel à l'aide de la FFT.

4-1-2 Spectre fréquentiel

Le spectre fréquentiel montre la distribution des différentes fréquences et leurs amplitudes dans le signal.

4-2 Description de la méthode de diagnostic

La méthode de diagnostic que nous avons utilisée est basée sur l'analyse spectral du signal de tension recueillie après simulation de notre système éolien dans les différents cas études de défauts que nous allons proposer par la suite. Dans le cas d'un défaut de roulement quelconque le signal de tension obtenue aura la forme de la figure III-8. Afin de pouvoir faire le diagnostic nous devons réaliser l'analyse spectral de l'enveloppe du signal figure IV-9 de tension obtenue.

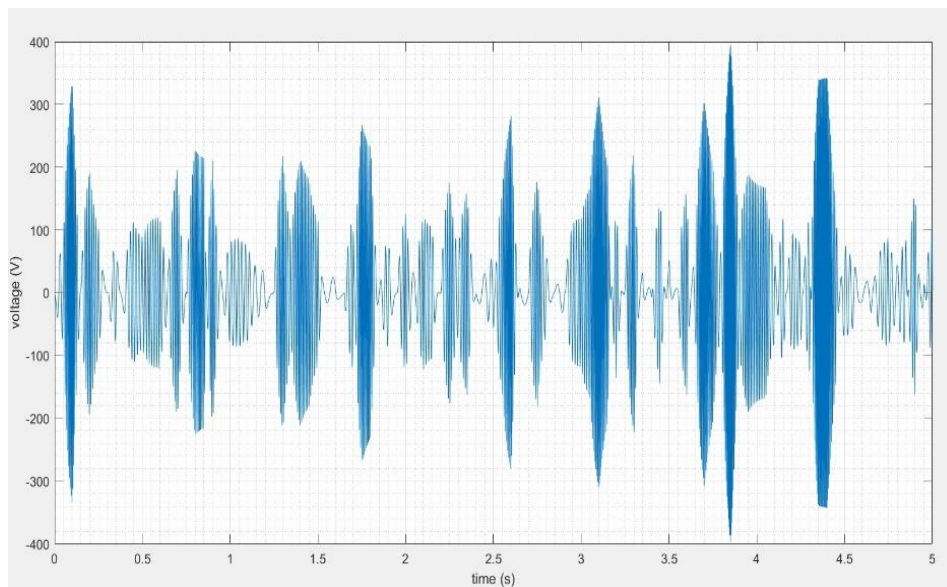


Figure III-8 : La tension électrique Vab

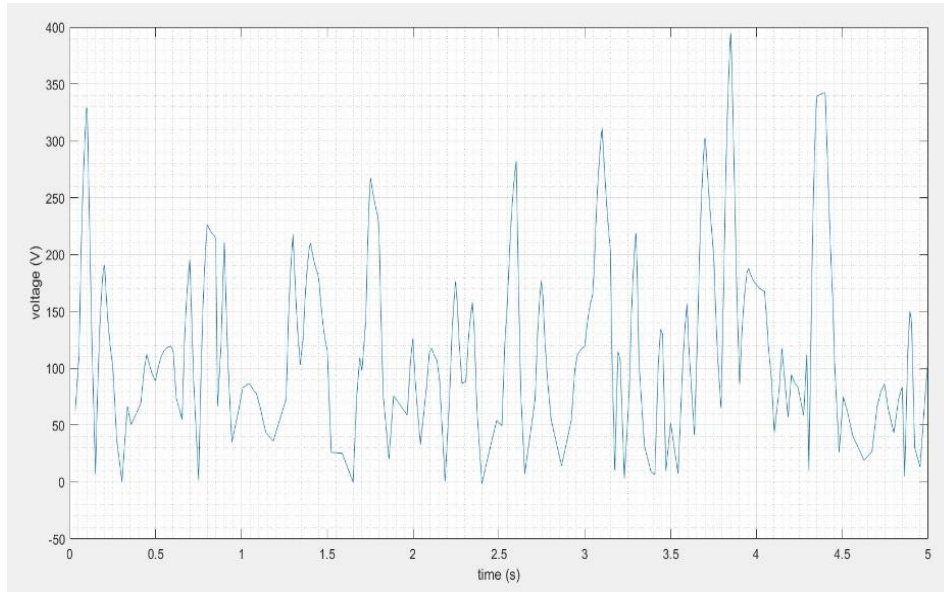
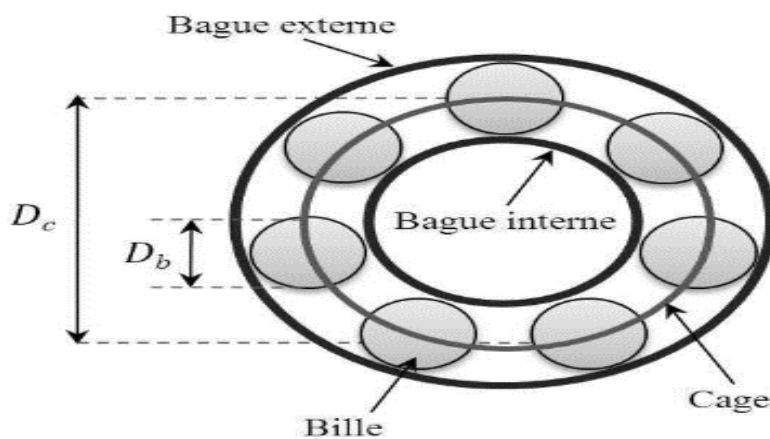


Figure III-9 : Valeurs maximales de la tension électrique V_a

Le couple mécanique est l'apport de la génératrice aux simulations, mais en réalité la vitesse de rotation de l'arbre est la valeur de la connexion entre la génératrice et l'arbre, c'est-à-dire que le travail de la génératrice provient de la rotation de l'arbre de l'éolienne. Diagnostic par l'analyse spectrale des signaux :

III-5 Calcul des différents des défauts de roulement

Dans le cas de notre étude nous avons prié le roulement de type SKF 6303-2Z figure III-10, ses paramètres sont donnés par le tableau IV-1



FigureIII-10 : Structure d'un roulement à bille

Type	SKF 6303-2Z
Diamètre externe	47 mm
Diamètre interne	17 mm
Nombre de billes N_b	7
Diamètre de cage D_c	32 mm
Diamètre de billes D_b	8.735 mm
$\text{Cos}(\beta)$	1

Tableau III-1 : paramètres Le roulement est de type SKF 6303-2Z

5-3 Cas de génératrice a 1 paire de pole

Vitesse de rotation de l'arbre 3745 tour/min

La fréquence fondamentale est donnée par la formule suivante :

$$f_r = \frac{N}{60} \tag{III-1}$$

$$f_r = \frac{3745}{60} = 62.41 \text{ Hz}$$

Pour déterminer la fréquence caractéristique du roulement nous utilisons L'équation (III-28 III-29 III-30 III-31).

