

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Parcours : Master
Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Diagnostic des défauts dans un système
Éoliens

Préparé par :

BENLAREDJ Seifeddine et MEZIANE Brahim

Soutenu publiquement le : 23 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Dr. AKERMI Nacer	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Dr. BOURGUIG Kada	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Dr. ASRI Aicha	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Dr. SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2023– 2024

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH de nous avoir donné la volonté et le courage nécessaires pour réaliser ce travail.

Ce mémoire de fin d'études a été réalisé au sein du Département de Génie Mécanique de l'Université Ibn Khaldoun, Tiaret.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Madame SLIMANI HALIMA, Maître de conférences "A" à l'Université de Tiaret, pour avoir dirigé ce travail de recherche et partagé avec nous son expérience et ses précieux conseils.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont accepté de faire partie du jury de ce mémoire :

- Monsieur Dr. AKERMI Nacer, Maître de Conférences "A", pour l'honneur qu'il nous fait en présidant ce jury.
- Monsieur Dr. BOUREGUIG Kada, Maître de Conférences "B", et Madame ASRI Aicha, Maître de Conférences "B", pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie des membres du jury.

Enfin, nous remercions sincèrement toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont aidés à mener à bien ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A tous les membres de ma famille

A mes parents, à mes frères et mes sœurs,

A tous mes collègues

Liste de tableau

Chapitre I : Généralité sur la maintenance

Tableau I.1 Les opérations de la maintenance corrective7

Chapitre II : Notions générales sur les systèmes éoliens

Tableau II .1 type et mode défaillance de quelque composant d'éolienne30

Liste de figure

Chapitre I

Figure I.1 : l'organigramme de la maintenance	4
Figure I.2 : la différence entre la maintenance préventive et corrective	5
Figure I.3 : diagramme de Pareto	11
Figure I.4 : Diagramme d'Ishikawa	12
Figure I.5: Présentation graphique de l'AMDEC	12

Chapitre II

Figure II.1 : Évolution et prévisions de la capacité cumulée d'énergie éolienne dans le monde	16
Figure II.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	17
Figure II.3 : Exemples de turbines éoliennes à axe vertical	19
Figure II.4 Turbine éolienne a axe horizontal (HAWT)	20
Figure II.5: Compositions d'une éolienne	21
Figure II.6 : un rotor et les pales d'une éolienne a axe horizontal	22
Figure II.7 : la nacelle d'une éolienne	23
Figure II.8 Générateur électrique	24
Figure II.9 : Anémomètre-girouette	25
Figure II.10 Destruction d'une éolienne par prise de feu	27
Figure II.11 Rupture d'une dent planétaire de la boîte de vitesse	28
Figure II.12 Erosion et Fissure d'une pale	29

Chapitre III

Figure III.1 Système éolien modélisé	33
Figure III.2 Modélisation du vent sous MATLAB-Simulink	35
Figure III.3 Théorie de Betz	35
Figure III.4 Coefficient aérodynamique (Cp)	37
Figure III.5 le modèle mécanique de la turbine	38
Figure III.6 schéma bloc de la turbine éolien	40
Figure III.7 Représentation de la MADA	41
Figure III.8 Modèle de PARK de la MADA	44
Figure III.9 Modèle de simulation d'un système éolien	47

Figure III.10 Profil du vent appliqué à la turbine	48
Figure III.11 La puissance de la turbine	48
Figure III.12 La vitesse de l'arbre mécanique	49
Figure III.13 Le couple électromagnétique	49
Figure III.14 Le courant statoriques	50
Figure III.15 Le courant rotoriques	50
Figure III.16 La puissance de la turbine en présence de défauts	52
Figure III.17 La vitesse de l'arbre mécanique en présence de défauts	53
Figure III.18 Le couple électromagnétique en présence de défauts	53
Figure III.19 Le courant statorique en présence de défauts	54
Figure III.20 Le courant rotorique en présence de défauts	54
Figure III.21 La vitesse de l'arbre mécanique en présence de défauts	55
Figure III.22 Le couple électromagnétique en présence de défauts	55
Figure III.23 Le courant statorique en présence de défauts	56
Figure III.24 Le courant rotorique en présence de défauts	56

Liste des symboles

Indices :

s,r :Stator et Rotor.

A,b,c : l'ordre du système triphasé.

s,r :Stator et Rotor.

d,q : Système biphasé.

Symboles :

C_p : coefficient de puissance.

β : l'angle de calage.

λ : Le ratio de la vitesse.

J_{total} : Moment d'inertie total.

C_{total} : couple total.

Φ : Flux.

Ω : La vitesse de rotation.

ω_s, ω_r :Pulsation d'alimentation statorique et rotorique.

R_s, R_r :Résistances statorique et rotorique.

P_s, P_r : Puissance active statorique et rotorique.

Q_s, Q_r : Puissance réactive statorique et rotorique.

J_{total} : Moment d'inertie total.

J : Moment d'inertie.

C_{total} : couple total.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

C_f : Couple de frottement

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_s :Angle entre l'axe de la première phase de l' enroulement statorique et l'axe d.

θ_r :Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.

L_s et L_r les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

l_s et l_r les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.

M_s et M_r les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine.

M_{sr} : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

$[V_s]$ et $[V_r]$ les tensions statoriques et rotoriques de la machine.

$[I_s]$ et $[I_r]$ les courants statoriques et rotoriques de la machine.

$[\Phi_s]$ et $[\Phi_r]$ les flux statoriques et rotoriques de la machine.

$[R_s]$ et $[R_r]$ les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine.

Sommaire

Introduction générale	I
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur la maintenance

I.1 Introduction	2
I.2 historique de la maintenance	2
I.3 Définition de la maintenance	3
I.4 Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010.....	3
I.5 Les principaux concepts de la maintenance	3
I.6 Les objectifs de la maintenance	3
I.7 L'organigramme de la maintenance	4
I.8 Les type de la maintenance	4
I.8.1 Maintenance préventive.....	5
I.8.1.1 Définition	5
I.8.1.2 Les opérations de la maintenance préventive	5
I.8.1.3 Différents types de maintenance préventive.....	6
I.8.1.3.1 Maintenance préventive systématique.....	6
I.8.1.3.2 Maintenance préventive conditionnelle	6
I.8.2 Maintenance corrective	6
I.8.2.1 Définition	6
I.8.2.2 Les Opérations de la maintenance corrective	6
I.8.2.3 Différents types de maintenance corrective	7
I.8.2.3.1 Maintenance palliative	7
I.8.2.3.2 Maintenance curative.....	7
I.8.3 Maintenance améliorative	7
I.8.3.1 Les opérations de la maintenance améliorative	8
I.9 Les niveaux de maintenance	8
I.10 Les méthodes de diagnostic en maintenance	10
I.10.1 Méthode ABC (Diagramme Pareto)	10
I.10.1.1 Le But de la méthode ABC	10
I.10.2 Méthode de 5m	11
I.10.3 Méthode de L'AMDEC	12

I.10.3.1 Mise en œuvre de la méthode AMDEC	12
I.10.4 Arbre de défaillance (AdD)	13
I.10.4.1 Objectives de l'Arbre de défaillance	13
I.11 Conclusion	13

Chapitre II : Notions générales sur les systèmes éoliens

II.1 Introduction	15
II.2 Description d'énergie éolien	15
II.3 Contexte historique	15
II.4 L'énergie éolienne dans le monde	15
II.5 L'énergie éolienne dans l'Algérie	16
II.6 Principe de conversion de l'énergie éolienne	17
II.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	17
II.7.1 Les avantages	17
II.7.2 Les inconvénients	18
II.8 Les différents types d'éoliennes	18
II.8.1 Turbines éoliennes à axe vertical (VAWT)	18
II.8.1.1 Les Avantages de la structure à axe vertical	19
II.8.1.2 Les Inconvénients de la structure à axe vertical	19
II.8.2 Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT)	20
II.8.2.1 Les Avantages de la structure à axe horizontal	20
II.8.2.2 Les Inconvénients de la structure à axe horizontal.....	20
II.9 Les composantes d'une éolienne à axe horizontal	21
II.9.1 Les fondations	21
II.9.2 Le rotor	22
II.9.3 Le système de contrôle.....	22
II.9.4 Les systèmes électriques	22
II.9.5 Le tour	23
II.9.6 La nacelle	23
II.9.7 Le multiplicateur de vitesse.....	23
II.9.8 Le générateur électrique	23
II.9.8.1 Description de la MADA	24
II.9.8.2 Principe de fonctionnement.....	24
II.9.9 Les pales	25

II.9.10 l'anémomètre	25
II.9.11 La girouette	25
II.10 Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal	26
II.11 Les défauts d'une éolienne à axe horizontal	27
II.12 Les défauts des composants critiques des éoliennes	27
II.12.1 Défauts hydraulique	27
II.12.2 Défauts de la boîte de vitesses (multiplicateur)	28
II.12.3 Défauts des pales	29
II.12.4 Défauts des générateurs	29
II.12.5 Les défauts des autres composants	30
II.13 Conclusion	31

Chapitre III : Diagnostic des défauts dans un système éolien à axe horizontal

III.1 Introduction	33
III.2 Modélisation des Systèmes Éoliens	33
III.2.1 Hypothèses Simplificatrices	34
III.2.2 Modélisation Aérodynamique	34
III.2.3 Modélisation mécanique	38
III.2.4 Modélisation électrique	40
III.2.4.1 Hypothèses simplificatrices	41
III.2.4.2 Transformation de Park	44
III.2.4.2.1 Application de la transformer de Park	45
III.3 Partie de simulation	46
III.3.1 Présentation du modèle	47
III.3.2 Simulation du vent	47
III.3.3 Les résultats de simulation à l'état sain	48
III.3.4 L'interprétation ont l'état sain	51
III.3.5 Les résultats de simulation en présence des défauts	52
III.3.6 L'interprétation en présence des défauts	57
III.4 Conclusion	59
Conclusion générale	60

Résumé :

Ce mémoire de master explore le diagnostic de défaut dans les systèmes éoliens pour assurer l'efficacité et le bon fonctionnement de ce système. L'étude se concentre sur la détection précoce des anomalies mécaniques et électriques en utilisant des approches basées sur des simulations et des analyses de données. Un modèle de simulation est élaboré pour représenter différentes défaillances potentielles, telles que les problèmes de la boîte de vitesse et les pannes électriques dans les générateurs. Les résultats obtenus sont interprétés pour identifier des signatures caractéristiques des défauts. L'analyse montre que les techniques de diagnostic utilisées peuvent améliorer la détection et la correction des défaillances, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance des parcs éoliens.

Mots clés : Turbine éoliens, Machine asynchrone a double alimentation (MADA), diagnostic, défauts, modélisation

Abstract:

This master's thesis explores fault diagnosis in wind turbine systems to ensure the efficiency and proper functioning of these systems. The study focuses on the early detection of mechanical and electrical anomalies using approaches based on simulations and data analysis. A simulation model is developed to represent various potential failures, such as gearbox problems and electrical faults in generators. The results obtained are interpreted to identify characteristic fault signatures. The analysis shows that the diagnostic techniques used can improve the detection and correction of failures, thereby reducing downtime and maintenance costs for wind farms.

Keywords: Wind turbine, Doubly fed induction generator (DFIG), diagnostics, faults, modeling.

المخلص :

تستكشف هذه الرسالة الجامعية (الماستر) تشخيص الأعطال في أنظمة توربينات الرياح لضمان الكفاءة والأداء الجيد لهذه الأنظمة. تركز الدراسة على الكشف المبكر عن الاعطاب الميكانيكية والكهربائية باستخدام مناهج تعتمد على المحاكاة وتحليل البيانات. تم تطوير نموذج محاكاة لتمثيل أنواع مختلفة من الأعطال المحتملة، مثل مشكلات علبة التروس والأعطال الكهربائية في المولدات. يتم تفسير النتائج المحصلة لتحديد الأنماط المميزة للأعطال. تُظهر التحليلات أن التقنيات التشخيصية المستخدمة يمكن أن تحسن من الكشف عن الأعطال وتصحيحها، مما يقلل من فترات التوقف عن العمل وتكاليف الصيانة لمزارع الرياح .

الكلمات المفتاحية: توربين الرياح، المولد الحثي ذو التغذية المزدوجة، التشخيص، الأعطال، النمذجة.

Introduction générale

Dans un monde confronté aux défis environnementaux et énergétiques, l'énergie éolienne se distingue comme une solution prometteuse pour la production d'électricité durable et propre. L'exploitation de l'énergie cinétique du vent, convertie en électricité par les systèmes éoliens, représente une alternative cruciale aux sources d'énergie fossiles. Ces systèmes éoliens, largement utilisés pour leur efficacité et leur faible impact environnemental, nécessitent une maintenance rigoureuse pour garantir leur fonctionnement optimal et prolonger leur durée de vie. Le diagnostic des défauts dans les systèmes éoliens devient ainsi un enjeu central pour optimiser la production d'énergie et minimiser les coûts de maintenance [1].

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude des systèmes éoliens, plus précisément des éoliennes à axe horizontal, qui sont les plus couramment utilisés dans l'industrie de l'énergie éolienne.

Les systèmes éoliens, peuvent avoir des problèmes mécaniques et électriques, causant des pannes et des coûts élevés de réparation. Il est important de détecter et réparer ces problèmes rapidement pour garantir un bon fonctionnement des éoliennes. Ce mémoire est de faire un diagnostic pour détecter les défauts dans les systèmes éoliens à axe horizontal, afin de minimiser les interruptions et d'optimiser les performances.

L'objectif de ce mémoire est de développer un diagnostic des défauts dans les systèmes éoliens à axe horizontal. La modélisation d'un système éolien pour simuler les conditions de fonctionnement normal et défectueux, et l'application de ce modèle pour identifier et interpréter les défauts possibles.

Pour atteindre l'objectif de ce mémoire, nous utiliserons une approche en trois étapes principales. Tout d'abord, nous procéderons à la modélisation des systèmes éoliens, en développant des modèles aérodynamiques, mécaniques et électriques pour simuler les conditions de fonctionnement des éoliennes et identifier les signatures caractéristiques des défauts. Ensuite, nous utiliserons un logiciel de simulation pour recréer les conditions normales et défectueuses d'une éolienne, ce qui permettra de comparer les résultats obtenus dans des états de fonctionnement sains et en présence de défauts. Cette comparaison des résultats nous permettra d'interpréter les différences observées dans chaque cas. La structure de ce mémoire se divise en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect clé du sujet :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble de la maintenance industrielle en abordant ses concepts généraux et ses diverses approches.

Le deuxième chapitre se concentre sur les notions générales des systèmes éoliens. Nous commencerons par définir ce qu'est une éolienne et décrire les différents types d'éoliennes, leurs principaux composants et leurs principes de fonctionnement. Ensuite, ce chapitre abordera les défauts susceptibles de se produire dans les composants critiques des éoliennes, tels que les problèmes mécaniques liés à l'usure des roulements ou les défaillances électriques des générateurs.

Le troisième chapitre est dédié au diagnostic des défauts dans les systèmes éoliens. Nous présenterons une modélisation du système éolien afin de faire un diagnostic des défauts dans les éoliennes, en mettant un accent particulier sur les méthodes de simulation et d'analyse des signaux.

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

*Chapitre I: Généralité sur la
maintenance*

I.1 Introduction

Au fil des années, la fonction de maintenance s'efforce de trouver un équilibre entre la nécessité d'utiliser des équipements modernes et celle de maintenir des coûts d'exploitation bas. Cette fonction vise à garantir une disponibilité optimale des installations de production et de leurs annexes, en minimisant économiquement les temps d'arrêt [2].

Longtemps considérée comme une activité secondaire et inévitablement coûteuse, la maintenance est généralement associée à la réparation et au dépannage des équipements soumis à l'usure et au vieillissement. Cependant, l'évolution et la complexité croissantes des systèmes de production, ainsi que le besoin de produire rapidement et efficacement, ont conduit les industriels à structurer et organiser les ateliers d'entretien. Ils ont également introduit de nouveaux concepts organisationnels et de nouvelles méthodes d'intervention sur les structures de production des produits manufacturés [3] [4].

Ce chapitre expose la définition et les diverses catégories de maintenance. Il aborde également les différents niveaux de maintenance ainsi que les méthodes de diagnostic des défauts.

I.2 Historique de la maintenance

Entre les années 1960 et 1980, la maintenance industrielle était largement sous-estimée et considérée comme une activité secondaire de faible importance, principalement sollicitée en cas de panne de machine. À cette époque, ses responsabilités se limitaient essentiellement à l'électricité, la mécanique et la lubrification, sans intégrer les concepts de planification et de prévention, ce qui donnait à la maintenance une connotation obsolète. Les interventions se limitaient souvent à la lubrification et aux patrouilles de surveillance, avec des stratégies centrées sur le dépannage et les réparations majeures [5].

Après la fin de la guerre, la nécessité de reconstruire les infrastructures industrielles et les économies nationales a conduit à une intensification des cadences de production, alors que le marché devenait de plus en plus compétitif. L'utilisation accrue des machines a entraîné une augmentation des pannes, ce qui a provoqué une hausse des coûts liés aux arrêts de production et aux réparations. Face à ces nouvelles contraintes, les entreprises industrielles ont été obligées d'améliorer leurs pratiques de maintenance [2].

I.3 Définition de la maintenance

La maintenance industrielle englobe toutes les actions entreprises pour maintenir ou restaurer un équipement, un appareil, un véhicule, etc., à un niveau spécifique d'état ou pour lui redonner des performances conformes à des critères préétablis [6].

I.4 Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

I.5 Les principaux concepts de la maintenance

- **Maintenir** : contient la notion de « prévention » sur un système en fonctionnement, c'est choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'usage du matériel, suivant sa criticité économique, afin d'optimiser le coût global de possession, c'est maîtriser.
- **Rétablir** : contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.
- **État spécifié ou service déterminé** : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- **Coût optimal** : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité [7].

I.6 Les objectifs de la maintenance

De manière globale, l'objectif premier de la maintenance est de garantir la disponibilité maximale des équipements de production tout en optimisant les coûts. Les principaux objectifs de la fonction maintenance sont les suivants [7] :

- Maximiser l'efficacité opérationnelle : Améliorer la performance des équipements pour augmenter la productivité et réduire les temps d'arrêt non planifiés.
- Réduire les coûts : Minimiser les coûts de maintenance tout en maintenant des niveaux de performance acceptables.
- Assurer la sécurité : Protéger les travailleurs et les installations en maintenant des conditions de travail sûres et conformes aux normes de sécurité.

- Assurer la disponibilité des équipements : Garantir que les équipements sont opérationnels lorsque nécessaire pour éviter les interruptions de production.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes) [8].

En résumé, la maintenance industrielle vise à garantir la disponibilité, la fiabilité, l'efficacité, la rentabilité et la sécurité des équipements et des installations industrielles.