Fréquences de rotation Hz	Type de fréquence de défaut	Valeur et unité
62.41	<i>BPFO</i>	158.81 Hz
	<i>BPFI</i>	278.052 Hz
	<i>BSF</i>	105.813 Hz
	<i>FTF</i>	22.68 Hz

Tableau III-2 : Fréquence de défaut du roulement

$$BSF=f_r \times 1.695 \text{ Hz}$$

$$BPFI=f_r \times 4.455 \text{ Hz}$$

$$BPFO=f_r \times 2.544 \text{ Hz}$$

5-3-3 Cas de roulements sains

Le signal de tension a été contrôlé après le démarrage du générateur

Étant donné que le couple de frottement est pratiquement nul

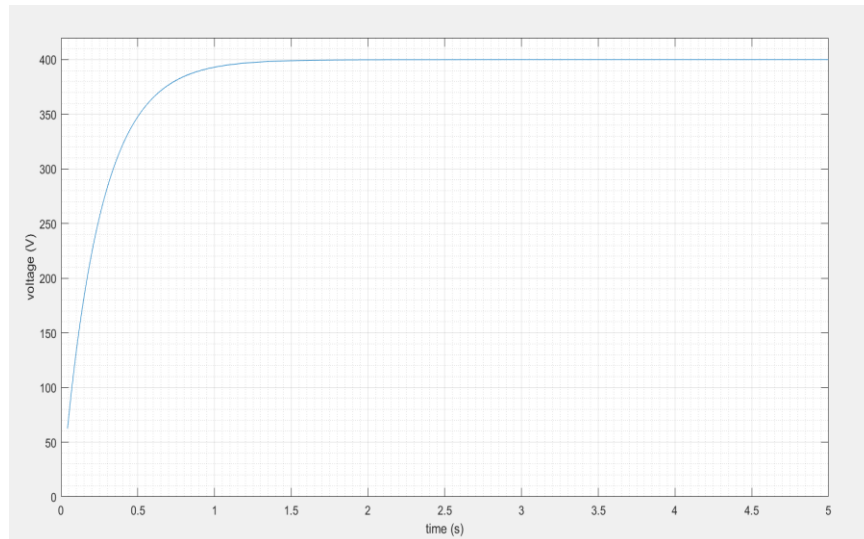


Figure III-11 : la tension électrique maximal

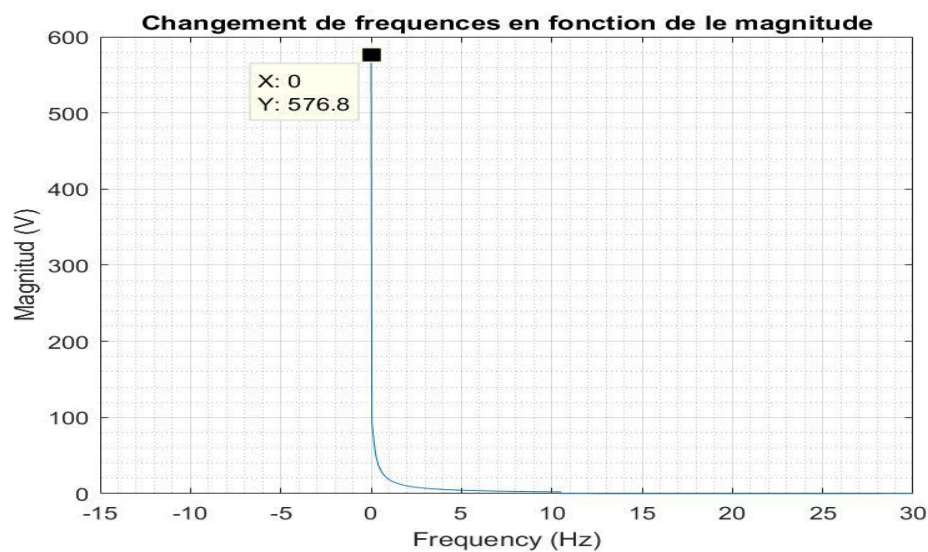


Figure III-12 : Spectre dans le cas de roulements sains

La Figure III-12 montre qu'il y a un seul pic à 0 Hz et une amplitude de 576,8 V, ce qui signifie que le roulement SKF 6303-2Z est en bon état de fonctionnement et qu'il n'y a pas de défaut.

5-3-4 Cas défaut de cage

Défaut *FTF* : fréquence de passage d'un défaut de cage.

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement, $C_f [0 : 0.3]$ N.m

Nous avons obtenu les résultats suivants.

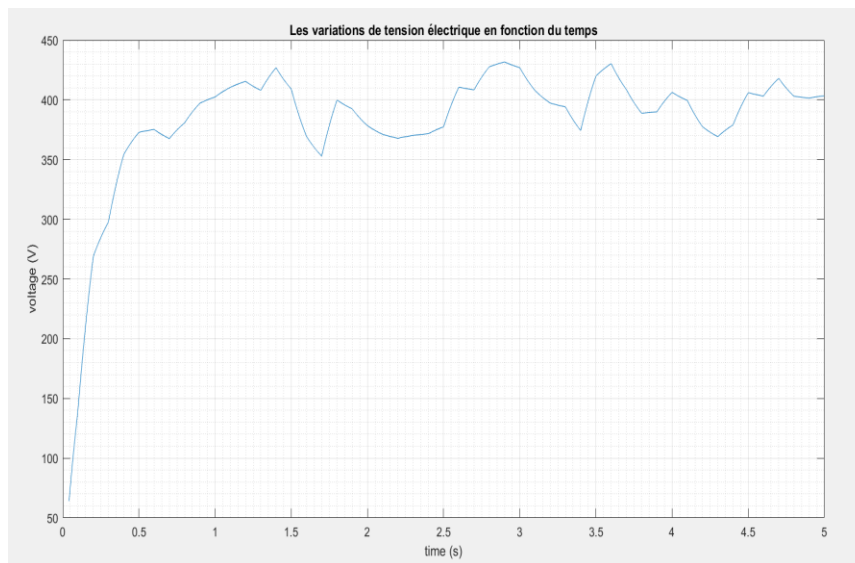


Figure III-13 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 0.3]

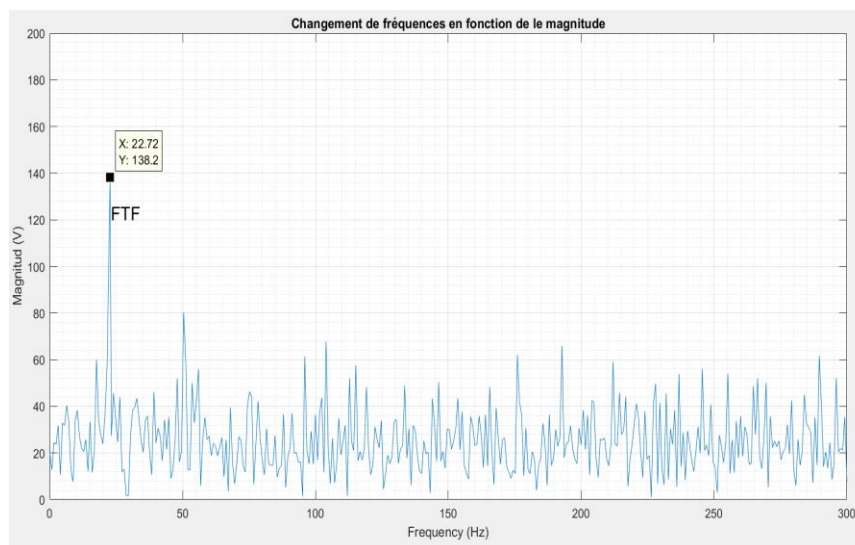


Figure III-14 : Spectre défaut de cage

Pour analyser le signal, nous transformons les valeurs de tension du domaine temporel en domaine fréquentiel à l'aide de la transformée de Fourier. Cela nous donne les valeurs de Fréquence du roulement.

Après conversion du signal représenté à la Figure III-13 du domaine temporel au domaine fréquentiel, la Figure III-14 montre un pic à 22,72 Hz avec une magnitude de 138,2 V

La première raie est située à la fréquence caractéristique de défaut de roulement de défaut de cage $f_{cage} = 22,72$ Hz

Ce résultat démontre la capacité de la transformée de Fourier à détecter un roulement

Basée sur l'analyse du spectre à haute fréquence. Ou Génère des chocs dans la gamme des hautes fréquences.

5-3-5 Cas défaut de Bague externe.

BPFO = Ball Pas Fréquence Outre Race = fréquence de passage d'une bille sur un défaut de Bague externe.

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement, $C_f [0 : 0.7]$ N.m

Nous avons obtenu les résultats suivants :

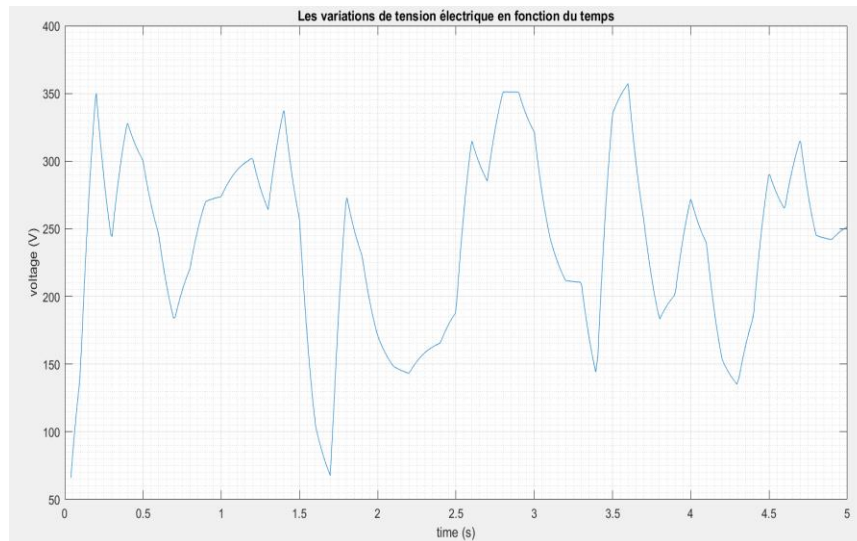


Figure III-15 : Tension du signal en cas de $C_f [0 : 0.7]$

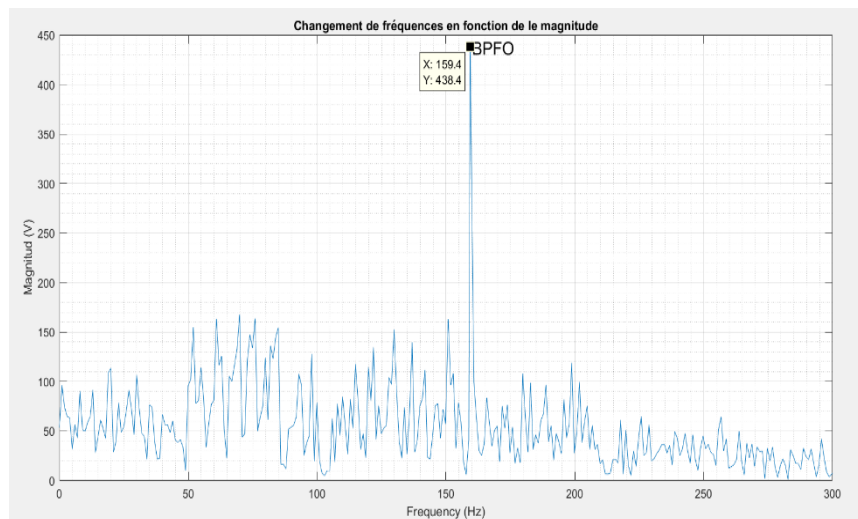


Figure III-16 : Spectre défaut bague externe

Le spectre de L'image vibratoire calculé à partir des données issues de notre système montre la présence d'une raie à la fréquence caractéristique de la bague externe de notre système.