I.7 L'organigramme de la maintenance

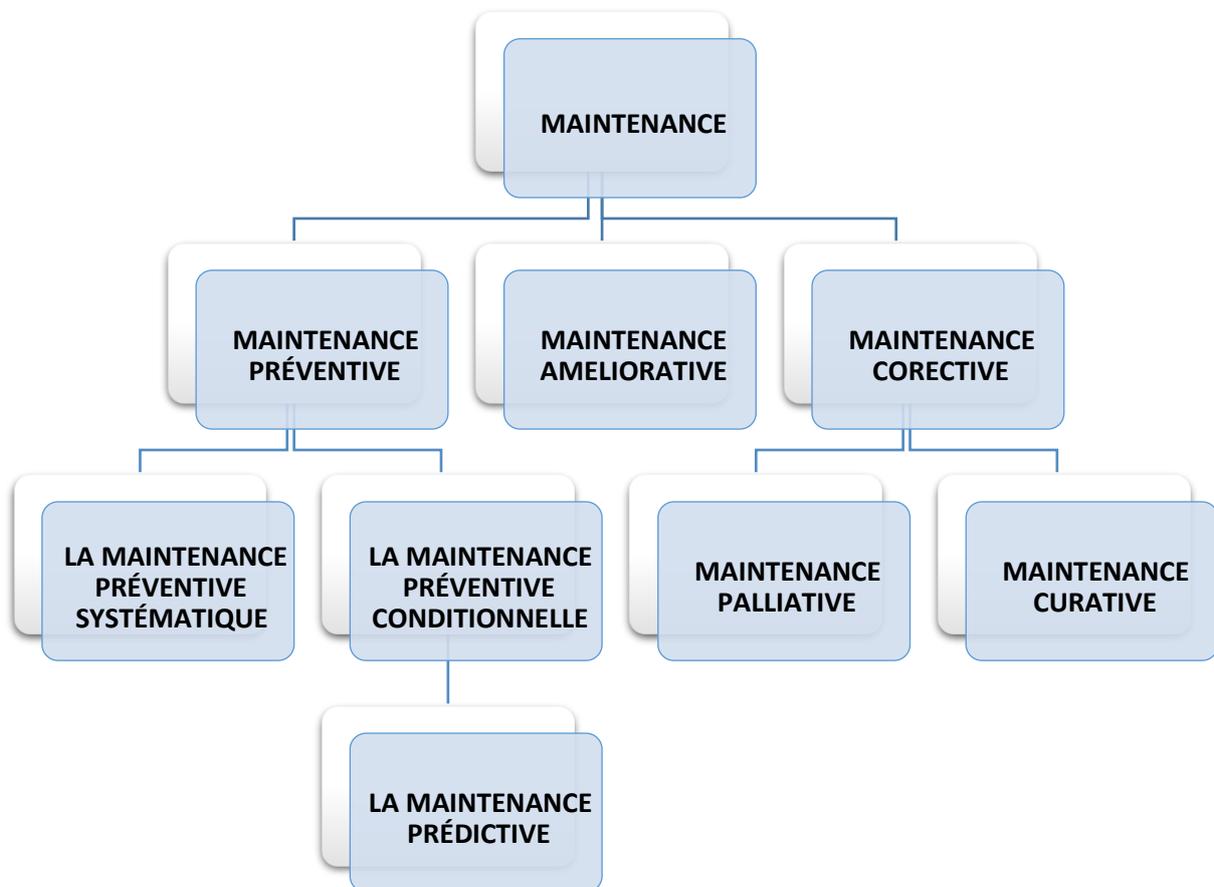


Figure I.1 : l'organigramme de la maintenance [7].

I.8 Les type de la maintenance

En fonction du moment où l'activité de maintenance est effectuée par rapport à la défaillance d'un bien (la cessation de sa capacité à remplir sa fonction prévue, caractérisant une panne), on distingue deux grandes catégories de maintenance :

- La maintenance préventive effectuée avant la défaillance du bien.
- La maintenance corrective effectuée après la défaillance du bien [2].

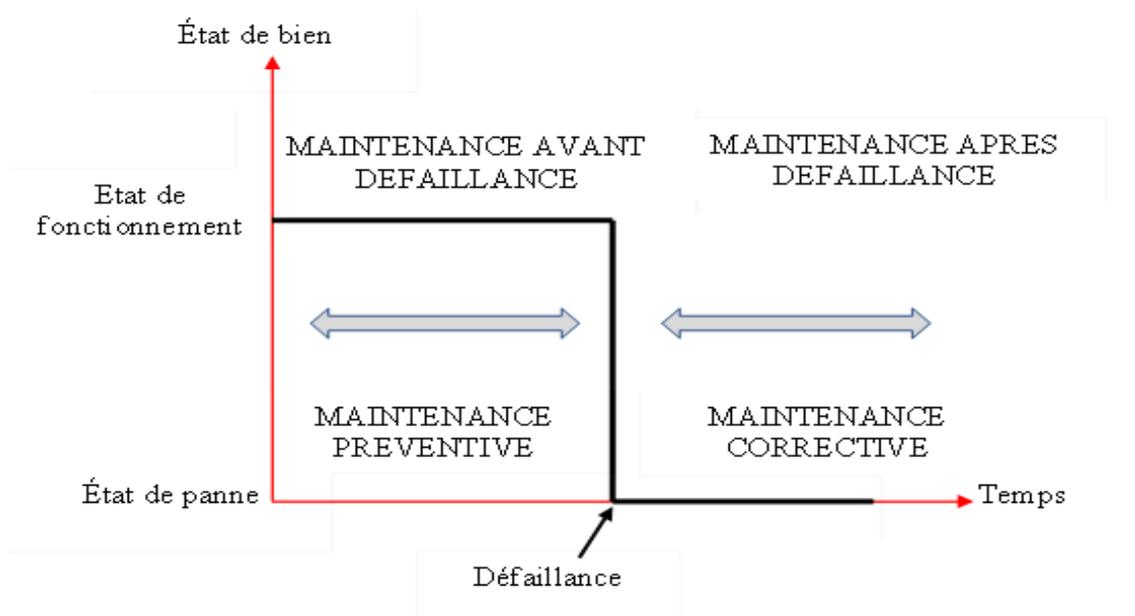


Figure I.2 : la différence entre la maintenance préventive et corrective [2].

I.8.1 Maintenance préventive

I.8.1.1 Définition :

La maintenance préventive est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits, elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [9].

I.8.1.2 Les opérations de la maintenance préventive

- **Inspection :** Le contrôle de conformité s'effectue en mesurant, observant, testant ou calibrant les aspects essentiels d'un bien. Il permet de détecter les anomalies et d'effectuer des ajustements simples qui ne requièrent pas d'outils spécifiques ou l'arrêt de la production ou des équipements, sans nécessiter de démontage [2].
- **Contrôle :** vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.
- **Visite :** L'inspection peut être exhaustive (visite générale) ou partielle (visite limitée), impliquant un examen détaillé préétabli des divers composants du bien. Elle peut nécessiter des opérations de maintenance de premier et deuxième niveau et éventuellement conduire à une maintenance corrective [7].

I.8.1.3 Différents types de maintenance préventive

I.8.1.3.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un échéancier fixé sur la base de la durée de vie minimale des composants mécaniques ou électriques d'une machine. En d'autres termes, les interventions sont effectuées à des dates planifiées à l'avance, avec une périodicité dépendant de différents facteurs d'usures des matériels [10].

I.8.1.3.2 Maintenance préventive conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. La maintenance conditionnelle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable avec des capteurs fiables [11].

I.8.2 Maintenance corrective

I.8.2.1 Définition

Selon la norme AFNOR (norme X60-010), la maintenance corrective est définie comme une intervention réalisée après la survenue d'une défaillance. Elle englobe toutes les actions entreprises après la défaillance pour rétablir le bon fonctionnement d'un équipement ou d'un composant [11].

I.8.2.2 Les Opérations de la maintenance corrective

Suite à la survenue d'une défaillance, le technicien de maintenance doit entreprendre plusieurs actions, dont les descriptions sont fournies ci-dessous. Ces actions sont décomposées en étapes qui sont répertoriées dans le Tableau I.1 [7].

Tableau I.1 : les opérations de la maintenance corrective

L'ordre	Opération
-Test	Prendre les mesures de l'état actuel système affecté et les comparé à une référence.
-Détection	Action de déceler l'apparition d'une défaillance.
-Localisation	Trouver les éléments ou les composants défaillant.
-Diagnostic	Identification et analyse des causes de la défaillance.
-Dépannage	Réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
-Contrôle	S'assuré que le système est en bon fonctionnement après l'intervention.
-Amélioration éventuelle	C'est à dire éviter la réapparition de la panne.
-Historique	Enregistré ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure en cas ou la même panne apparaisse une autre fois.

I.8.2.3 Différents types de maintenance corrective

I.8.2.3.1 Maintenance palliative

Basé sur l'opération de dépannage, parce que la défaillance est partielle. C'est une action de maintenance qui permet de remettre un équipement dans un état provisoire de fonctionnement en vue d'accomplir la fonction requise.

I.8.2.3.2 Maintenance curative

Basé sur l'opération de réparation, parce que la défaillance est totale. Elle regroupe les activités de maintenance corrective qui permettent de remettre définitivement le système en état de marche, après détection de défaillance [2].

I.8.3 Maintenance améliorative

La maintenance amélioratrice a pour but d'optimiser le rendement des équipements industriels par la maîtrise totale des performances. Elle désigne un ensemble de mesures techniques, administrative et de gestion visant à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien en modifiant la conception d'origine mais sans changer sa fonction requise [12].

I.8.3.1 Les opérations de la maintenance améliorative

➤ **La rénovation :**

Une inspection exhaustive est effectuée sur tous les composants, suivie d'une reprise dimensionnelle complète ou du remplacement des pièces déformées. Les caractéristiques sont vérifiées et les pièces ou sous-ensembles défectueux sont éventuellement réparés. Les éléments en bon état sont préservés. Ainsi, la rénovation émerge comme une des options suite à une révision générale dans le strict respect de sa définition.

➤ **La reconstruction :**

La restauration est effectuée selon les spécifications précisées dans le cahier des charges initial, lequel requiert le remplacement des pièces essentielles par des pièces d'origine ou des équivalents neufs. Cette reconstruction peut être accompagnée d'une modernisation ou de modifications. Ces ajustements peuvent toucher divers aspects tels que la maintenance, la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, et autres.

➤ **La modernisation :**

Substitution des équipements, accessoires et appareils, voire du logiciel, afin d'intégrer des avancées techniques inexistantes sur le bien original, améliorant ainsi son utilité. Cette démarche peut être entreprise aussi bien lors d'une rénovation que d'une reconstruction. Dans le cas d'un bien durable, la rénovation ou la reconstruction peut inclure le remplacement standard de certains de ses sous-ensembles ou organes [7].

I.9 Les niveaux de maintenance

Les interventions de maintenance peuvent être classées par ordre croissant de complexité (Selon la norme X60-000 de 2002) :

➤ **Niveau 1 :**

Le niveau 1 de maintenance Afnor correspond à des réglages de base, simples à réaliser.

Une opération de niveau 1 ne nécessite ni l'ouverture ni le démontage de la machine. Elle peut être réalisée par un salarié de l'entreprise non spécialisé dans la maintenance. L'opération ne nécessite que peu de pièces et les risques associés sont réduits au minimum. L'opérateur dispose d'une notice explicative ou d'une documentation suffisante [13].

Exemples d'actions de maintenance de Niveau 1 :

- Relevé d'un compteur.
- Test d'un voyant lumineux.
- Remplacement d'une ampoule ou d'un fusible.
- Remise à zéro d'un automate [14].

➤ **Niveau 2 :**

Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes [15].

Exemples d'actions de maintenance de Niveau 2 :

- Contrôle de performances.
- Vérification d'un capteur.
- Vérification d'un paramétrage.
- Changement d'un filtre nécessitant un démontage partiel [13].

➤ **Niveau 3 :**

Désigne des interventions complexes qui doivent prendre en compte l'équipement dans sa globalité et être réalisées par des techniciens spécialisés [2].

Exemples d'actions de maintenance de Niveau 3 :

- Vérification combustion d'une chaudière.
- Opération qui nécessite l'usage d'un instrument de mesure.
- Changement d'une pompe.
- Echange d'un composant [14].

➤ **Niveau 4 :**

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés [15]. Ce sont des actions dites de grande importance qui nécessitent une expertise particulière.

Exemples d'actions de maintenance de Niveau 4 :

- Réparation spéciale.
- Vérification d'un appareil de mesure.
- Analyse de vibration ou d'un niveau de chaleur.
- Révision d'une pompe [14].

➤ **Niveau 5 :**

Le niveau 5 de maintenance Afnor concerne des opérations complexes multiples.

Ces opérations sont généralement réalisées par le constructeur lui-même, ou par un prestataire expert agréé. L'outillage nécessaire est plutôt lourd et doit passer de nombreux contrôles de conformité.

Exemples d'actions de maintenance de Niveau 5 :

- Mise en conformité d'une machine pour respecter une nouvelle norme ou une nouvelle réglementation.
- Réparation ou reconstruction complète d'une machine [13].

I.10 Les méthodes de diagnostic en maintenance

Des nombreuses méthodes ont été développées pour identifier et diagnostiquer la (ou les) cause(s), racine(s) et entreprendre des actions correctives. Cette partie montre les bénéfices d'une stratégie de maintenance pour maintenir les niveaux de sécurité et réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. Le diagnostic étape préliminaire à la bonne exécution d'une maintenance tant préventive que corrective. Le diagnostic d'un matériel de production constitue dès lors une méthode permettant de déterminer si un outil est défaillant ou non ; mais aussi d'identifier l'origine de la panne [16].

I.10.1 Méthode ABC (Diagramme Pareto)

La méthode ABC peut se définir de la façon suivante : les objets de coûts (produits, clients...) consomment des activités qui, elles-mêmes, consomment des ressources. Cette méthode permet d'analyser les coûts par activité [17].

I.10.1.1 Le But de la méthode ABC

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut déceler celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en terme de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire. La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc..), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma, on observe trois zones :

1. **Zone A** : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ;
2. **Zone B** : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
3. **Zone C** : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global [18].

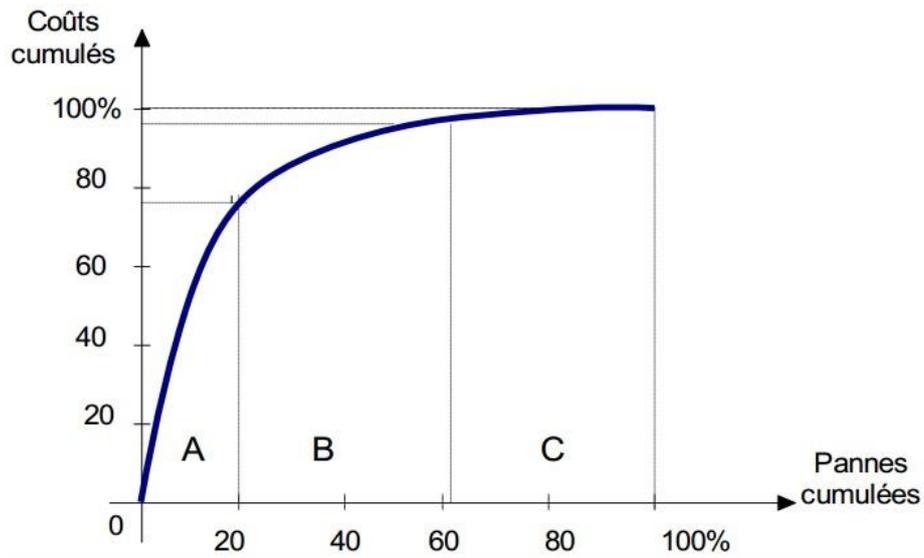


Figure I.3 : diagramme de pareto [18].

I.10.2 Méthode de 5m

Développée par le professeur Kaoru Ishikawa dans les années 1950. La méthode des 5M, également connue sous le nom de diagramme d'Ishikawa ou diagramme en arête de poisson, est un outil visuel simple et efficace utilisé pour identifier les causes d'un problème. Elle permet de décomposer un problème complexe en ses causes primaires et secondaires, facilitant ainsi la compréhension et la résolution du problème. Souvent regroupées en cinq catégories :

- **Main-d'œuvre** : Les compétences, l'expérience, la formation et la motivation des personnes impliquées dans le processus.
- **Matière (Matières premières)**: La qualité, la fiabilité et la conformité des matériaux utilisés.
- **Matériel**: L'état, la performance et la maintenance des machines et équipements.
- **Milieu (Milieu de travail)**: Les conditions environnementales, telles que la température, l'éclairage, le bruit et la sécurité.
- **Méthodes (Méthodes de travail)**: Les procédures, les instructions, les standards et les outils utilisés [19].

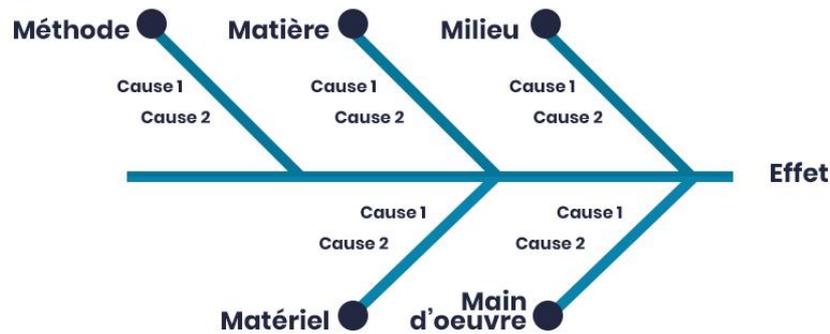


Figure I.4 : Diagramme d'Ishikawa [20].

I.10.3 Méthode de L'AMDEC

Le mot AMDEC signifie l'Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité. Est une méthode d'analyse préventive de la sûreté de fonctionnement des produits et des équipements. Ce principe de la prévention repose sur le recensement systématique et l'évaluation des risques potentiels d'erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d'un produit [21].

Date de l'analyse :	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Phase de fonctionnement	page :				
	Machine :		Organe :				Nom :				
Pièce/Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action Corrective	
						F	G	N	C		

Figure I.5: Présentation graphique de l'AMDEC [21].

I.10.3.1 Mise en œuvre de la méthode AMDEC

Cette mise en œuvre comporte :

- **Constituer** un groupe de travail pluridisciplinaire (production, maintenance),
- **Définir** les limites de l'étude (objectif, délais, système),
- **Présenter** le système, son environnement et découper celui-ci en sous-ensembles fonctionnels.
- **Recenser** les modes de défaillances.

- **Rechercher** les causes de défaillances (ISHIKAWA).
- **Etudier** les effets de chaque défaillance et les conséquences les plus probables sur le système.
- **Recenser** les moyens de détection existants [18].

I.10.4 Arbre de défaillance (AdD)

Un arbre de défaillances (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statique [21].

C'est un diagramme déductif qui va de l'effet vers la cause et qui a pour objet de rechercher toutes les combinaisons de défaillances élémentaires (primaires) pouvant déboucher vers une panne [18].

I.10.4.1 Objectives de l'Arbre de défaillance

L'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches.

L'analyse des arbres de défaillance a des objectives dans la prise de décision, énumérés ci-dessous :

- Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur,
- Empêcher l'événement le plus important car il s'agit d'un outil pro-actif.
- Suivre les performances du système.
- Minimiser et optimiser les ressources de danger.
- Aider à la conception du système.
- Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic [21].

I.11 Conclusion

Ce chapitre offre une vue d'ensemble des principes fondamentaux de la maintenance, en soulignant l'importance de la maintenance préventive et corrective pour garantir la performance et la longévité des équipements. Il examine les différentes approches et stratégies de maintenance, ainsi que les outils de diagnostic utilisés pour détecter et prévenir les défaillances. Le chapitre suivant présentera une vue d'ensemble des systèmes éoliens, en abordant leurs avantages, leurs faiblesses et les défaillances potentielles qui peuvent survenir.

*Chapitre II : Notions générales
sur les systèmes éoliens*

II.1 Introduction

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans leur site isolé est assez bien venté. De tels systèmes présentent plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité [22].

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'énergie éolienne de manière générale en décrivant les différents types d'éoliennes, leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Ensuite, nous aborderons les composants et les défaillances qui constituent ce système.

II.2 Description d'énergie éolien

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable. Elle exploite l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique et puis en énergie électrique à l'aide d'un aérogénérateur (éolienne).

II.3 Contexte historique

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives...), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...) [23].

En France, contrairement à l'impression actuelle, les recherches progressaient activement dans les années 1920, avec des développements tels qu'une éolienne bipale de 20 m de diamètre par la compagnie CEM. Cette dynamique s'est poursuivie dans les années 1950-60, marquées par l'introduction de technologies telles que les éoliennes tripales de 30 m avec une génératrice synchrone de 800 kW à Nogent-le-Roi, ainsi que les éoliennes bipales de 35 m équipées de génératrices asynchrones de 1 MW à Saint-Rémy-des-Landes [24] [22].

L'histoire de l'énergie éolienne a été largement influencée par des facteurs externes, tels que l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité et la crise énergétique de 1973. Plus récemment, les accords de Kyoto devraient être un moteur principal du développement des éoliennes [22].

II.4 L'énergie éolienne dans le monde

Pendant de nombreuses années, l'Europe a été le principal moteur du développement de l'énergie éolienne, mais elle a désormais été dépassée par des acteurs tels que la Chine et les États-Unis, qui dominent actuellement le marché mondial. Cependant, l'Europe maintient sa position de leader en matière de technologie et d'installation d'éoliennes en mer. On prévoit une

augmentation significative de la capacité mondiale d'énergie éolienne dans les années à venir, avec 740 GW prévus d'ici 2021. Il convient de noter que l'énergie éolienne terrestre devrait continuer à représenter la grande majorité de cette capacité nouvelle, avec 95% prévus au cours des quatre prochaines années.

La Figure (II.1) représente l'évolution et prévisions de la capacité cumulée d'énergie éolienne dans le monde [25].

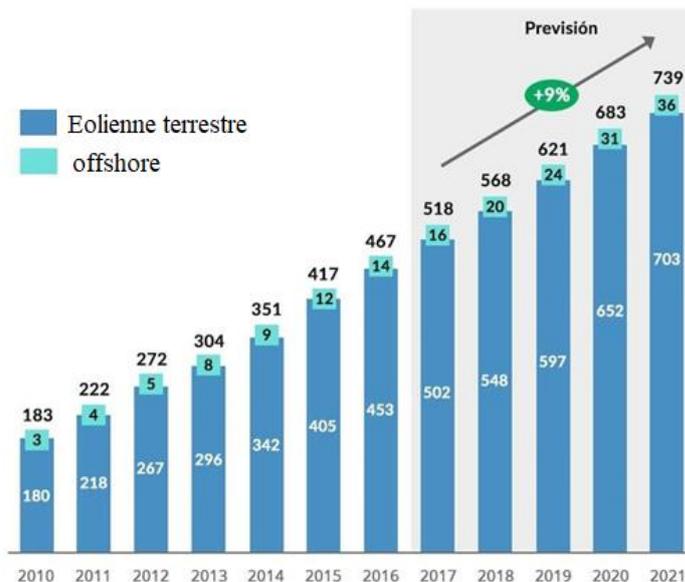


Figure II.1 : Évolution et prévisions de la capacité cumulée d'énergie éolienne dans le monde.

II.5 L'énergie éolienne dans l'Algérie

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [24].

L'Algérie a engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, Prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité des sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme [26].

L'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays.

II.6 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, communément connu sous le nom d'éolienne, est un dispositif conçu pour convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique à travers une génératrice. Le processus de conversion éolienne implique une gamme variée de domaines techniques, comprenant des aspects aérodynamiques, mécaniques, et électriques [22]. La figure (II.2) illustre la conception de conversion l'énergie cinétique en énergie électrique [27].

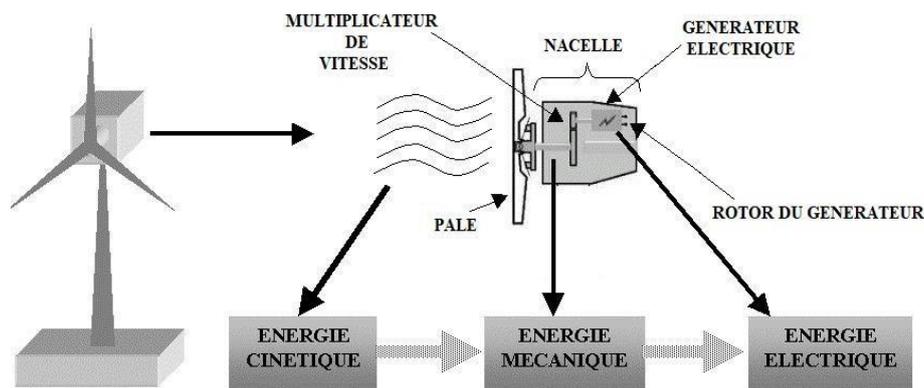


Figure II.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

II.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ne deviennent pas un frein à son développement [22].

II.7.1 Les avantages

- Naturelle, renouvelable et durable, étant produite par la force du vent.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque de pénurie, Contrairement aux énergies reposant sur des combustibles (comme le nucléaire ou le thermique).
- Les éoliennes nécessitent peu d'espace au sol pour produire de l'énergie.
- L'énergie éolienne est plus efficace en hiver, lorsque le vent est généralement plus fort, ce qui est avantageux pour répondre à la demande énergétique accrue pendant cette période.
- Le développement des projets éoliens entraîne une diminution des coûts grâce à des économies d'échelle.

- Du point de vue écologique: L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement car l'exploitation de cette énergie évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 million de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17.5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont principaux responsables des pluies acides [28] [29].

II.7.2 Les inconvénients

- Les vents sont difficiles à anticiper, ce qui complique la prévision de la production d'énergie.
- Une éolienne a besoin d'un vent minimum pour démarrer et s'arrête de fonctionner en cas de vents supérieurs à 90 km/h.
- Le bruit causé par les éoliennes est un inconvénient majeur souvent mis en avant par les riverains.
- La construction d'une éolienne est coûteuse en raison de la nécessité d'intervention d'engins spéciaux et des coûts de génie civil associés [29].
- Le démontage d'une éolienne est complexe et difficile en raison de la hauteur des mâts.

II.8 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se distinguent principalement par leur conception et leur orientation par rapport au vent. Voici une description des différents types d'éoliennes, classées en deux grandes catégories : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical [22].

II.8.1 Turbines éoliennes à axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical est le premier type ou modèle de turbines utilisées pour exploiter L'énergie cinétique du vent afin de produire l'énergie électrique où ces pales tournent autour de son rotor vertical [30].

Ce type d'éolienne se distingue par un axe de rotation vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Cette configuration impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, qui sont moins forts qu'en hauteur car freinés par le relief.

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production [31]. (La Figure II.3) montrer trois modèles d'éoliennes à axe vertical [32].

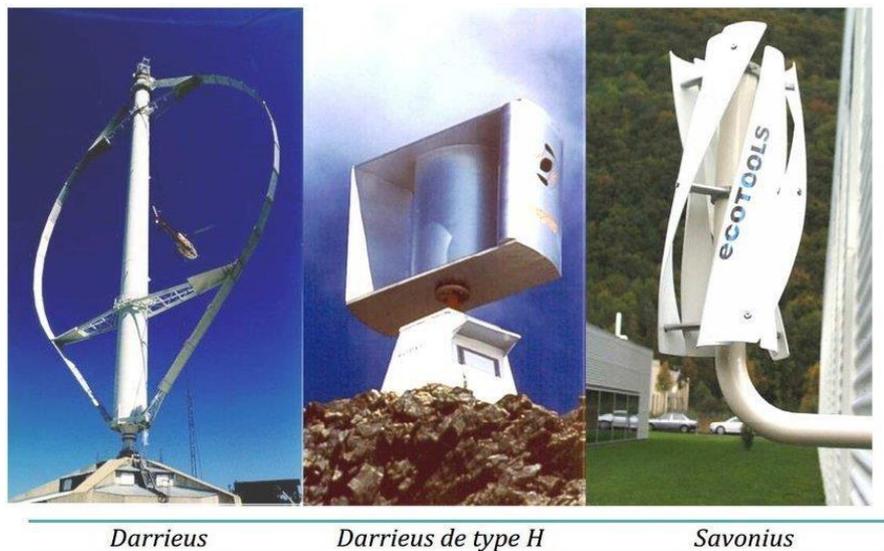


Figure II.3 : Exemples de turbines éoliennes à axe vertical

II.8.1.1 Les Avantages de la structure à axe vertical

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

II.8.1.2 Les Inconvénients de la structure à axe vertical

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [33].

II.8.2 Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Cette configuration est largement répandue en raison de son empreinte au sol réduite et de son efficacité énergétique élevée. (La Figure II.4) représente éolienne a axe horizontal [34].



Figure II.4 Turbine éolienne à axe horizontal (HAWT)

Ces éoliennes s'inspirent de la technologie ancestrale des moulins à vent et sont équipées de pales aérodynamiques profilées, similaires aux ailes d'avion.

Contrairement à l'utilisation de la portance pour maintenir un avion en vol, ces pales génèrent un couple moteur qui entraîne la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie généralement entre 1 et 3, le rotor à trois pales étant le plus courant en raison de son équilibre entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation.

II.8.2.1 Les Avantages de la structure à axe horizontal

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Ces éoliennes captent le vent en hauteur, loin du sol, où le vent est moins freiné par le relief. Avec une hélice de taille identique.
- Un coefficient de puissance plus élevé que les éoliennes à axe vertical.
- L'ajout d'un local électrique n'est pas nécessaire, ce qui réduit considérablement l'impact au sol [31].

II.8.2.2 Les Inconvénients de la structure à axe horizontal

- Coût de construction très élevé
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'à la terre.

- Systèmes d'orientation requis [35].

Comme mentionné précédemment, il existe deux types des systèmes éoliens : les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais les éoliennes les plus courants sont à axe horizontal donc dans ce mémoire on s'intéressera qu'à ceux à axe horizontal.

II.9 Les composantes d'une éolienne à axe horizontal

Le vocabulaire le plus souvent utilisé pour décrire une éolienne est constitué principalement les sous-ensembles suivantes. (La figure II.5) montrer les compositions d'une éolienne [36].

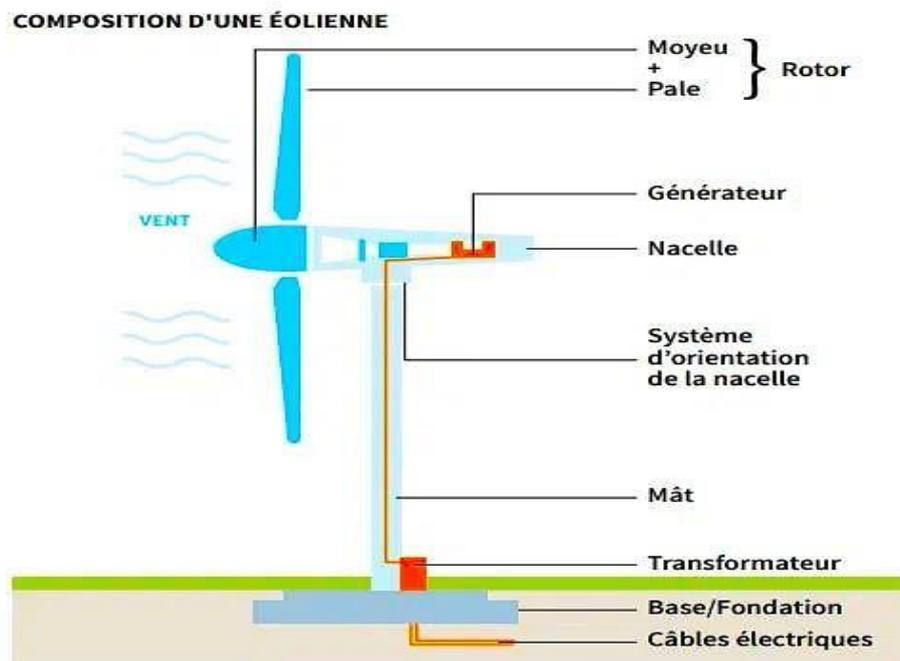


Figure II.5: Compositions d'une éolienne

II.9.1 Les fondations :

Elles sont en béton, la taille standard sur des machines modernes à un diamètre légèrement supérieur à 20 mètres et une hauteur d'environ 3 à 4 mètres. Jusqu'à présent, les fondations étaient enterrées, il existe aujourd'hui également des fondations hors-sol qui présentent de nombreux avantages notamment un démantèlement facilité et une remise en état des terrains beaucoup plus simple [37].

II.9.2 Le rotor :

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales en général 3 pour les éoliennes à grande production. Elles sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, elles peuvent en moyenne

mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute. Le rotor s'oriente de lui-même sur 360° pour rester face au vent et permettre une production maximale d'électricité [38].



Figure II.6 : un rotor et les pales d'une éolienne à axe horizontal [39].

II.9.3 Le système de contrôle :

Il permet de contrôler le bon fonctionnement du système éolien ainsi que la puissance produite à l'aide de plusieurs éléments:

- **Capteurs** : vitesse, position, courant, tension...
- **Contrôleurs** : puissance, système de freinage, circuits électriques.
- **Actionneurs** : générateur électrique.

II.9.4 Les systèmes électriques :

En plus du générateur, une éolienne utilise d'autres éléments électriques comme les câbles, les transformateurs, les convertisseurs de puissance, les capacités de puissance. Le rôle essentiel du système électrique est de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Chaque éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance. Cette courbe représente la variation de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent [40].

II.9.5 Le tour :

Composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau [41].

II.9.6 La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales [22].

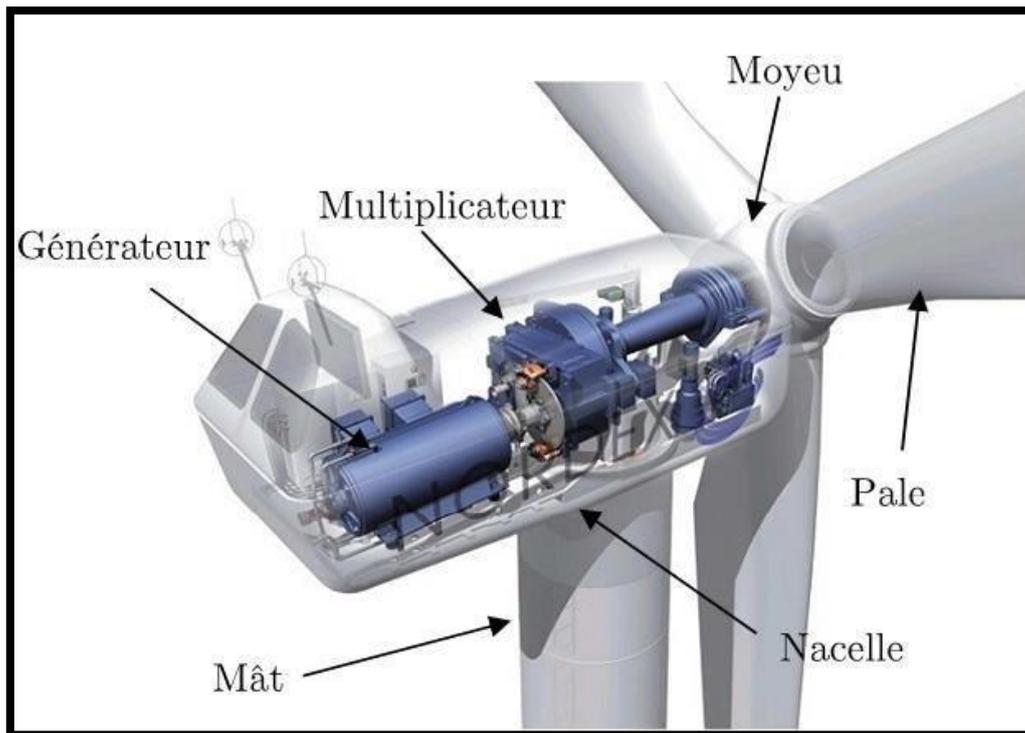


Figure II.7 : la nacelle d'une éolienne [42]

II.9.7 Le multiplicateur de vitesse :

Permet d'augmenter la vitesse de rotation. On passe de 19 à 30 tours par minute à environ 1500 tours par minute [43].

II.9.8 Le générateur électrique :

Un générateur électrique permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans un système éolien, plusieurs types de générateurs peuvent être utilisés en fonction de la taille de l'éolienne, des conditions de vent et des exigences spécifiques du projet. La machine asynchrone à double alimentation également connue (MADA) est l'un des types de générateurs les plus couramment utilisés dans les systèmes éoliens, en particulier pour les éoliennes de grande taille. Voici une description détaillée de ce type de générateur :

II.9.8.1 Description de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants [44].

II.9.8.2 Principe de fonctionnement :

La MADA fonctionne avec une structure comprenant un stator et un rotor.

- **Le stator** : est alimenté par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique tournant glissant dans l'entrefer de la machine.
- **Le rotor** : composé de bobinages, est relié à des convertisseurs de puissance bidirectionnels via des bagues collectrices et des balais [45].
- Le terme "**double alimentation**" provient du fait que les deux, stator et rotor, reçoivent de l'énergie électrique.

La Figure II.8 montrer modèle de générateur électrique [46].



Figure II.8 Générateur électrique.

II.9.9 Les pales :

Les pales sont une partie très importante de l'aéromoteur, le rendement, le bon fonctionnement, la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle d'hélice ou de rotor. Il existe plusieurs fabricants dans le monde capable de construire ces

pales qui sont maintenant en fibre de verre et en fibre de carbone. Du fait de leur longueur (30 à 40 mètres) il faut des convois exceptionnels pour les transporter sur le site. (Voir figure II.4)

Les pales sont caractérisées par :

- Leur **longueur, largeur.**
- Leur **profil** :
 - Le **profil traditionnel.**
 - Le **profil cambré.**
- Leurs **matériaux de construction.**
- Leurs **nombre** [47].

II.9.10 l'anémomètre :

Un anémomètre est un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent, il permet aussi d'évaluer les performances de l'éolienne et de reproduire la courbe de puissance.

II.9.11 La girouette :

Indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent [37].

La figure II.9 représente un anémomètre-girouette [48].



Figure II.9 : Anémomètre-girouette

II.10 Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal

Voici les étapes de fonctionnement de la production d'énergie éolienne :

- **Capture de l'énergie éolienne :**
 - Le vent exerce une force sur les pales.
 - Les pales sont conçues pour être aérodynamiques, maximisant ainsi la surface exposée au vent tout en minimisant la résistance.

- La différence de pression pousse les pales, les faisant tourner.
- Le diamètre balayé par les pales varie de 80 à plus de 200 mètres, et plus les pales sont longues, plus la capacité de production d'électricité est importante.
- **Transmission de l'énergie mécanique :**
 - La rotation des pales est transmise à un axe horizontal, appelé arbre de transmission.
 - Cet arbre relie le rotor à un multiplicateur de vitesse.
- **Vitesse de rotation et multiplicateur :**
 - Le multiplicateur de vitesse ajuste la vitesse de rotation du rotor pour la rendre compatible avec la vitesse de rotation requise par le générateur.
 - Il augmente la vitesse de rotation, qui est généralement plus faible au niveau des pales, à une vitesse plus élevée nécessaire pour la production d'électricité.
- **Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique :**
 - L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un générateur.
 - Le générateur fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique : lorsque l'arbre de transmission tourne, il entraîne un rotor interne qui génère un courant électrique dans les bobines fixes du stator
- **Acheminement de l'énergie électrique :**
 - L'énergie électrique produite par le générateur est acheminée le long du mât via des câbles jusqu'à un transformateur.
 - L'électricité est ensuite injectée dans le réseau électrique par des câbles souterrains [49].

En résumé, une éolienne capte l'énergie du vent via ses pales, la transforme en énergie mécanique avec le rotor, augmente la vitesse de rotation à l'aide d'un multiplicateur, puis produit de l'énergie électrique avec un générateur. Cette énergie est ensuite transformée et acheminée vers le réseau électrique.

II.11 Les défauts d'une éolienne à axe horizontal

Les turbines éoliennes sont exposées à une grande variété de conditions de fonctionnement, qui peuvent parfois pousser les différentes composantes du système au-delà de leurs limites.