Après analyse du spectre du signal, la Figure III-16 montrent que le pic magnitude 438.4 V à la fréquence $f_{b,ext} = 159.4$ Hz représentant le défaut de la bague extérieure du roulement, se situe dans l'intervalle de temps entre le début et la fin du signal.

5-3-6 Cas défaut de Bague interne.

BPFI = Ball Pass Fréquence Inné Race = fréquence de passage d'une bille sur un défaut de bague interne.

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement $C_f [0 : 0.215]$ N.m

Nous avons obtenu les résultats suivants :

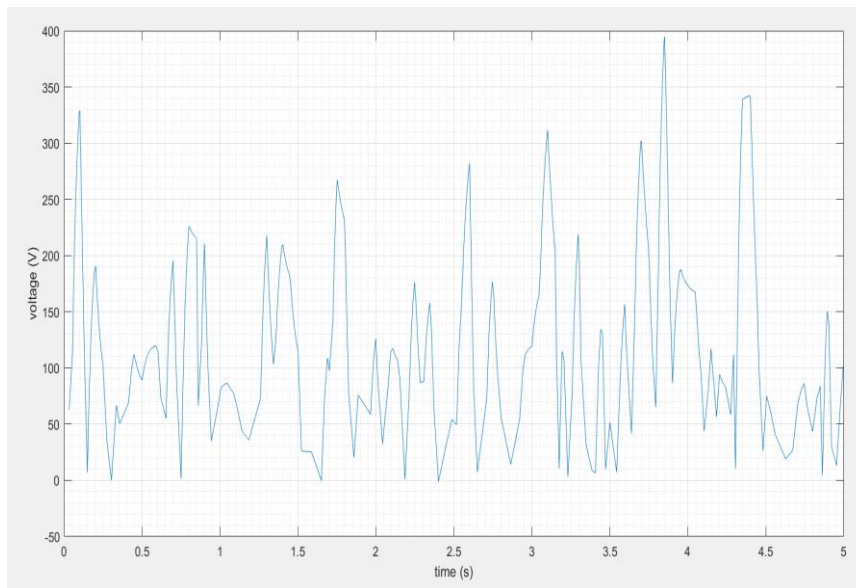


Figure III-17 : Tension du signal en cas de $C_f [0 : 0.215]$

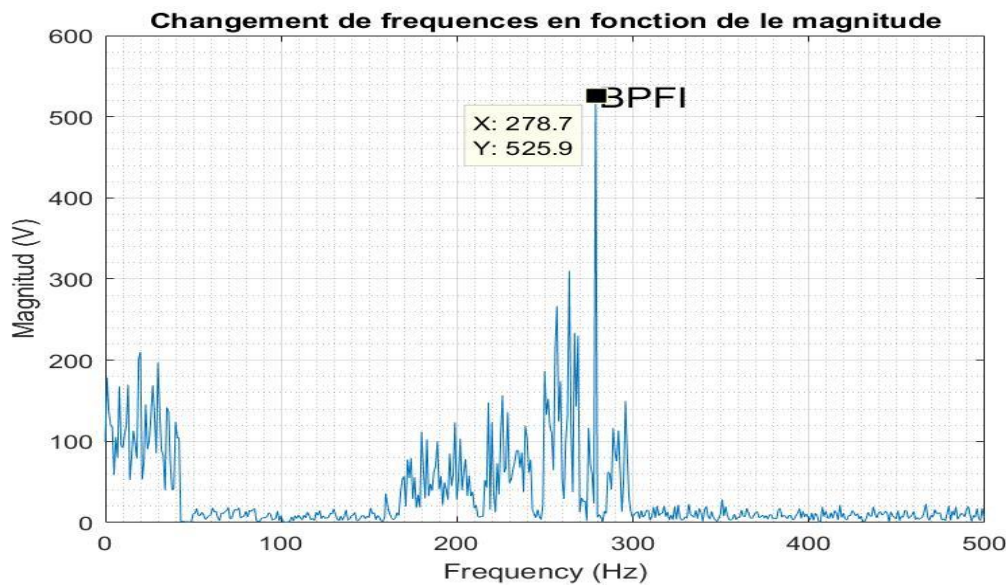


Figure III-18 : Spectre défaut bague intérieure

Le signal de tension apparaît dans le diagramme Figure III-17 après une transformée de

Fourier et nous obtenons le diagramme Figure III-18 suivant :

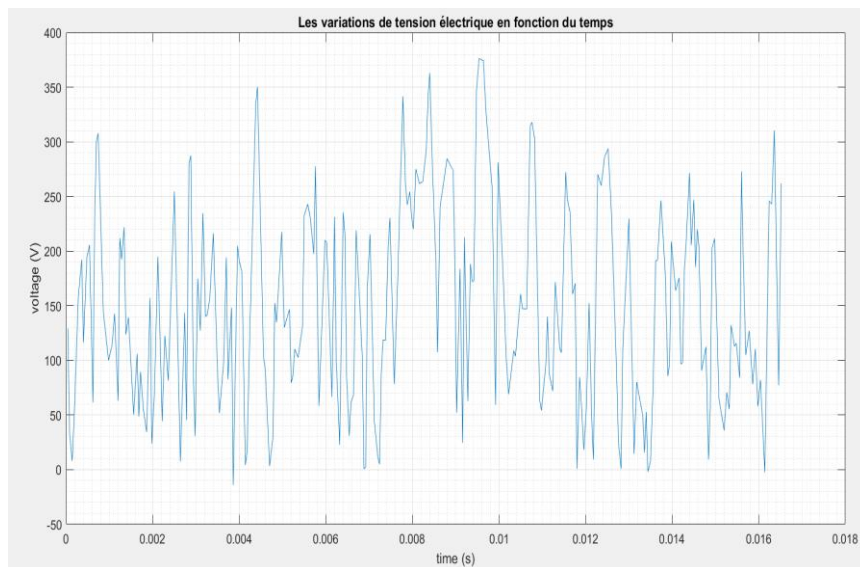
Le signal montre la présence des roulements à billes sur la bague intérieure avec un pic à 525,9 V et une fréquence de $f_{b.int} = 287,7$ Hz.

5-3-7 Cas défaut de défaut de bille sur la bague interne ou externe.

BSF = Ball Spin fréquence = fréquence de passage d'un défaut de bille sur la bague interne ou externe.

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement, $C_f[0 : 1]$ N.m

Nous avons obtenu les résultats suivants :



FigureIII-19 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1]

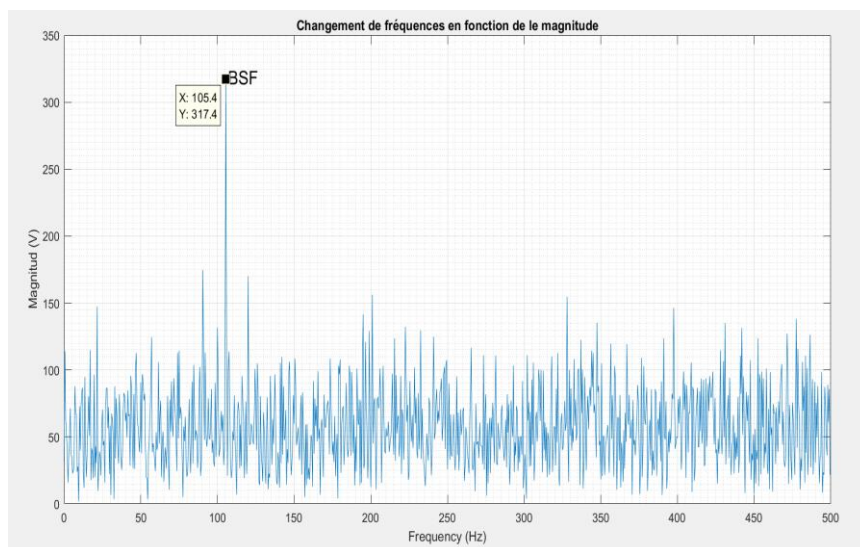


Figure III-20 : Spectre défaut de bille sur la bague interne ou externe

En lisant les fréquences de la courbe de la Figure III-20, on constate qu'une fréquence élevée

indique un roulement défectueux

La valeur de cette fréquence est de 105,4 Hz et la magnitude est de 317,4 V. C'est cette valeur qui indique la présence d'un roulement à billes défectueux sur les bagues intérieure et extérieure.

5-3-8 Cas de défaillance de l'ensemble des composants du roulement

Afin de pouvoir apercevoir l'influence de la défaillance de l'ensemble des composants du roulement sur la qualité du signal de tension obtenue, nous avons appliqué une série de valeurs de couple de frottement C_f allons de [0 : 1.205] N.m, ces couples représentent la présence de l'ensemble des défauts au même temps.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

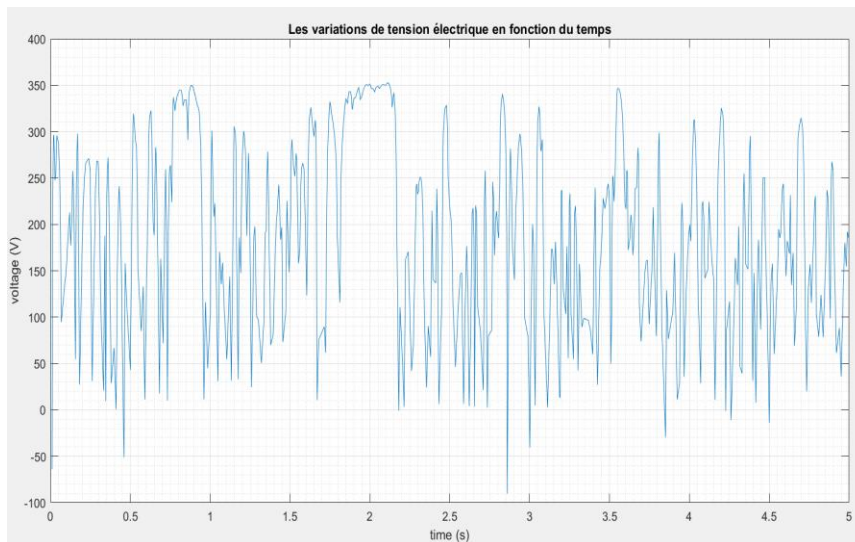


Figure III-21 : Tension du signal en cas de C_f [0 : 1.205]

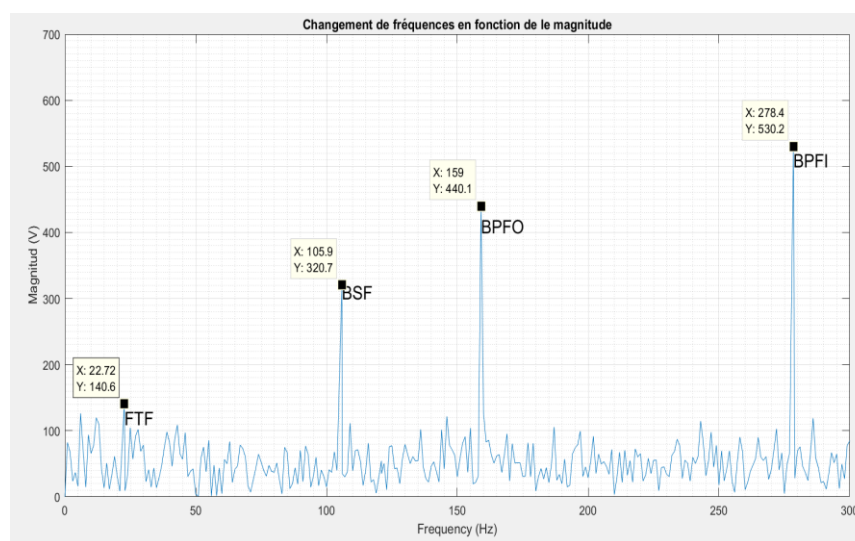


Figure III-22 : Spectre défaut BFS-FTF-BPFI-BPFO

Après simulation de notre système éolien en présence de l'ensemble des défauts causé par

les différents organes du roulement, nous avons obtenu un signal de tension Figure III-21 très déformé qui reflète dans un premier lieu la présence d'un défaut. L'analyse fréquentielle de ce signal par la méthode FFT fait apparaître des amplitudes Figure IV-22 à des fréquences bien distinguées qui expriment la présence de plusieurs défauts. Après comparaison, il se trouve que chaque fréquence trouvée est en cohérence avec une fréquence théorique d'un organe de roulement.