Par conséquent, pour évaluer les défaillances potentielles des turbines éoliennes, il est essentiel de considérer deux critères : leur fréquence et la durée de leurs arrêts, afin de déterminer les défauts. Les analyses des données réelles des défaillances des turbines éoliennes ont identifié les principaux composants du système sujets à ces défauts [30].

La surveillance et le diagnostic de défauts des éoliennes permettent de prédire et détecter rapidement toute occurrence d'une défaillance avant qu'elle ne se propage et conduise à l'arrêt ou voire même à la destruction de l'appareil éolien. La Figure (II.10) illustre un défaut dans un éolien [50].



Figure II.10 Destruction d'une éolienne par prise de feu

II.12 Les défauts des composants critiques des éoliennes

Les éoliennes sont des systèmes composés de plusieurs éléments, Ces éléments peuvent être influencés par plusieurs facteurs. Voici les défauts les plus courants :

II.12.1 Défauts hydraulique

Les éoliennes sont généralement exposées à des conditions environnementales extrêmes, telles que des températures élevées ou basses, la corrosion et les vibrations. Les composants hydrauliques, utilisés dans de nombreuses connexions à haute pression, sont intégrés dans le système de pas, le système d'orientation de la nacelle, le système de freinage et le système de lubrification de la boîte de vitesses. Les fuites dans ces composants entraînent des pannes hydrauliques. La mauvaise installation est responsable de 60 % des défaillances. Ces défauts peuvent entraîner une perte de production d'énergie, une usure accrue des composants et des pannes majeures.

II.12.2 Défauts de la boîte de vitesses (multiplicateur)

La boîte de vitesses est une partie essentielle dans la majorité des turbines éoliennes. Cependant, elle est l'un des composants de la turbine éolienne les plus fréquemment endommagés. Les défaillances portent couramment les jeux entre dents et ruptures des dents. Ils sont revendiqués comme les résultats de contaminations de particules, arrêt/démarrage trop

fréquent et les conditions de fonctionnement à forte charge [51]. On peut résumer certains facteurs causent ces défaillances comme suit :

- Usure des engrenages
- Défaillance des roulements
- Alignement incorrect
- Vibrations excessives
- Dépassement de la charge de conception
- Problèmes de lubrification
- Corrosion
- La fatigue et l'usure de la surface

Il convient de noter que les défaillances des roulements représentent la majorité des défaillances de la boîte de vitesses, souvent dues à l'écaillage de la structure blanche, à l'éraflure et au micropitting. La Figure (II.11) illustre rupture d'une dent de la boîte de vitesse [52].



Figure II.11 Rupture d'une dent planétaire de la boîte de vitesse

II.12.3 Défauts des pales

Les pales des rotors des turbines éoliennes sont essentielles pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Fabriquées en matériaux composites, elles peuvent dissimuler des défauts difficiles à détecter et sont exposées à des conditions extrêmes, telles que les turbulences et les impacts de foudre. Ces facteurs peuvent entraîner des défaillances graves, telles que des fissures ou la perte d'une pale. Une pale endommagée peut être projetée jusqu'à 1,3 km de la tour, ce qui pose des risques pour la sécurité et réduit la confiance des habitants environnants [30] [51]. La Figure (II.12) montre les défauts des pales.



Figure II.12 Erosion et Fissure d'une pale.

II.12.4 Défauts des générateurs :

Le générateur est un composant important pour le fonctionnement d'une éolienne il est soumis à plusieurs facteurs comme les effets environnementaux, surcharges, la fatigue...etc, Ce qui produit des défaillances courantes suivantes :

- ✚ **Défaillance des enroulements statoriques et rotoriques** : Provoquée par des surcharges, des court-circuit, ou une isolation dégradée, entraînant des pannes électriques et des pertes de performance.
- ✚ **Rupture de l'isolation de l'enroulement du stator** : elle est causée par des contraintes mécaniques, électriques et thermiques.
- ✚ **Asymétrie électrique du rotor** : elle est causée par l'augmentation de la résistance ou le circuit ouvert des circuits balais-engins.
 - Surchauffe. Survitesse.
 - Vibration.
 - Survitesse.
 - Défaillance mécanique, Désalignement.
 - Perte de contrôle de la chaîne cinématique [52].
- ✚ **Les défauts qui entraînent une excentricité du rotor par rapport au stator** : Déformation du rotor ou de l'arbre, mauvais alignement, défaut de centrage.
- ✚ **Les défauts qui entraînent des oscillations de couple** : défauts en tout genre de la charge mécanique, défauts de roulement.

- ✚ Les défauts qui entraînent des perturbations de la répartition des forces magnétomotrices: défauts de court-circuit statoriques, rupture de connexions électriques au stator ou au rotor [53].

II.12.5 Les défauts des autres composants

Dans un système éolien, chaque composant joue un rôle essentiel pour assurer le bon fonctionnement du système global. Le Tableau II .1: Présente le type et mode de défaillance de quelque composant d'éolienne.

Tableau II .1: type et mode de défaillance de quelque composant d'éolienne [52].

<i>Le composante</i>	<i>Sa fonction</i>	<i>Type De défauts</i>	<i>Cause</i>
<i>Arbre principal</i>	Transmettre l'énergie mécanique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fissures ✓ Déformation ✓ Désalignement 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Surcharge ✓ Vibrations excessives ✓ Défauts de fabrication.
<i>Moyeu</i>	Connecter les pales au rotor et permettre leur rotation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fissures ✓ Jeu excessif ✓ Corrosion. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fatigue des matériaux ✓ Impacts répétés sur les pales ✓ Exposition aux éléments.
<i>Joint d'huile</i>	Assurer l'étanchéité et la lubrification des mécanismes rotatifs	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuites d'huile ✓ Contamination ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vieillesse du joint ✓ Surchauffe ✓ Maintenance inadéquate
<i>Système d'orientation</i>	Orienter la nacelle et les pales pour capturer efficacement le vent.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Blocage. ✓ Dysfonctionnement électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Accumulation de glace ✓ Interférences électromagnétiques ✓ défauts mécaniques
<i>Mat</i>	Supporter la nacelle et les pales de l'éolienne.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Corrosion ✓ Fissures ✓ Déformation. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Exposition aux éléments naturels ✓ Défauts de conception ✓ Vieillesse.

II.13 Conclusion

Les systèmes éoliens sont cruciaux pour la transition vers un avenir énergétique durable, aidant ainsi à combattre le changement climatique et à renforcer la sécurité énergétique.

Ce chapitre a couvert les fondamentaux des systèmes éoliens, y compris leurs composants, leur fonctionnement et les défis potentiels.

Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons sur la modélisation des défauts des systèmes éoliens à l'aide du logiciel MATLAB (Simulink) afin de mieux appréhender l'impact de ces défauts sur le fonctionnement global du système.

*Chapitre III : Diagnostic des
défauts dans un système éolien
à axe horizontal*

III.1 Introduction

Le diagnostic des défauts dans les systèmes éoliens est crucial pour garantir leur fonctionnement optimal et sécurisé. Étant souvent situées dans des zones éloignées et exposées à des conditions environnementales extrêmes, les turbines éoliennes sont vulnérables à divers types de défaillances, y compris des défauts mécaniques, électriques et structurels.

Dans ce chapitre, nous allons diagnostiquer les défauts des composants critiques de ce système en utilisant la modélisation et la simulation à l'aide de logiciel Matlab. Cette approche nous permettra d'obtenir une vision globale du comportement du système, en tenant compte des paramètres électriques et mécaniques qui influencent son fonctionnement.

III.2 Modélisation des Systèmes Éoliens

La modélisation implique l'utilisation d'un ensemble d'équations pour caractériser tous les éléments du système étudié. Son objectif est d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser tout en respectant des contraintes spécifiques. La modélisation est essentielle pour établir une relation entre l'énergie produite par le système éolien et la demande de l'utilisateur [54].

La figure (III.1) illustre le système éolien que nous allons modéliser [1]

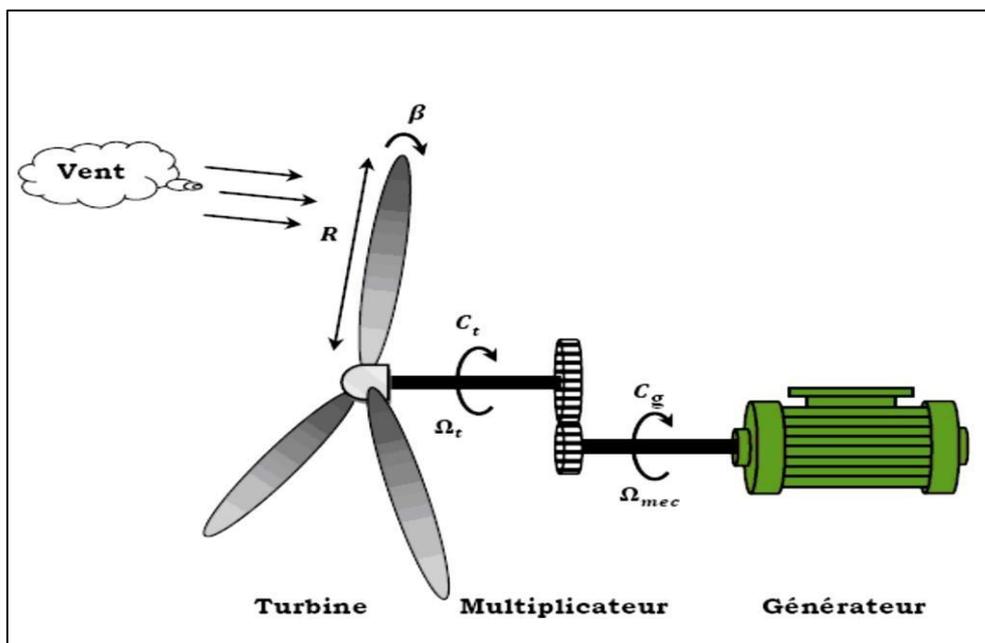


Figure III.1 Système éolien modélisé

III.2.1 Hypothèses Simplificatrices

- Les pales sont considérées comme étant identiques, avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottement des pales par rapport à l'air et au support sont très faibles et peuvent être négligés.
- La vitesse du vent est supposée uniformément répartie sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique, caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques [44].

Pour modéliser un système éolien, on va diviser le processus en trois principales étapes : la modélisation aérodynamique, la modélisation mécanique et la modélisation électrique. Cette approche systématique permet de capturer les dynamiques complexes et les interactions entre les différentes composantes de l'éolienne. Voici les étapes détaillées pour chaque phase de la modélisation.

III.2.2 Modélisation Aérodynamique

- **Modèle du Vent**

La modélisation du vent peut être réalisée par plusieurs méthodes. Cependant, la méthode la plus couramment utilisée est la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. Selon cette méthode, la vitesse instantanée du vent peut être exprimée comme la somme de la vitesse moyenne du vent et d'une composante aléatoire (perturbations) [45].

La vitesse du vent est exprimée par :

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (\text{III.1})$$

Où:

$V_T(t)$: La vitesse de perturbation du vent, ou bruit blanc gaussien, est une opération aléatoire stationnaire qui ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent.

V_0 : La moyenne de la vitesse du vent, variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

L'aéro-turbine filtre les fluctuations de hautes fréquences. Pour représenter plus fidèlement cette réalité, un filtre passe-bas est appliqué à la composante de turbulence, dont la fonction de transfert est donnée par :

$$H_f = \frac{1}{1+\tau.s} \quad (III.2)$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 4s$).

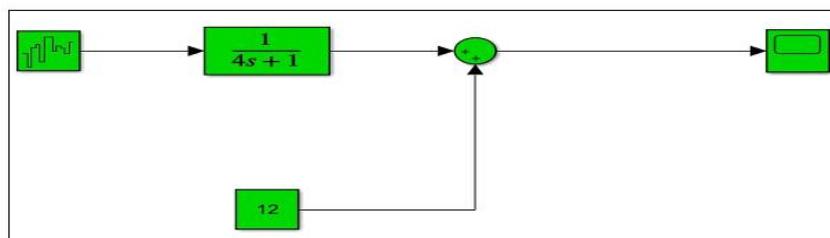


Figure III.2 Modélisation du vent sous MATLAB-Simulink [45].

- **La théorie de Betz**

En 1920, le physicien allemand Albert Betz a élaboré la théorie de Betz, une méthode simplifiée permettant de calculer la quantité maximale d'énergie cinétique qu'une éolienne peut capter[45].

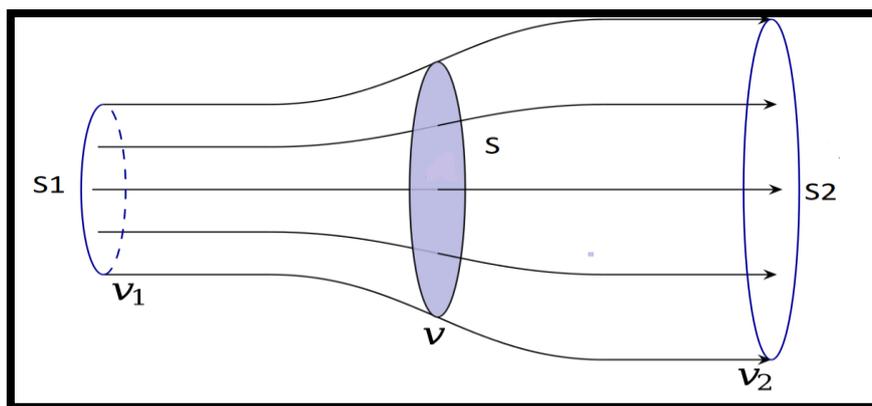


Figure III.3 Théorie de Betz

Considérons la figure (III.3), où la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur est notée V_1 et celle en aval est notée V_2 . En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la

moyenne des vitesses du vent non perturbé devant l'éolienne (V_1) et après son passage à travers le rotor (V_2), nous obtenons :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.3})$$

La masse de l'air peut être définie si nous connaissons le volume de l'air entrant dans ce cylindre, nous obtenons donc [55]:

$$m = \rho \cdot S \cdot V \quad (\text{III.4})$$

Avec :

ρ = la densité de l'air.

S = la surface.

V = la vitesse moyenne.

On peut calculer la puissance consommée par l'aérogénérateur (depuis le 2^{ème} loi de newton) par :

$$P_{\text{aero}} = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

F = la force.

V = Vitesse moyenne.

La quantité d'énergie générée par la masse d'air traversant la surface active équivalente de l'éolienne est exprimée par la puissance P_v et dépend de la surface S de l'éolienne, elle est donnée par:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{III.6})$$

Où:

- ρ : La densité de l'air égale à 1,225 kg/m³.
- S : La surface du capteur éolien (surface balayée) en m².
- V_v^3 : La vitesse du vent en m/s.

On définit le rapport entre les deux puissances C_p par :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_V} \rightarrow P_{aero} = C_p \cdot P_V \quad (III.7)$$

Donc :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (III.8)$$

- **La limite de BETZ**

La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique (C_p) maximale développée par un capteur éolien est égale à $16/27$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (III.4) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ , et de l'angle de l'orientation de la pale β [56].

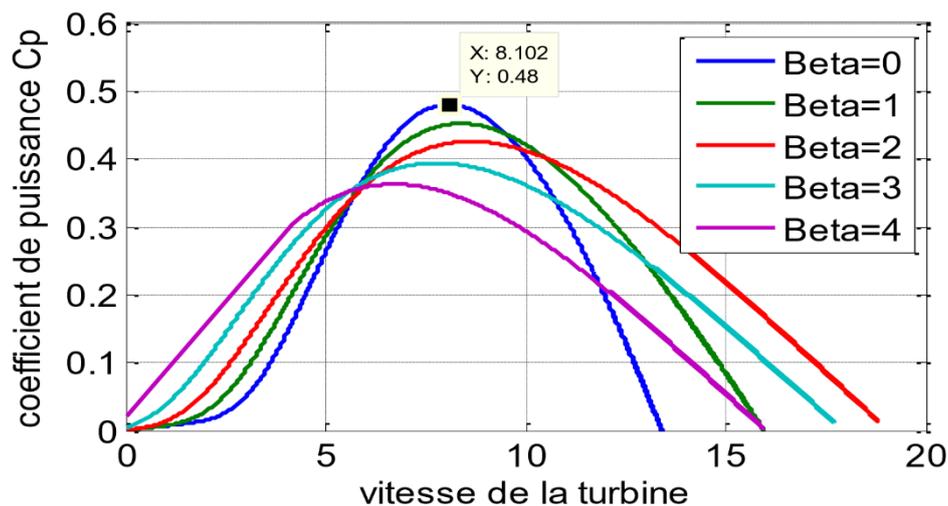


Figure III.4 Coefficient aérodynamique (C_p)

Le ratio de la vitesse λ : est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [45].

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (III.9)$$

R_t = Rayon des pales en m.

Ω_t = Vitesse de rotation de la turbine.

V = Vitesse moyenne du vent.

On peut trouver de nombreux modèles pour l'expression (c_p) en fonction de chaque turbine et de ses caractéristiques, L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [55] :

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left[\left(\frac{A_2}{\lambda} \right) - A_3 \beta - A_4 \right] e^{\frac{A_5}{\lambda_i}} + A_6 \lambda \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 - 1} \quad (\text{III.11})$$

III.2.3 Modélisation mécanique

La modélisation mécanique intègre plusieurs aspects, comme la résistance des matériaux, les forces aérodynamiques agissant sur les pales, et les impacts des charges variables résultant des fluctuations du vent. La figure (III.5) présente le modèle mécanique de la turbine [57].

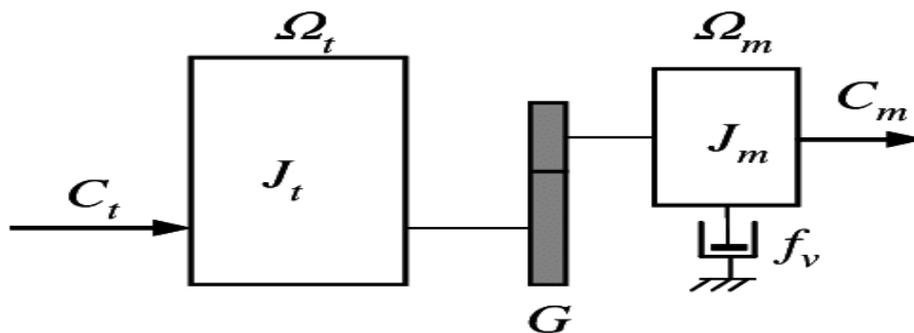


Figure III.5 le modèle mécanique de la turbine

Avec :

C_t : le couple mécanique de la turbine.

J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

Ω_t : la vitesse de rotation de la turbine.

G : facteur de gain.

J_m : le moment d'inertie de la MADA.

C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA.

Ω_{mec} : la vitesse de rotation de la MADA.

f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.

➤ **Modèle du multiplicateur**

Le multiplicateur est la boîte de vitesse de la turbine, servant d'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il ajuste la vitesse lente de la turbine à la vitesse rapide de la génératrice. Il est considéré comme rigide et modélisé par un simple gain. Cet élément détermine le couple mécanique et la vitesse de rotation de la machine de la manière suivante [45] :

$$C_g = \frac{1}{G} \cdot C_t \quad (\text{III.12})$$

$$\Omega_{\text{mec}} = G \cdot \Omega_t \quad (\text{III.13})$$

Avec :

C_g : Couple de multiplicateur de vitesse.

G : Facteur de gain.