Les fréquences indiquées dans la Figure III-22 représentent les défauts des organes de roulement comme suit :

- Défaut de la bague extérieure, fréquence 278,4 Hz
- Défaut de la bague intérieure à une fréquence de 159 Hz
- Défaut de billes intérieure une fréquence de 105,9 Hz
- Défaut de dysfonctionnement de la cage à une fréquence de 22.72Hz

5-4 Cas de génératrice à 2 paires de pôle

Vitesse de rotation de l'arbre 1220 tour/min

Nous avons les résultats des caractéristiques de fréquence du roulement SKF 6303-2Z.

$$FTF = f_r \times 0.3635 \text{ Hz}$$

$$BSF = f_r \times 2.9572 \text{ Hz}$$

$$BPFO = f_r \times 2.5454 \text{ Hz}$$

$$BPFI = f_r \times 4.4554 \text{ Hz}$$

Fréquences de rotation Hz	Type de fréquence de défaut	Valeur et unité
20.33	<i>BSF</i>	60.12 Hz
	<i>FTF</i>	7.39 Hz
	<i>BPFO</i>	51.75 Hz
	<i>BPFI</i>	90.58 Hz

Tableau III-3 : Fréquence de défaut du roulement

5-4-9 Cas défaut dans Cage et défaut de bille sur la bague interne FTF-BSF

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement, $C_f [0 : 1.113]$ N.m nous avons obtenu les résultats suivants :

La vitesse de rotations modifiées de telle sorte que les valeurs suivantes déterminent le signe de la tension.

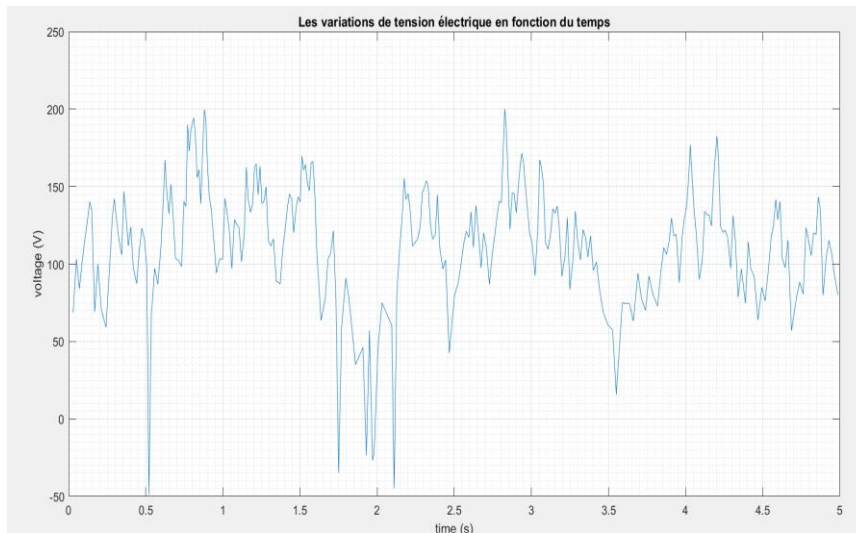


Figure III-23 : Tension du signal en cas de Cf [0 : 1.113]

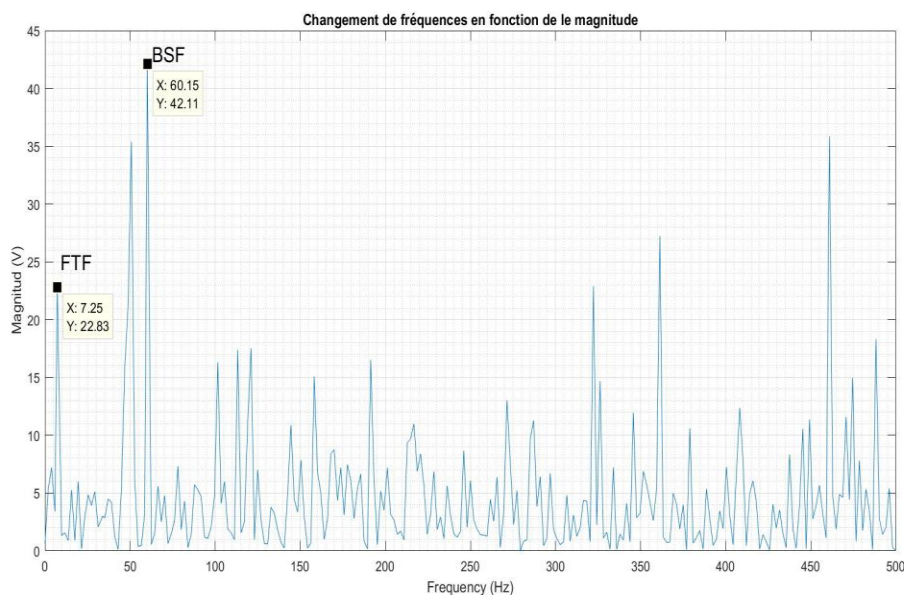


Figure III-24 : Spectre défaut BFS-FTF

Nous avons obtenu la courbe de tension représentée sur la Figure III-23 après avoir fait varier la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine et pris les valeurs maximales en fonction du temps.