➤ **Modèle de l'arbre mécanique**

La modélisation de l'arbre mécanique d'une éolienne permet de représenter le comportement dynamique du système en termes d'inertie et de couples appliqués. En intégrant les inerties de la turbine et de la génératrice, on peut déterminer la vitesse mécanique de l'arbre sous les équations suivantes [45] :

$$J_{\text{total}} = J_g + G^2 \cdot J_t \quad (\text{III.14})$$

De plus, il faut savoir que le couple total égal à :

$$C_{\text{total}} = C_g + C_{\text{em}} + C_f = J_{\text{total}} \cdot S \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$C_f = \Omega_{\text{mec}} \cdot f \quad (\text{III.16})$$

On remplacé (III.16) dans (III.15), on obtenue :

$$C_{\text{total}} = C_g + C_{\text{em}} + \Omega_{\text{mec}} \cdot f = J_{\text{total}} \cdot S \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{III.17})$$

Donc :

$$C_g - C_{\text{em}} = (J_{\text{total}} \cdot S + f) \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{III.18})$$

Alors :

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \frac{1}{(J_{total} \cdot S + f)} \quad (III.19)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté par la figure III.6

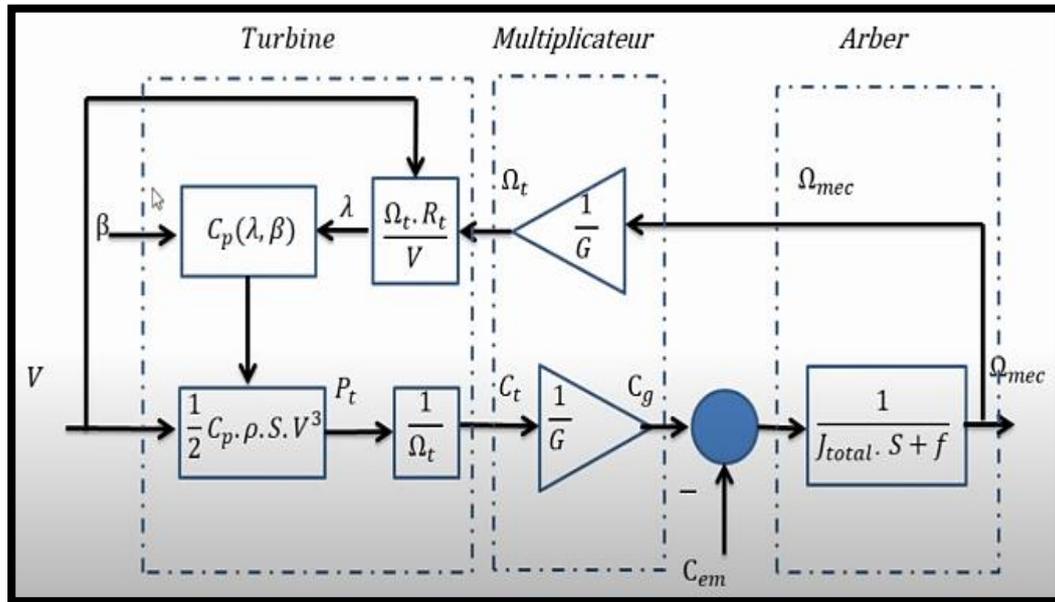


Figure III.6 schéma bloc de la turbine éolien.

III.2.4 Modélisation électrique

➤ Modèle de la MADA

La modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation est essentielle pour comprendre son comportement et sa commande dans diverses applications, notamment la production d'énergie éolienne.

III.2.4.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la présentation des relations fondamentales régissant le fonctionnement et la stratégie de commande de la MADA, nous pouvons adopter les hypothèses suivantes :

- ✓ La machine est constituons symétrique.
- ✓ On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seul les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteur élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- ✓ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

- ✓ On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- ✓ On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.
- ✓ L'entrefer d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé

Les hypothèses précédentes nous permettent de représenter la MADA par la figure (III.7) [58].

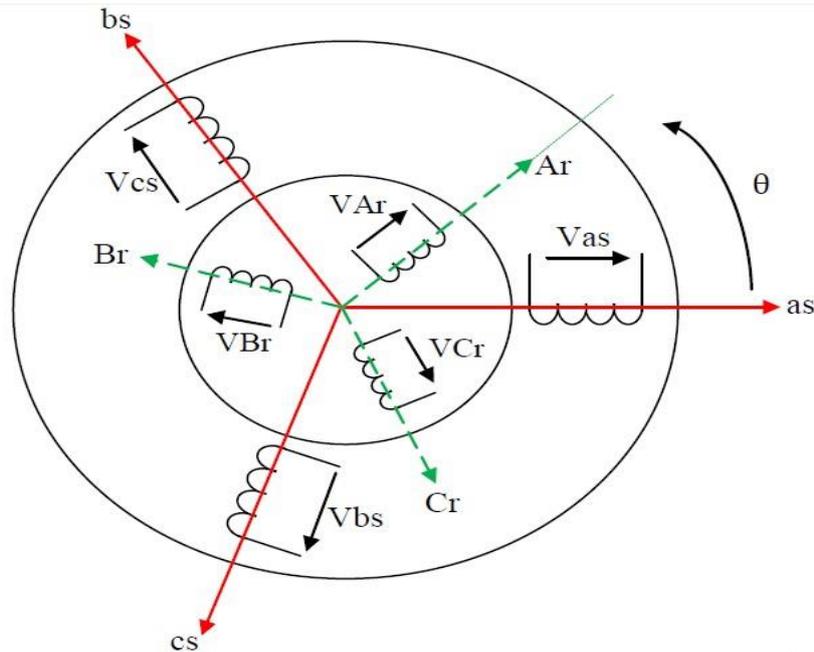


Figure III.7 Représentation de la MADA.

Les équations du modèle équivalent par circuit du MADA sont basées sur les lois de Kirchhoff et les relations entre les variables électriques et magnétiques de la machine. Les équations principales incluent [58] :

➤ **Équations électriques**

L'application des lois de Kirchhoff sur les enroulements statoriques et rotoriques donne :

Stator:

$$\begin{cases} [Vs]_a = [Rs]_a[Is]_a + \frac{d}{dt} [\phi_s]_a \\ [Vs]_b = [Rs]_b[Is]_b + \frac{d}{dt} [\phi_s]_b \\ [Vs]_c = [Rs]_c[Is]_c + \frac{d}{dt} [\phi_s]_c \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec :

$[Vs]_a, [Vs]_b, [Vs]_c$: Les tensions instantanées aux bornes de phase stator.

$[\emptyset s]_a, [\emptyset s]_b, [\emptyset s]_c$: Les flux statoriques.

$[Is]_a, [Is]_b, [Is]_c$: Les courants instantanés circulants dans la phase statoriques.

Rotor:

$$\begin{cases} [Vr]_a = [Rr]_a [Ir]_a + \frac{d}{dt} [\emptyset r]_a \\ [Vr]_b = [Rr]_b [Ir]_b + \frac{d}{dt} [\emptyset r]_b \\ [Vr]_c = [Rr]_c [Ir]_c + \frac{d}{dt} [\emptyset r]_c \end{cases} \quad (III.21)$$

Avec :

$[Vr]_a, [Vr]_b, [Vr]_c$: les tensions instantanées aux bornes de phase rotor.

$[\emptyset r]_a, [\emptyset r]_b, [\emptyset r]_c$: Les flux rotoriques.

$[Ir]_a, [Ir]_b, [Ir]_c$: Les courants instantanés circulants dans la phase rotoriques.

Les équations précédemment (1) et (2) présentées peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$[Vs]_{abc} = [Rs]_{abc} \times [Is]_{abc} + \frac{d}{dt} \times [\emptyset s]_{abc} \quad (III.22)$$

$$[Vr]_{abc} = [Rr]_{abc} \times [Ir]_{abc} + \frac{d}{dt} \times [\emptyset r]_{abc} \quad (III.23)$$

$$\text{Et : } [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

➤ Equation magnétique

L'expression des flux sont :

$$[\emptyset s]_{abc} = [Ls] \times [Is]_{abc} + [Msr] \times [Ir]_{abc} \quad (III.24)$$

$$[\emptyset r]_{abc} = [Lr] \times [Ir]_{abc} + [Mrs] \times [Is]_{abc} \quad (III.25)$$

$$\text{Et : } [Ls] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix}, \quad [Lr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix}$$

Avec :

Ls et Lr : Les inductances propres statoriques et rotoriques.

Ms et Mr : Les inductances mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

Mrs : Mutuelle inductance entre une phase statoriques et une phase rotoriques.

$$[Msr] = Msr \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[Msr]^t = [Mrs]$$

En remplaçant les équations de flux (III.24) et (III.25) dans les équations de tension (III.22), (III.23), nous obtenons :

$$[Vs]_{abc} = [Rs]_{abc} \times [Is]_{abc} + \frac{d}{dt} \times ([Ls] \times [Is]_{abc} + [Msr] \times [Ir]_{abc}) \quad (\text{III.26})$$

$$[Vr]_{abc} = [Rr]_{abc} \times [Ir]_{abc} + \frac{d}{dt} \times ([Lr] \times [Ir]_{abc} + [Mrs] \times [Is]_{abc}) \quad (\text{III.27})$$

Nous pouvons constater que les équations (III.26, III.27) sont très complexes à résoudre, pour résoudre ce problème, nous avons recours à la Transformation de Park.

III.2.4.2 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [55].

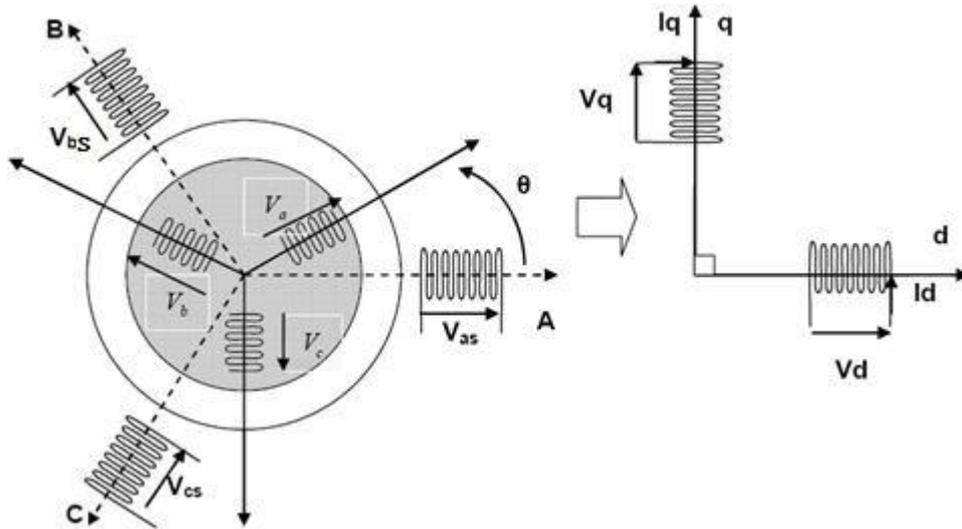


Figure III.8 Modèle de PARK de la MADA. [59]

La matrice de park $P(\theta)$ défini par [55] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\text{Et : } [V]_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad [I]_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, \quad [V]_{dq} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$[P(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\text{Et : } [V]_{dqo} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix}, \quad [I]_{dqo} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix}, \quad [V]_{dqo} = \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_o \end{bmatrix}$$

Alors : les équivalents précédents s'écrivent à la forme suivante :

$$\text{Tension : } [V]_{abc} = [P(\theta)^T] [V]_{dq0}$$

$$\text{Courant : } [I]_{abc} = [P(\theta)^T] [I]_{dq0} \quad (\text{III.28})$$

$$\text{Flux : } [\phi]_{abc} = [P(\theta)^T] [\phi]_{dq0}$$

III.2.4.2.1 Application de la transformateur de Park

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques (III.23), (III.24), et magnétiques (III.25), (III.26), permet d'obtenir les équations suivantes [59] :

1) Les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

2) Les équations magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M_{sr} \cdot I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M_{sr} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M_{sr} \cdot I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M_{sr} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Les puissances actives et réactives s'expriment par [58] :

Stator :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Rotor :

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

Avec :

Ps : la puissance active partie stator.

Qs : la puissance réactive partie stator.

Pr : la puissance active partie rotor.

Qr : la puissance réactive partie rotor.

III.3 Partie de simulation

La simulation des systèmes éoliens, qu'ils soient en bon état ou présentant des défauts, est cruciale pour garantir leur performance et leur fiabilité. En condition normale, elle permet de prédire la production d'énergie et d'optimiser les paramètres opérationnels. En cas de défauts, tels que des pannes mécaniques ou électriques, la simulation aide à repérer et localiser rapidement ces anomalies. En comparant les performances avec et sans défauts, on peut élaborer des stratégies de maintenance préventive et corrective, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de réparation. Cette approche proactive assure une gestion plus efficace des parcs éoliens et une production d'énergie plus stable.

III.3.1 Présentation du modèle

Dans notre simulation nous avons utilisé Le modèle d'une turbine éolienne à axe horizontal de trois pales, de puissance de 1.9 kw. Il est basé sur quatre systèmes : l'aérodynamique (le vent), le système d'orientation des pales (l'angle beta), le système d'entraînement (multiplicateur) et le système de conversion d'énergie électrique (MADA), Le modèle de simulation est présenté dans la figure (III.9) ci-dessous :

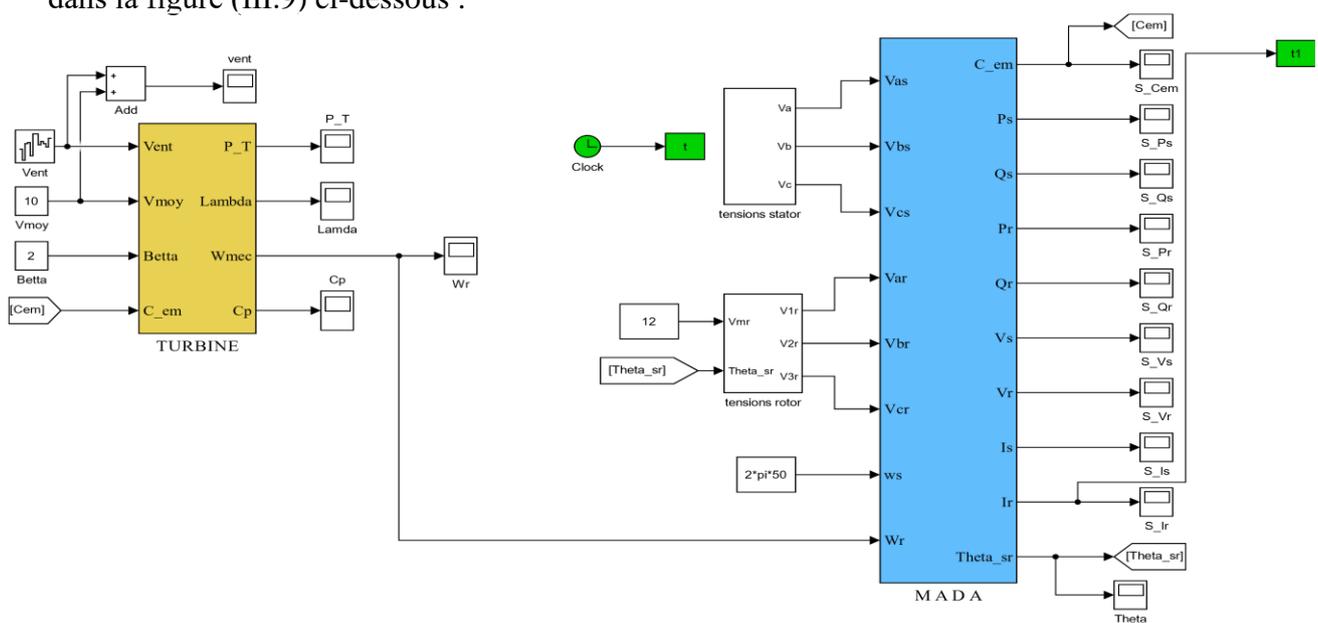


Figure III.9 Modèle de simulation d'un système éolien.

III.3.2 Simulation du vent

La figure III.10 montre l'évolution du vent pour une valeur moyenne de 10ms. Qui sera par suite considérée comme une grandeur d'entrée de la turbine.

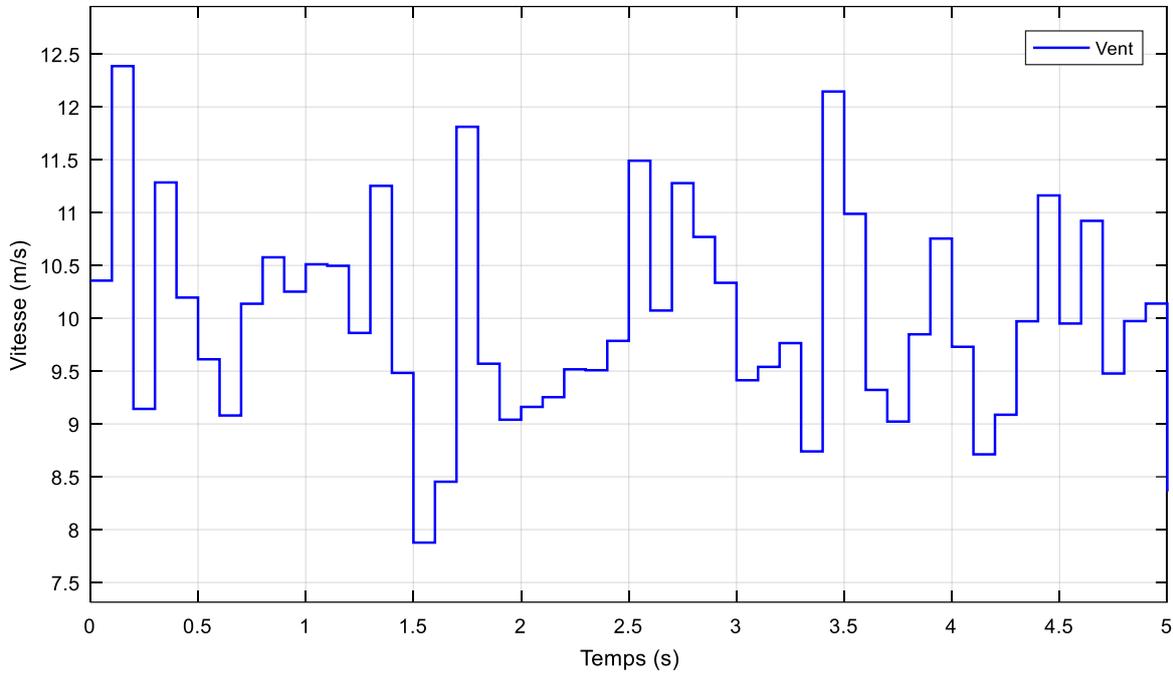


Figure III.10 Profil du vent appliqué à la turbine(m/s)