Après analyse de la courbe du signal, les fréquences apparaissent dans la Figure III-24 et il y a deux pics indiquant un défaut dans Cage et défaut de bille sur la bague interne ou externe.

La valeur de Magnitude 22.83 V à la fréquence 7,25 Hz.

La valeur de Magnitude 42.11 V à la fréquence 60.15 Hz.

5-4-10 Cas défaut la bague internet externe BPFI-BPFO

Après avoir appliqué une série de valeurs de couple de frottement, $C_f [0 : 1.565]$ N.m

Nous avons obtenu les résultats suivants :

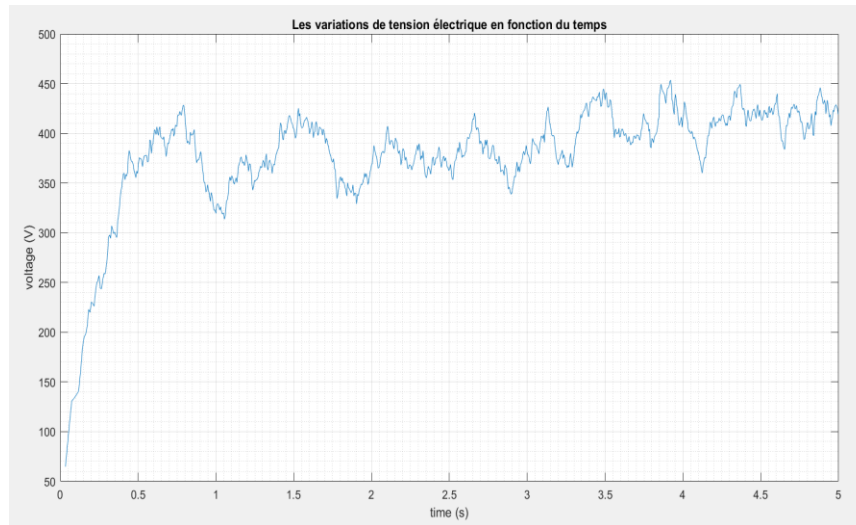


Figure III-25 : Tension du signal en cas de $C_f [0 : 1.565]$

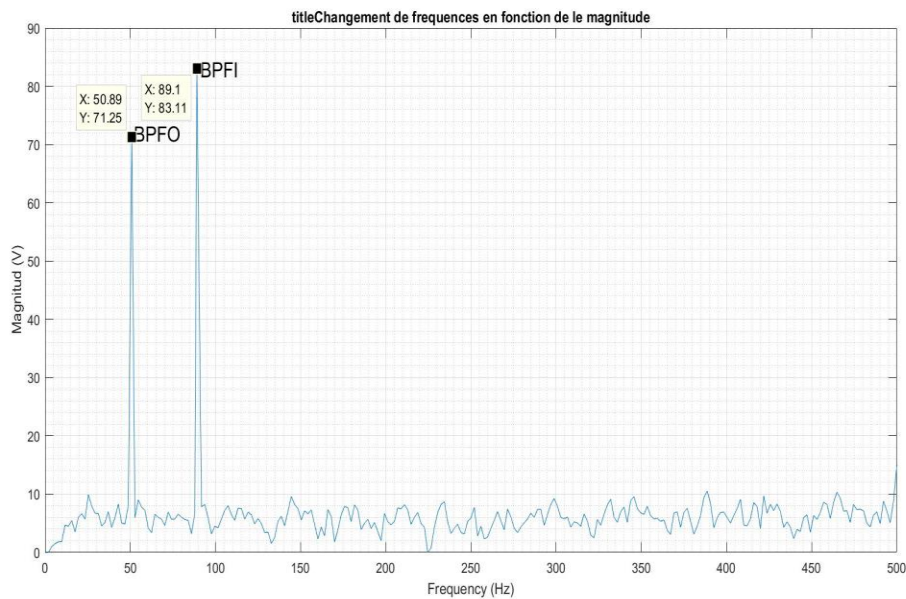


Figure III-26 : Spectre défaut BPFI-BPFO

Après lecture de la courbe, nous avons remarqué la présence de fréquences significatives, car ces fréquences représentent des défaillances de l'anneau intérieur et extérieur dans le cas d'une fréquence de rotation égale à 20,33 Hz.

L'anneau extérieur a une fréquence de 89,1 Hz à 83,11 V.

L'anneau intérieur a une fréquence de 50,89 Hz à 71,25 V.

Après avoir obtenu les résultats numériques de Matlab Simulink, nous constatons que les valeurs sont proches des valeurs calculées.

Nous les résumons dans le tableau suivant :

Vitesse de rotation tour/min	Fréquences de rotation Hz	Fréquence de défaut	Valeur Théorique	Valeur numériques
3745	62.41	<i>BPFO</i>	158.81 Hz	159.40 Hz
		<i>BPFI</i>	278.052 Hz	278.70 Hz
		<i>BSF</i>	105.813 Hz	105.40 Hz
		<i>FTF</i>	22.68 Hz	22.72 Hz
1220	20.33	<i>BPFO</i>	51.75 Hz	50.80 Hz
		<i>BPFI</i>	90.58 Hz	89.11 Hz
		<i>BSF</i>	60.129 Hz	60.15 Hz
		<i>FTF</i>	7.39 Hz	7.25 Hz

Tableau III-4 : Résultats numériques et Théorique des fréquences des roulements

Le tableau III-4 montre que les valeurs obtenues par MATLAB représentent les fréquences du roulement en cas de défaillance de l'un de ses organes.

Il se trouve que ces valeurs sont très similaires aux fréquences théoriques caractérisant l'état du roulement SKF 6303-2Z en cas de défaillance.

III-6 Conclusion

La défaillance d'un roulement entraîne un couple de frottement résistif. Ce défaut affecte l'état de la turbine et provoque par conséquent un dysfonctionnement dans la production d'électricité.

Après avoir obtenu les résultats électriques, nous avons exploité le signal de tension extrait de la génératrice pour diagnostiquer l'état du roulement. Nous avons analysé le signal par une transformée de Fourier FFT et extraire les valeurs de fréquence pour chaque défaut de roulement. Après comparaisant des résultats, les valeurs obtenues par simulation étaient en cohérence avec les valeurs théoriques prédites.