III.3.3 Les résultats de simulation à l'état sain

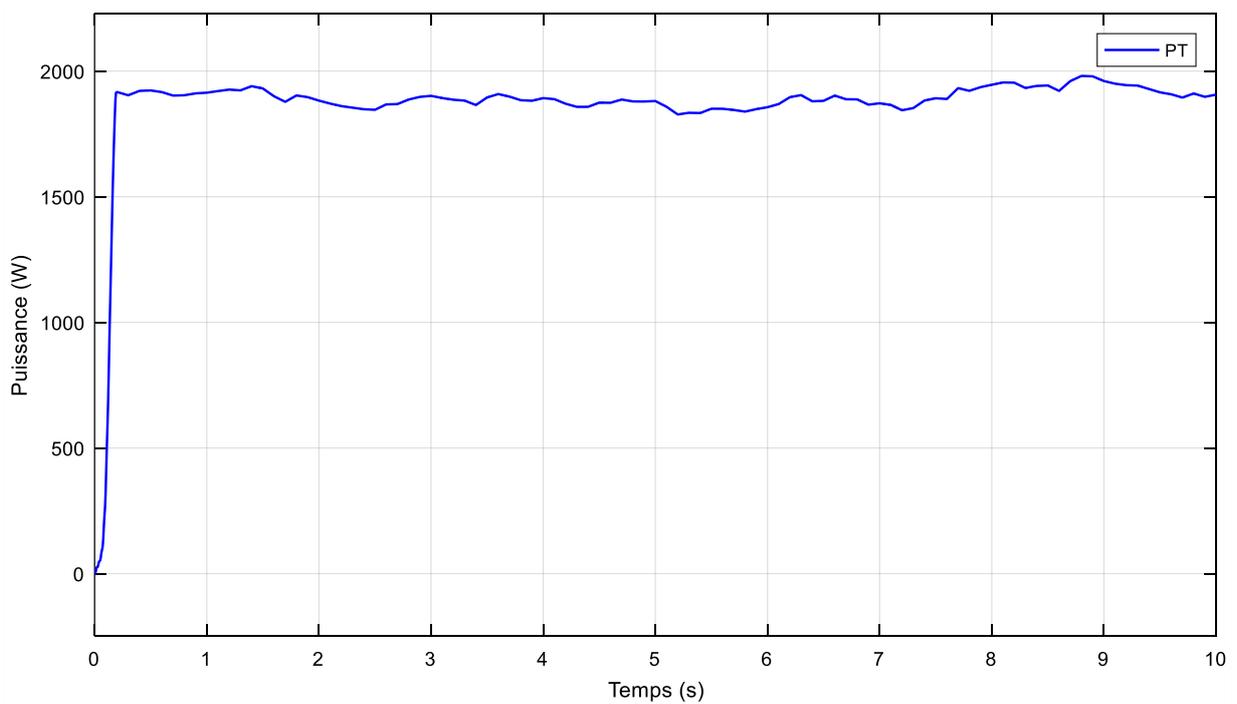


Figure III.11 La puissance de la turbine

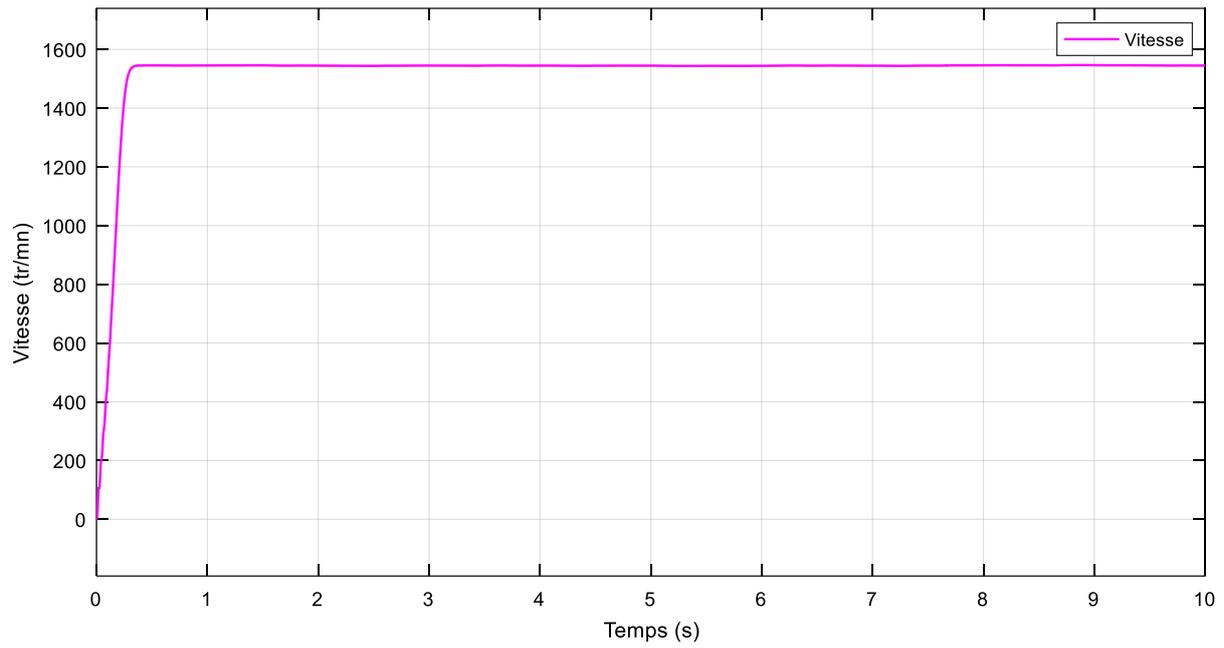


Figure III.12 La vitesse de l'arbre mécanique

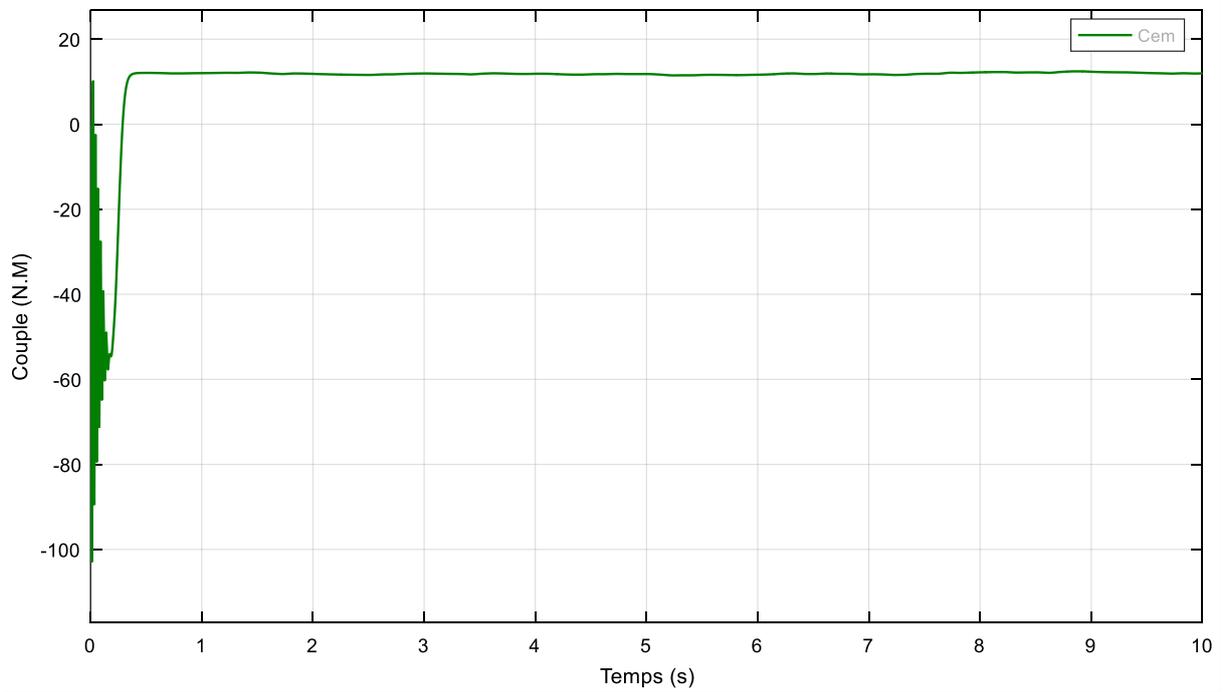


Figure III.13 Le couple électromagnétique

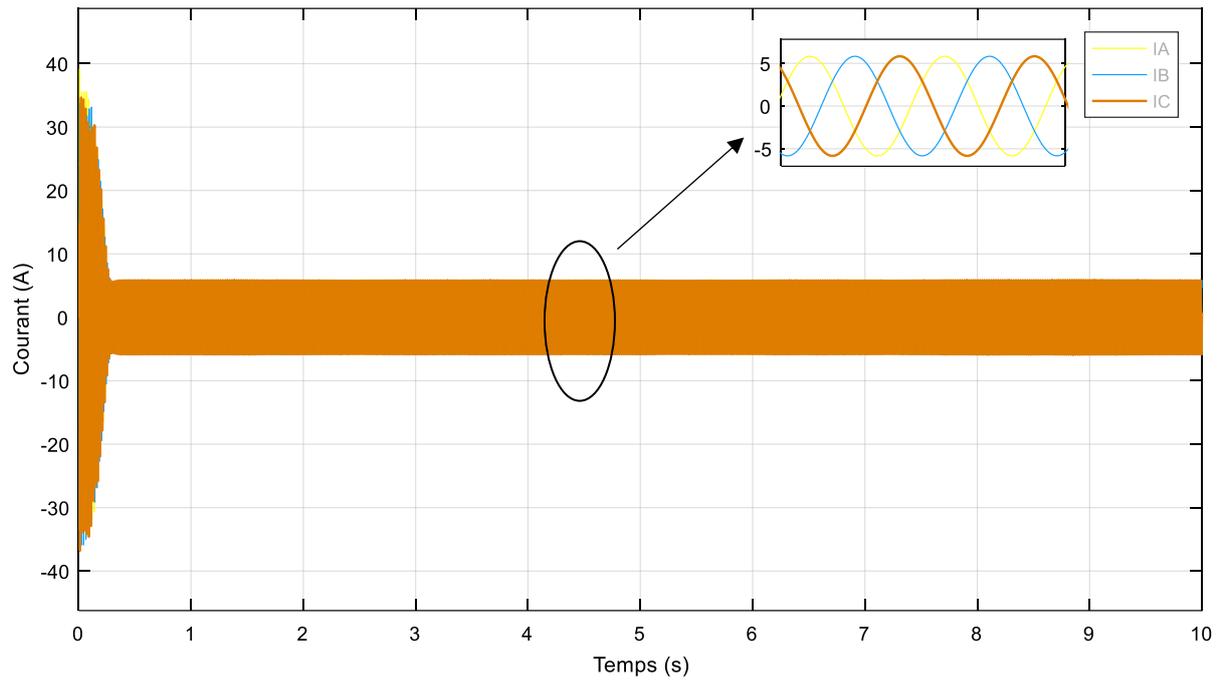


Figure III.14 Le courant statoriques

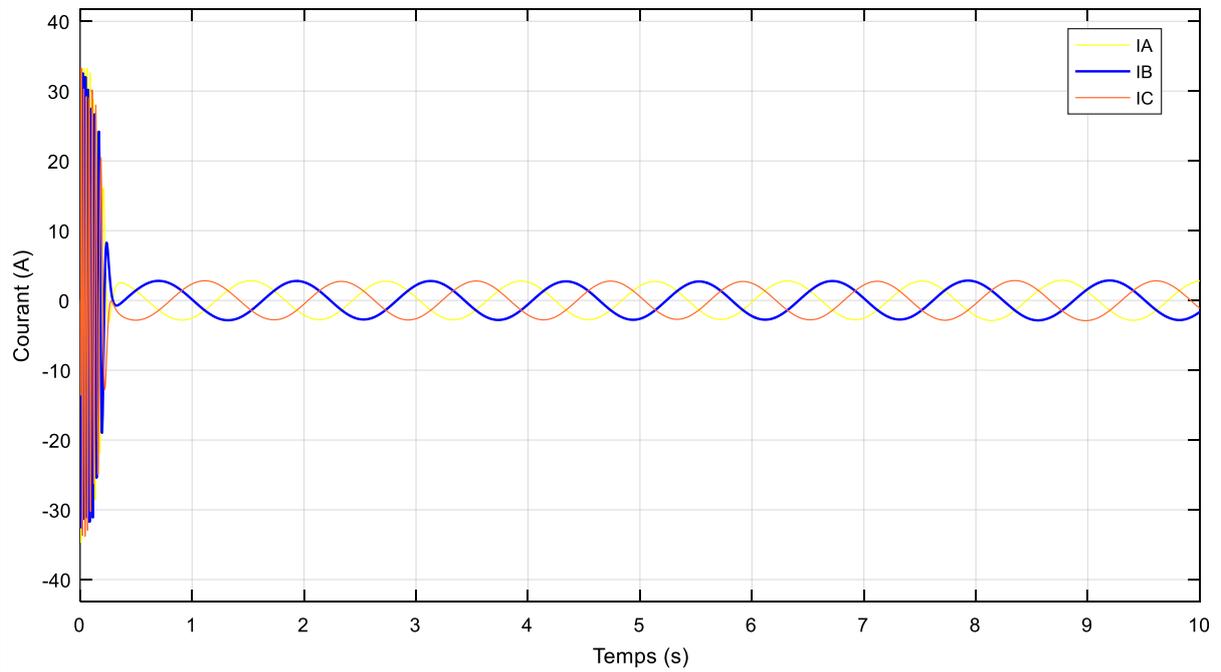


Figure III.15 Le courant rotoriques

III.3.4 L'interprétation ont l'état sain

➤ **La puissance de la turbine :**

La puissance d'une turbine éolienne illustre la relation entre la vitesse du vent et la production d'énergie. Dans la figure (III.11) la turbine commence à produire de l'électricité à partir d'une vitesse de vent minimale (vitesse de démarrage), augmente rapidement sa puissance jusqu'à atteindre une valeur maximale stable (puissance nominale) à une certaine vitesse (vitesse nominale), et maintient cette puissance jusqu'à ce que le vent devienne trop fort (vitesse d'arrêt), moment où la turbine s'arrête pour éviter des dommages. Ce comportement assure une production optimale et sécurisée de l'énergie éolienne.

➤ **La vitesse de l'arbre mécanique :**

Le graphe de la vitesse de l'arbre mécanique d'une turbine éolienne illustre la variation de la vitesse de rotation de l'arbre en fonction de la vitesse du vent. Dans la figure (III.12), l'arbre commence à tourner à partir de la vitesse de démarrage et augmente de manière linéaire jusqu'à atteindre la vitesse nominale. Au-delà de cette vitesse, la rotation se stabilise grâce à des mécanismes de contrôle jusqu'à atteindre la vitesse d'arrêt, où la turbine s'arrête pour prévenir les dommages. Cela garantit une opération stable et sécurisée de la turbine.

➤ **Le couple électromagnétique :**

Le couple électromagnétique d'une turbine éolienne illustre la conversion de l'énergie mécanique des pales en énergie électrique via l'interaction des champs magnétiques dans le générateur. Dans la figure (III.13), ce couple est généré de manière optimale lorsque le générateur est en bon état, assurant une production d'électricité efficace et stable. Les mécanismes de contrôle ajustent ce couple pour maintenir la performance et prévenir les dysfonctionnements, garantissant ainsi une opération sécurisée et fiable de la turbine.

➤ **Le courant statorique :**

Dans une simulation de turbine éolienne avec un générateur à double alimentation à l'état sain la figure (III.14), illustre le courant statorique reflète la distribution équilibrée du courant traversant les enroulements du stator. Cette balance entre les phases est essentielle pour assurer une conversion efficace de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Un courant statorique stable et conforme aux attentes indique un fonctionnement normal de la turbine éolienne, garantissant ainsi une production d'électricité fiable et une performance optimale du système.

➤ **Le courant rotorique :**

La figure (III.15) représente l'intensité du courant électrique circulant dans les enroulements du rotor du générateur, ce graphe montrant un courant rotorique stable et proportionnel à la puissance électrique produite. Le courant rotorique devrait rester dans des limites acceptables pour assurer un fonctionnement efficace et stable du générateur.

III.3.5 Les résultats de simulation en présence des défauts

➤ **Défauts de la boîte de vitesse (multiplicateur)**

Pour créer un défaut d'un multiplicateur dans une simulation d'un système éolien, vous pouvez augmenter la valeur de coefficient de frottement de (0.0024) à (1). Cela peut se produire en raison de plusieurs facteurs tels que l'usure des engrenages, une lubrification insuffisante, des contaminants ou des défaillances des roulements. L'augmentation du coefficient de frottement entraîne une augmentation des pertes mécaniques, réduisant ainsi l'efficacité de la transmission de puissance entre la turbine et le générateur.