L'analyse fréquentielle du signale de tension nous a permis de faire le diagnostique d'un défaut mécanique au niveau du système éolien. Cependant, le diagnostique par ce procédé peut

être généralisé sur l'ensemble des autres défauts mécanique rotatif où toute une base de donnée de signature de défauts peut être répertories.

Ainsi, ce procédé de diagnostic représente une alternative au procédé baser sur l'analyse de signale de vibration utilisant des capteurs.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail apporte une contribution au domaine des énergies renouvelables, et plus particulièrement à "l'énergie éolienne". L'objectif de cette étude est de détecter et diagnostiquer les défauts dans les pièces mécaniques des dispositifs éoliens, plus précisément dans les roulements.

Le diagnostic dans le cas de notre étude est basé sur l'analyse de la forme du signal de la tension produite où chaque organe défectueux du roulement est classé selon sa fréquence de défaut provoquée, pour obtenir à la fin des signatures de défauts de chaque organe du roulement de l'arbre du rotor du génératrice.

Dans ce travail, nous avons présenté un aperçu général de la maintenance, de ses différents types et de ses applications. Nous avons exploré les mesures préventives pour surveiller l'état de la machine en utilisant des techniques d'analyse telles que l'analyse de l'huile, les vibrations, L'analyse acoustique, La thermographie infrarouge, Le contrôle par ultrasons.

Ensuite, nous avons examiné le concept des énergies renouvelables en mettant l'accent sur l'énergie éolienne, y compris son histoire, ses types et sa composition.

Nous avons également étudié les types de turbines éoliennes utilisées, leurs composants et la manière dont l'énergie est convertie à l'intérieur de la turbine, ainsi que les types de générateurs utilisés. Nous avons abordé les défaillances mécaniques affectant les turbines, en particulier la défaillance des roulements et son impact sur le fonctionnement du système.

Nous avons exploré le principe de conversion de l'énergie éolienne, la modélisation des équations d'énergie, le coefficient de puissance, la limite de Betz et l'impact de la vitesse du vent et de l'angle des pales sur l'efficacité de la turbine. Nous avons étudié l'effet d'une défaillance des roulements sur le système, où cette défaillance génère un couple de frottement qui entrave la rotation de l'arbre du générateur.

Ainsi, nous avons créé un modèle mathématique nous permettant de simuler le système en utilisant Simulink Matlab, en intégrant le couple de frottement résultant d'une défaillance des roulements.

Dans la dernière phase de la simulation, nous avons introduit un couple de frottement correspondant à chaque défaillance résultant d'un organe du roulement. A l'aide de la méthode FFT nous avons exploité le signal de la tension électrique pour extraire les fréquences correspondant à chaque défaillance d'un organe du roulement. Le résultat obtenu des fréquences de défauts sont en cohérences avec les valeurs calculés théoriquement au préalable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette méthode de diagnostic des défauts mécaniques par analyse fréquentielle du signal de tension dans une éolienne représente une alternative très intéressante dans le domaine de la maintenance et la supervision.

En fin, une base de données des signatures de défauts provoqués par d'autres organes mécaniques tournants dans les éoliennes pourra être aussi développée par la même analyse dans des travaux ultérieurs.

Bibliographie

- [1] H. D. e. N. Dahoumane, "La gestion des carrières et sa relation avec la motivation des salariés, cas SONELGAZ," 2021.
- [2] T. Farid, " Diagnostique des Défauts Mécaniques d'une éolienne," 2018.
- [3] a. ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques," Lyon, mars 2009.
- [4] M. F, " «la fonction maintenance»,," Paris, 1996.
- [5] A. Bouleger, "ANALYSE VIBRATOIRE EN," Christian Pachaud, 2003.
- [6] M. G, "Mécanique et industries," in *Brun-picard D.*
- [7] C. R, "«Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à," 2001.
- [8] B. F, "Prédiction et suivi de l'évolution d'un," Rasolofondraibe L, Nice, 2003.
- [9] A. D, "Analyse vibratoire des machines tournantes," 2001.
- [10] <https://dspace.ummo.dz/server/api/core/bitstreams/4b2e0034-bc7c-475d-a385-6fca1d7cd07a/content>.
- [11] M. R. Pate, "Wind and solar power systems: design, analysis, and operation," Taylor & Francis Group, paris, 2006.
- [12] S. N. M. SIDDO, "Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans," Alger.
- [13] Z. O. R. DRARENI, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC," Algérie, 2009.
- [14] B. d. E. Renouvelables, "Publication du Centre de Développement des," Juin 2005.
- [15] KESACO.http://www.espace-eolien.fr/Eolien/Kesaco_tech.htm.
- [16] B. MULTON, "Energies éoliennes".
- [17] A. ABDELLI, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," 2007.

- [18] N. LAVERDURE, "l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," 2005.
- [19] : schumi6.free.fr/TPE_Energie_renouvelables.htm.
- [20] M. BELAIDI, "« Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne," Alger, 2006.
- [21] S. AMEZIANE, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien," Batna, 2009.
- [22] N. CHERFIA, "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens," Algérie, 2010.
- [23] C. A. M. K. D. S. Berrabah, "Etablissement d'un gisement éolien de zone Ouargla en raison d'implantation des aérogénérateurs a petite puissance," 2022.
- [24] H. S.-L. Z.-R./ p. Maouedj, "Expérimentation d'un système hybride (Photovoltaïque-éolien) destiné pour la production d'électricité et l'alimentation d'une maison dans la région d'Adrar," 2014.
- [25] M. Debbache, "De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites.," 2012.
- [26] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," 2002/12/09.
- [27] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique," Paris, 2008/11/20.
- [28] H. L. W. L. J. v. D. B. M. P. V. J. K. S. B. a. F. O. S. Sheng, "Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing," 2011.
- [29] F. TAFININE, "Nouveaux Outils de Traitement du Signal Appliqués en Diagnostique des Systèmes Electro-Energétiques," Sousse Tunisie, 2012.
- [30] B. TRAJIN, "Détection automatique et diagnostique des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques," LYON, 2008.