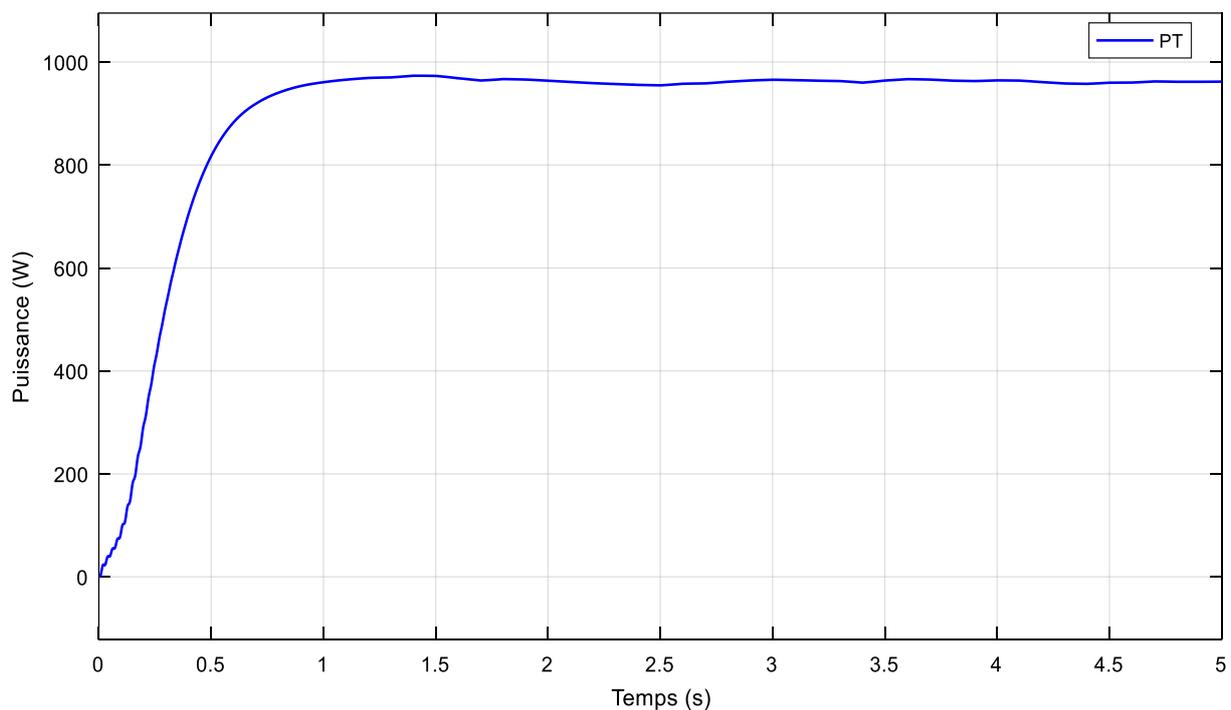


Figure III.16 La puissance de la turbine en présence de défauts

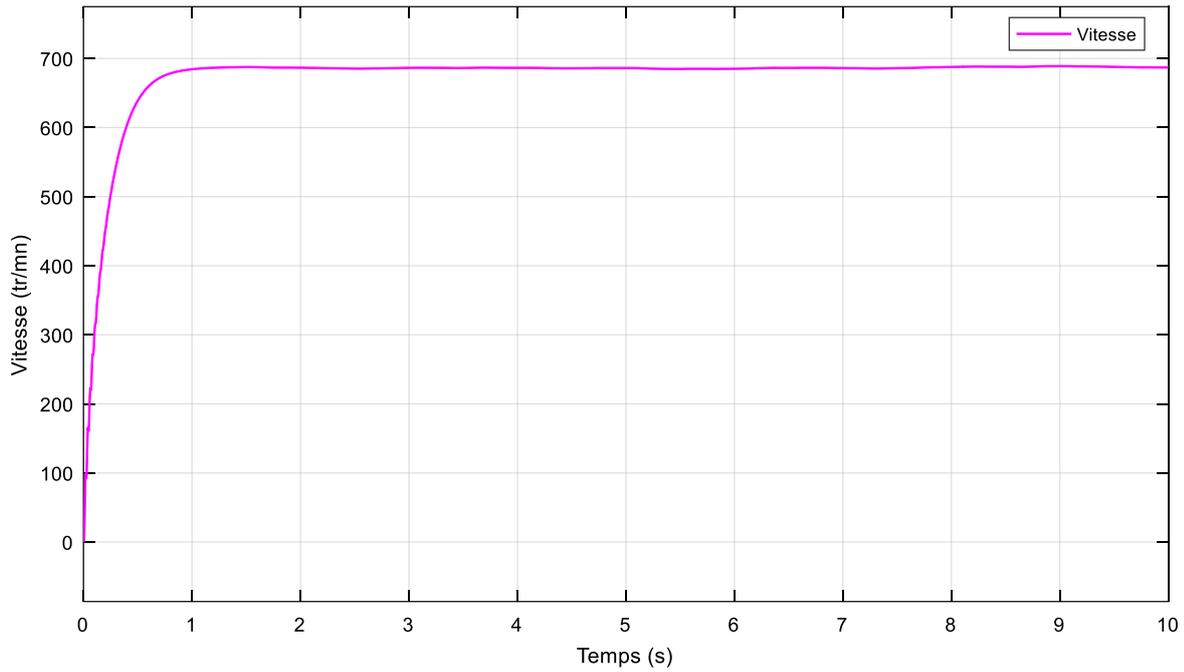


Figure III.17 La vitesse de l'arbre mécanique en présence de défauts

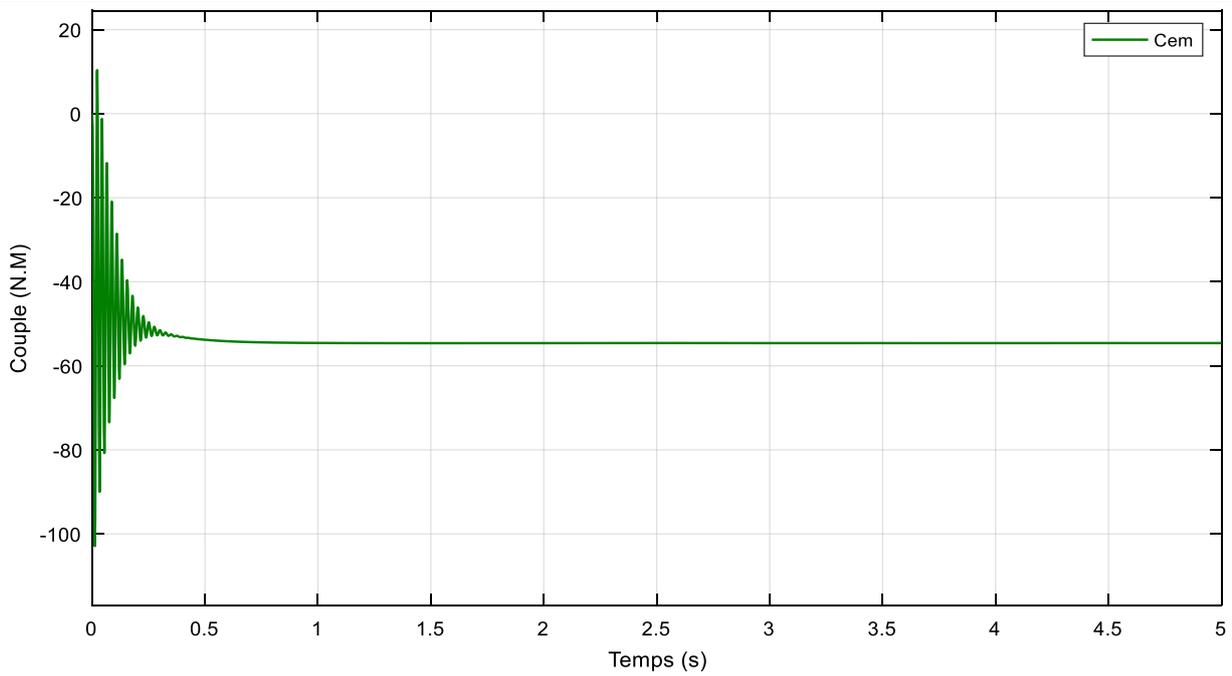


Figure III.18 Le couple électromagnétique en présence de défauts

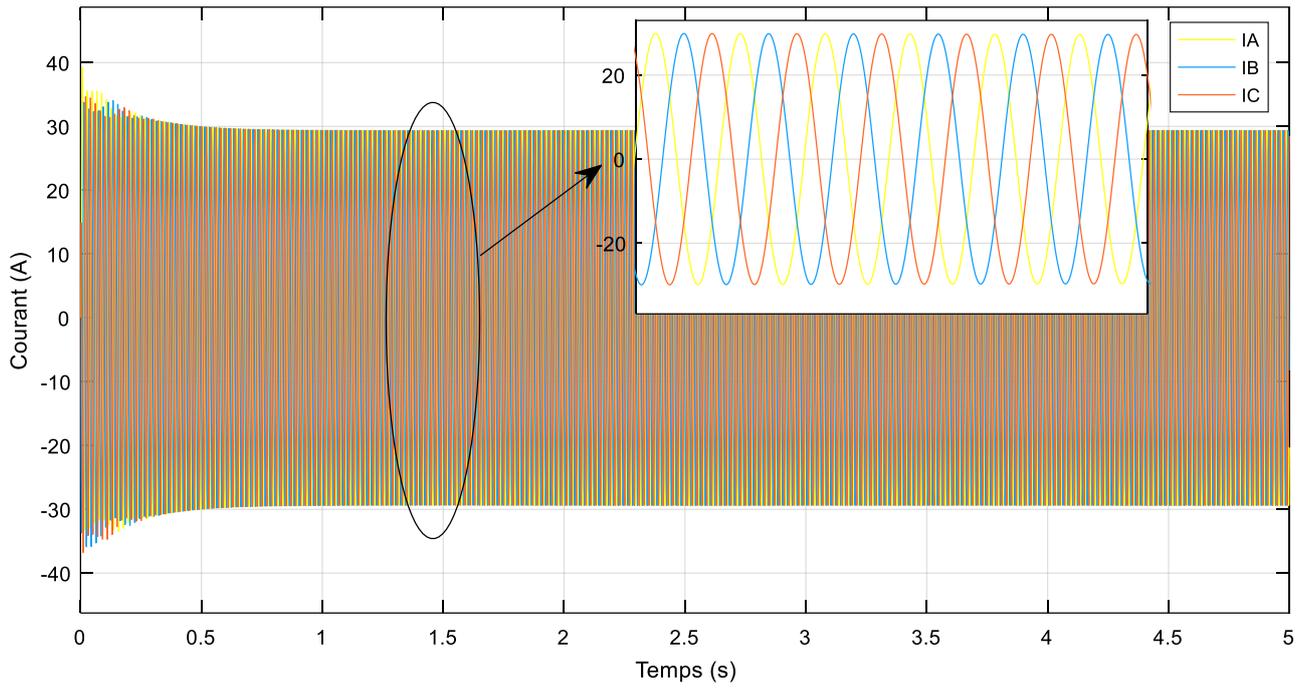


Figure III.19 Le courant statorique en présence de défauts

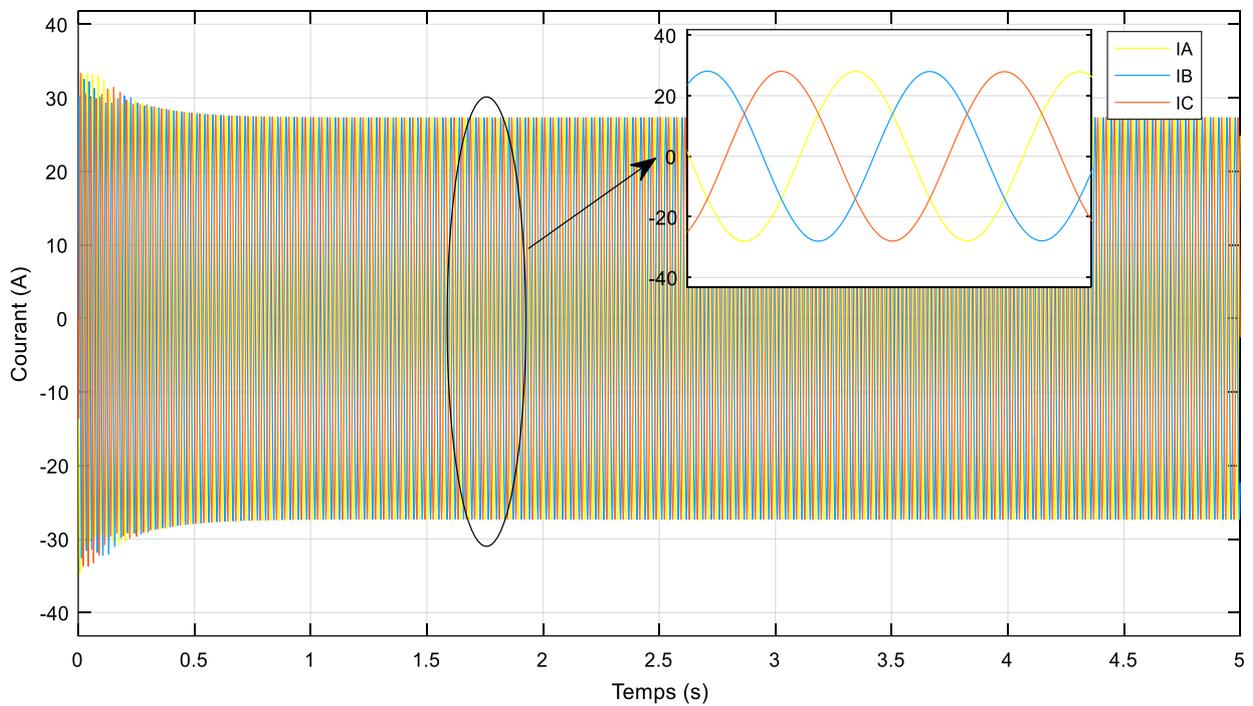


Figure III.20 Le courant rotorique en présence de défauts

➤ Défauts statoriques

Pour introduire un défaut statoriques dans la simulation d'un système éolien, il est possible de modifier certains paramètres liés au stator. Ces défauts statoriques peuvent inclure une augmentation de la résistance statoriques ($R_s=9$) et une diminution de l'inductance statoriques ($L_s=0.245$), ce qui permet de simuler des enroulements endommagés ou surchauffés. Ces ajustements induisent un déséquilibre dans le circuit statoriques ou un court-circuit.

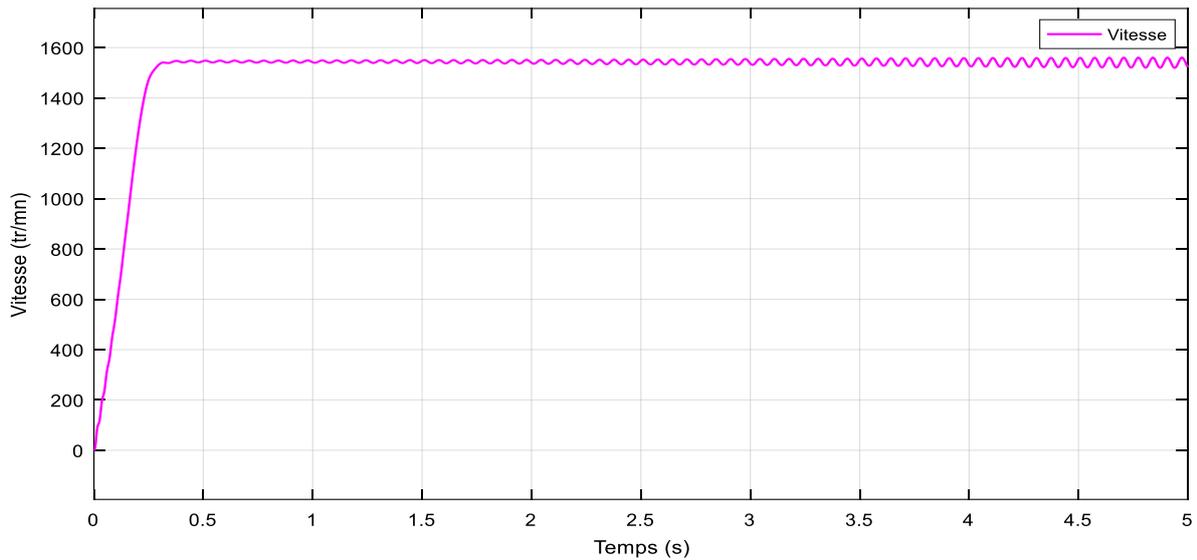


Figure III.21 La vitesse de l'arbre mécanique en présence de défauts

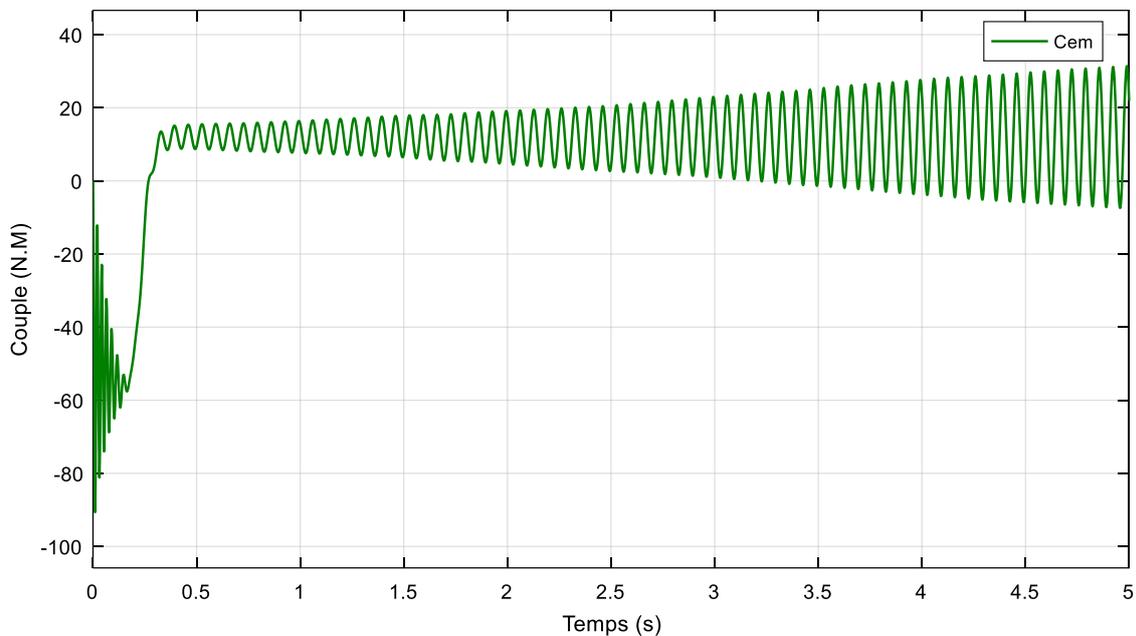


Figure III.22 Le couple électromagnétique en présence de défauts

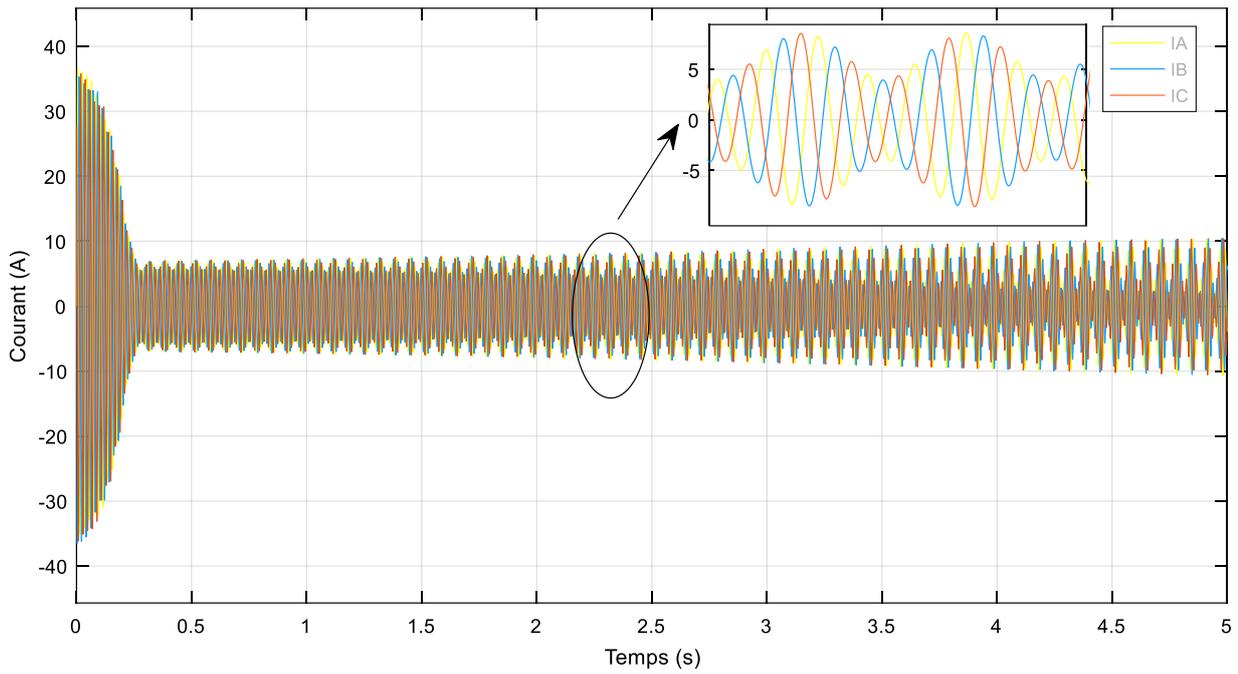


Figure III.23 Le courant statorique en présence de défauts

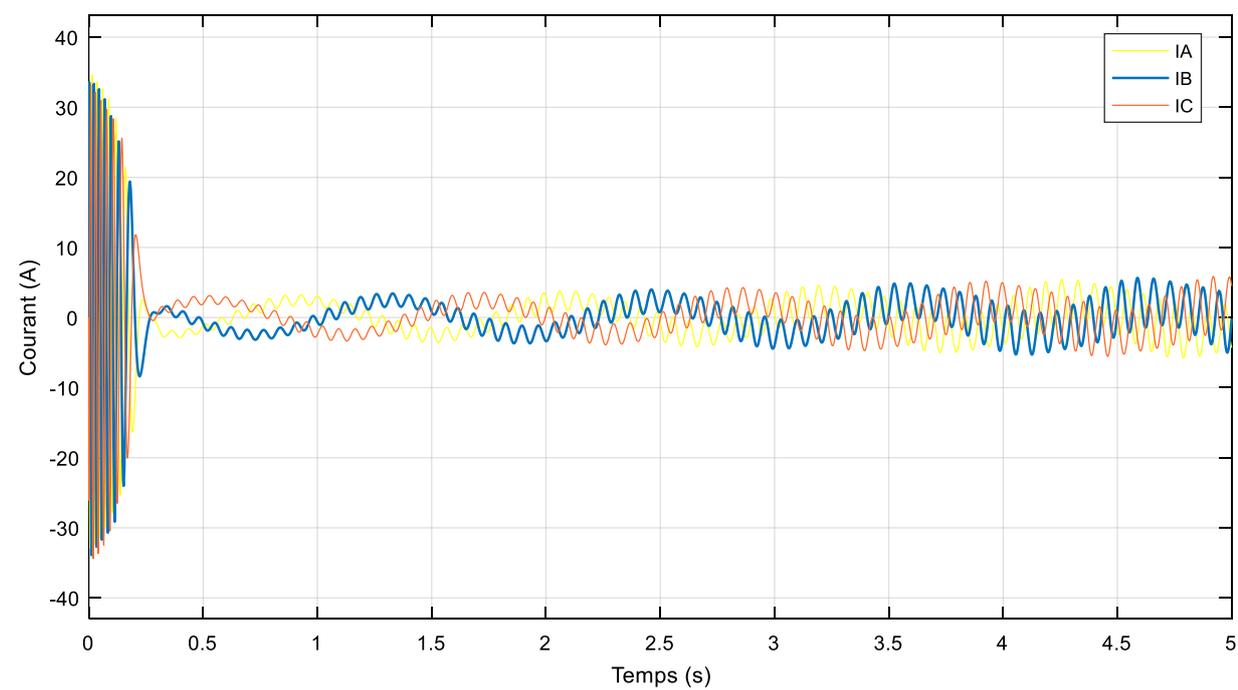


Figure III.24 Le courant rotorique en présence de défauts

III.3.6 L'interprétation en présence des défauts

➤ Défauts de la boîte de vitesse

- La puissance de la turbine :

Dans la figure (III.16), nous avons remarqué une diminution de la puissance générée par la turbine. Cette diminution est causée par l'augmentation du coefficient de frottement, qui réduit la puissance nette générée par la turbine éolienne. Cela entraîne une baisse de l'efficacité globale du système, car une plus grande part de l'énergie captée par les pales est dissipée sous forme de chaleur plutôt que convertie en électricité utile. En pratique, minimiser le frottement est crucial pour maximiser la performance et la production d'énergie des éoliennes.

- La vitesse de l'arbre mécanique :

L'augmentation du coefficient de frottement dans une simulation d'un système éolien entraîne une réduction significative de la vitesse de l'arbre mécanique. Cette augmentation du frottement impose une plus grande résistance aux composants en rotation. Dans la figure (III.17), on remarque que cet effet réduit la vitesse à laquelle l'arbre mécanique peut tourner, car une plus grande partie de l'énergie éolienne est dissipée en chaleur plutôt qu'en énergie mécanique utile. En conséquence, l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique diminue, ce qui affecte négativement la performance globale de la turbine éolienne.

- Le couple électromagnétique :

Dans la figure (III.18) qui représente le couple électromagnétique en présence du défaut, on a remarqué une diminution du couple électromagnétique lorsque le coefficient de frottement augmente, le couple électromagnétique peut initialement diminuer à mesure que les pertes mécaniques augmentent en raison de la résistance accrue. Dans ce cas, la diminution initiale du couple électromagnétique représente l'impact immédiat de l'augmentation du coefficient de frottement, tandis que la stabilisation temporaire reflète les ajustements initiaux du système pour compenser cette augmentation. La dégradation progressive du couple électromagnétique met en évidence les effets à long terme du frottement accru sur les performances du système éolien.

- Le courant statorique :

D'après l'interprétation des résultats de simulation présentés sur la figure (III.19). L'augmentation du coefficient de frottement a diverses répercussions sur le courant statorique. Initialement, une augmentation du frottement peut induire une charge mécanique sur la turbine éolienne. Pour compenser cette augmentation de charge, le système électrique peut nécessiter

une augmentation du courant statorique afin de maintenir une production d'énergie électrique constante. En résumé, l'augmentation du coefficient de frottement est susceptible d'entraîner une élévation du courant statorique pour contrer les effets négatifs du frottement sur la performance globale du système.

- **Le courant rotorique :**

Dans la figure (III.20), nous avons remarqué une augmentation du courant rotorique. Cette augmentation compense l'effet du frottement augmenté. Au départ, cette augmentation du frottement impose une charge mécanique supplémentaire sur le rotor du générateur. En réponse à cette charge, le système électrique ajuste le courant rotorique pour fournir le couple nécessaire au rotor, pour assurant la stabilité du système en maintenant une vitesse de rotation constante malgré la résistance élevée. Ainsi, le système éolien continue de fonctionner de manière optimale, même en présence des défis posés par l'augmentation du frottement.

➤ **Défaut statoriques**

- **La vitesse de l'arbre mécanique :**

Dans la figure (III.21), qui illustre l'influence d'un défaut statorique sur la vitesse de l'arbre mécanique, on observe qu'un défaut statorique, tel qu'un court-circuit partiel dans les enroulements du stator, peut avoir des effets néfastes sur la performance mécanique du système. En conséquence, l'arbre mécanique de la machine peut subir des fluctuations de vitesse. En particulier, la vitesse de l'arbre peut devenir instable, présentant des variations soudaines et imprévisibles. Ces oscillations augmentent la contrainte mécanique sur les composants rotatifs, conduisant à une usure accélérée et potentiellement à des pannes mécaniques. De plus, les variations de vitesse peuvent affecter la synchronisation avec le réseau électrique, compromettant ainsi la qualité de l'énergie fournie.

- **Le couple électromagnétique :**

Un défaut statorique, tel qu'un court-circuit partiel dans les enroulements du stator, peut avoir des conséquences importantes sur le couple électromagnétique produit par la machine. Dans la figure (III.22), des déséquilibres dans le champ magnétique généré par le stator sont montrés, ce qui affecte directement le couple électromagnétique. Ces déséquilibres peuvent provoquer des variations du couple électromagnétique, entraînant des oscillations et une instabilité dans le fonctionnement de la turbine éolienne. En particulier, un court-circuit partiel peut créer des asymétries dans les courants statoriques, modifiant ainsi la distribution du champ magnétique et, par conséquent, la génération de couple.

- **Le courant statorique :**

Dans la figure (III.23), nous avons remarqué une augmentation du courant statorique. Cette augmentation se manifeste par des oscillations, des variations irrégulières et un déséquilibre entre les phases dans le courant statorique. Les variations irrégulières du courant statorique peuvent provoquer des instabilités dans le fonctionnement global de la turbine éolienne, rendant le contrôle de la machine plus complexe.

- **Le courant rotorique :**

Dans la figure (III.24), qui illustre l'influence d'un défaut statorique sur le courant rotorique, nous observons que ce type de défaut peut engendrer des déséquilibres dans le courant rotorique. Ces déséquilibres sont principalement attribuables aux perturbations du champ magnétique résultant du défaut dans les enroulements du stator. En conséquence, le courant rotorique peut afficher des variations non uniformes ainsi que des fluctuations anormales, ce qui perturbe le fonctionnement habituel de la machine.

III.4 Conclusion

Ce chapitre a impliqué la modélisation et la simulation d'un système éolien dans deux contextes distincts : l'état normal et l'état de défaut. L'analyse des résultats obtenus dans ces deux situations offre des perspectives intéressantes sur la performance et la fiabilité du système. Ces modélisations et simulations offrent une vision détaillée des comportements du système éolien dans des conditions normales et défectueuses, soulignant ainsi l'importance de la surveillance continue, de la maintenance préventive et de l'élaboration de stratégies de contrôle robustes pour garantir un fonctionnement optimal et sécurisé des parcs éoliens.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé l'importance cruciale du diagnostic des défauts dans les systèmes éoliens à axe horizontal, en ce basons en premier lieu sur la modélisation des systèmes éoliens qui nous a permis de créer des modèles aérodynamiques, mécaniques et électriques détaillés, nécessaires pour simuler les conditions de fonctionnement et identifier les signatures spécifiques des défauts. Cette modélisation a été la pierre angulaire de notre étude, fournissant une base solide pour les étapes suivantes.

Ensuite, nous avons utilisé le logiciel de simulation Matlab Simulink pour reproduire les conditions normales et défectueuses des éoliennes. Cette étape a été cruciale pour évaluer l'efficacité des techniques de diagnostic, en comparant les performances des systèmes éoliens dans des états de fonctionnement sains et en présence de divers défauts. L'analyse des résultats obtenus a fourni des interprétations claires et précises.

Enfin, la validation des modèles développés a été réalisée en comparant les résultats de simulation pour les conditions de fonctionnement normal et défectueux des éoliennes à axe horizontal. Cette comparaison a permis d'interpréter les différences observées dans chaque cas. Mettant en évidence les différences significatives entre les états normaux et défectueux des éoliennes.

La conclusion de ce mémoire souligne l'importance de la détection précoce des défauts pour garantir une production d'énergie éolienne continue et efficace. En intégrant des techniques de diagnostic avancées basées sur la modélisation et la simulation, Cette approche méthodologique contribue non seulement à réduire les coûts de maintenance, mais aussi à augmenter la disponibilité des systèmes éoliens, renforçant ainsi leur rôle essentiel dans la transition vers une énergie plus durable et respectueuse de l'environnement.

Annex

Paramétré de la turbine éolienne :

Puissance de la turbine simulée : $P=1.9$ kW

L'angle de l'orientation de la pale : $\beta=2^\circ$

Rayon des pales : $R = 1.5$ m

Facteur de gain : $G = 20$

Coefficient aérodynamique : $C_p = 0.39$

Coefficient de frottement : $F_v = 0.0024$

Moment d'inertie : $J = 0.1$

Paramétré de la MADA :

Puissance nominale : $P=1.5$ kW

Vitesse : 1500 tr/min

Fréquence : $F = 50$ Hz

Nombre de pair de pôles : $P = 2$

Tension statorique : $V_s = 220$ v

Tension rotorique : $V_r = 10$ v

Résistance statorique : $R_s = 4.850$ Ohm

Inductance statorique : $L_s = 0.274$ H

Résistance rotorique : $R_r = 3.800$ Ohm

Inductance rotorique : $L_r = 0.274$ H

Bibliographie

- [1] DJAAFRI Nouredine et MANSOUR Sabrina, « Conception d'un émulateur éolien connecté à une MADA », mémoire de MASTER, université ibn khaldoun, tiaret. 2019
- [2] SAFI M. DJERBOB A « *Diagnostic de défauts des machines asynchrone* », Master, Université Ibn Khaldoun , Tiaret, 2023.
- [3] CHERROUN Kamel, « *Etude de la Maintenance Industrielles* », mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.
- [4] LEGOUIRAH Amrane, « *Maintenance industrielle Application au niveau de l'Entreprise SONELGAZ* », mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.
- [5] « *Histoire et évolutions de la maintenance industrielle apprendre en ligne* », <https://mobility-work.com/fr/blog/histoire-maintenance-dans-industrie/> (Consulté le 3 mai 2024)
- [6] « *Définitions : maintenance - Dictionnaire de français Larousse* ». <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/maintenance/48704> (Consulté le 3 mai 2024)
- [7] MELLOUK AYMEN « *optimisation de la maintenance par fiabilité (cas de la mine d'ouenza)* », mémoire de Master, Université Larbi Tebessi , Tébessa, 2023.
- [8] NOUARI Saber, « *Protection et maintenance d'un transformateur industrielle* », mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.
- [9] Moncef BOUCHEMAL, « *Amélioration d'une politique de maintenance en milieu industriel par application d'une approche évaluative Cas de la raffinerie SONATRACH RA2K Skikda* », mémoire de MASTER, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2022.
- [10] BOUDIAF Adel, « *Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multirésolution* », thèses de Doctorat en Sciences, Université 8 mai 1945, Guelma, 2016.
- [11] MEZIANI Nafiâa, BESSAH Mayssa, « *Influence de paramètre de forme de la loi de Weibull sur la politique de maintenance préventive selon l'âge* », mémoire de Master, Université A. MIRA, Bejaia, 2022.
- [12] BOUZOUADA Abdallah, « *Étude et application des techniques de l'intelligence artificielle d'optimisation pour la maintenance des réseaux électriques dans le cadre de la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité)* », thèses de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2021.

- [13] « Niveau de Maintenance Norme Afnor. en ligne » <https://dati-plus.com/niveau-de-maintenance-norme-afnor/> (Consulté le 5 mai 2024)
- [14] « Quels sont les différents niveaux de maintenance Afnor. Apprende en ligne » <https://www.artis-groupe.fr/blog/niveau-de-maintenance-afnor> (Consulté le: 5 mai 2024)
- [15] ABES AMIR, « Les moyen organisationnels et logistique d'une service de maintenance », mémoire de MASTER, , université badji mokhtar. Annaba, 2016
- [16] SEDRATA Lazhar , FERRAH Chams Eddine, « étude et maintenance d'un système solaire photovoltaïque », mémoire de MASTER, University de M'sila , 2021.
- [17] « La Méthode ABC : une variante du calcul des coûts complets. Apprendre en ligne ». <https://www.l-expert-comptable.com/a/51976-la-methode-abc-une-variante-du-calcul-des-couts-complets.html> (Consulté le 5 mai 2024).
- [18] Dr . SAAD mohamed « polycopie Cours Méthodes et Organisation de la Maintenance ». Université Ibn Khaldoun , Tiaret. 2020
- [19] « Méthode des 5M ou diagramme d'Ishikawa .apprendre en ligne ». <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-de-projet/5-m-une-gestion-de-projet-sans-problemes> (Consulté le: 5 mai 2024)
- [20] « les 5 M: La Méthode apprendre en ligne ». <https://www.p permis-de-exploitation.fr/1002-l-Hygiene-alimentaire-Methode.html> (Consulté le: 6 mai 2024)
- [21] HORKOUS Younes et KHOUIDMI Ahmed, « diagnostic des pannes des machines par la technique de l'arbre de défaillance », mémoire de MASTER, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2021.
- [22] Dr. BENAMARA Nabil, « Polycopié pédagogique L'Energie Eolienne », Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès. 2022
- [23] B. Multon , G. Olivier « Etat de l'art des aérogénérateurs ». Disponible sur: <https://hal.science/hal-00674088> (Consulté le: 7 février 2024)
- [24] BENKADDOUR oussama abdelbari et CHERADID aymen, « Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance », Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, 2020.
- [25] « L'énergie éolienne – EVE. ___ Apprendre en ligne ». Disponible sur: <https://www.eve.eus/Actuaciones/Actuaciones/Eolica?lang=fr-fr> (Consulté le: 10 février 2024)
- [26] « Carte du gisement éolien en Algérie - Centre de Développement des Energies Renouvelables, ». Disponible sur: <https://www.cder.dz/spip.php?article1442> (Consulté le: 10 février 2024)

- [27] « *10 modelés Diagramme De Conversion d'Energie Eolienne.apprendre en ligne* ». Disponible sur: <https://www.pinterest.fr/pin/683139837226862882/> (Consulté le: 7 mars 2024)
- [28] Haritza Camblong, « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* ». Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et matière.Centre de Bordeaux.Soutenu le 18/12/2003. France.
- [29] BELABBAS BELKACEM, « *Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local* », mémoire de MAGISTER. université Ibn Khaldoun .Tiaret ,2012.
- [30] Abdelmoumen SACI , « *Diagnostic de Défaits dans une Turbine Eolienne par des Techniques Intelligentes* » THESE DE DOCTORAT. Université Ziane Achour. Djelfa,2022.
- [31] Dr SAIDI Hemza., « *Polycopié de cours Energies Renouvelables.1ère année master électrotechnique.* », polycopié, 2016.
- [32] « *Technologie des éoliennes à axe vertical. Apprendre en ligne* »,Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Technologie-des-eoliennes-a-axe-vertical04_fig6_324929383 (Consulté le: 7 mars 2024).
- [33] Khelfat Lotfi, Maataoui Lakhdar, « *Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée* », MEMOIRE DE MASTER, université badji mokhtar, Annaba, 2017.
- [34] « *Le vrai bilan de l'éolien en France apprendre en ligne* » , <https://atlantico.fr/article/decryptage/le-vrai-bilan-de-l-eolien-en-france-remy-prudhomme>. (Consulté le 7 mars 2024)
- [35] Ziraoui Salah Eddine, « *Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau* », MÉMOIRE MASTER, université badji mokhtar, Annaba, 2017.
- [36] « *les composantes d'une éolienne image hd* ». Disponible sur: <https://www.google.com/search?q=les+composantes+une+éoline>(Consulté le: 27 février 2024)
- [37] « *les compasante d'un parc éoliene | Alterric* ». Disponible sur: <https://www.alterric-france.fr/composants-parc-eolien> (Consulté le: 10 février 2024)
- [38] « *Composition et matériaux* ». Disponible sur: <https://eoliennesecologie.wordpress.com/fabrication/composition-et-materiaux/> (Consulté le: 10 février 2024).

- [39] « *énergie éolienne. apprendre en ligne* ». Disponible sur: <http://college.lutterbach.free.fr/EISE/exposes2013/eolienne/energieeolienne.html> (Consulté le: 10 février 2024)
- [40] M. TAMER Yamina « *Détection de Défauts de la Génératrice Asynchrone a Double Alimentation (DFIG)* » mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie. Oran ,2011
- [41] « *Éolienne : composition, éléments et schéma d'une éolienne* ». Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-constituants-dune-eolienne> (Consulté le: 10 février 2024)
- [42] « *Constitution des éoliennes, apprendre en ligne* ». Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Constitution-des-eoliennes-88-35-Transformation-delenergie-eolienne-Lenergie_fig5_338645817 (consulté le 10 février 2024)
- [43] BELAMRI ABD ELDJALIL « *Simulation d'une turbine éolienne à axe horizontal* », mémoire de MASTER , université badji mokhtar. Annaba, 2018.
- [44] GASMI Mohammed, MEDIANI Abdelkader « *Modélisation et simulation d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation* », mémoire de master, , Université des Sciences et de la Technologie. Adrar, 2014
- [45] BEZZINA Djalel , ZEGHDOUDI Aymen « *Etude, modélisation et commande d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau électrique* », université echahid larbi tebessi. tebessa, 2023
- [46] « *Générateur électrique , apprendre en ligne* ». Disponible sur: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=G%C3%A9n%C3%A9rateur_%C3%A9lectrique&oldid=212343497 (Consulté le: 13 mai 2024)
- [47] Diab Hamza, « *Modélisation et simulation de la turbine éolienne* », MASTER, Université Echahid Hamma lakhdar , El-Oued, 2022.
- [48] « *L'anémomètre et une girouette , apprendre en ligne* » https://ses.automation.fr/rb-wt3000_4-20ma-anemometre-girouette-combine-avec-chauffage-integre-sorties-actives-4-20ma.php (consulté le 12 février 2024)
- [49] « *Énergie éolienne : transformer le vent en électricité apprendre en ligne* ». [https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite](https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite). (Consulté le: 10 février)
- [50] BABAHAMOU HOUCINE, BEHMENE MOHAMMED TAIB, « *Diagnostic Prédictif des Défauts Capteurs Dans un Système Eolienne en Utilisant les Approches d'Apprentissage Automatique* », mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla. 2019

- [51] ATTOUI Issam, « *Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans un chaîne de conversion d'énergie éolienne* », thèse DOCTORAT, , université badji mokhtar, Annaba, 2017
- [52] BAKIRI Rachid , SAIDANI Kenza, « *Pronostic des défauts des éoliennes par la méthode des réseaux de neurones artificiels* », Mémoire de MASTER, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2022.
- [53] El Houssin El Bouchikhi1, et Mohamed Benbouzid , « *Diagnostic des défaillances de génératrices asynchrones d'éoliennes offshores et d'hydroliennes* », Étude comparatives des techniques de traitement de signaux stationnaires, Université de Brest, France
- [54] AIT MIMOUN Abdelkarim, MELOUK M « *modélisation et simulation d'un système éolien* », mémoire de MASTER, centre universitaire salhi ahmed, Naama, 2021
- [55] TOUNSI Oussama et LASKRI Zakaria, « *Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation* », mémoire de MASTER, université badji mokhtar, Annaba, 2018
- [56] ASRI Aicha et AIT ABDELLAH Fatima Zohra, « *Applications des Algorithmes Intelligents à un Système Eolien dédié à la Production d'Electricité aux Sites Isolés* », MASTER, université ibn khaldoun, tiaret. 2015
- [57] Arnaud GAILLARD, « *Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service* », thèses de Doctorat, Faculté des Sciences & Techniques .Vandoeuvre-lès-Nancy, 2010.
- [58] DAHOU Massinissa, et HOUD Yabadas, « *Etude et simulation du comportement d'un générateur éolien base d'une GADA lors d'un creux de tension dans le réseau électrique* », mémoire de MASTER, Université A.MIRA, Bejaia, 2022.
- [59] Cherif Aymen Abdelsamiaa et Boutemra Mehdi, « *Étude et Simulation d'une Ferme Éolienne Connectée au Réseau* », MEMEOIRE DE MASTER, ibn khaldoun_tiarret_, Tiaret, 2019.