



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur

Et de La Recherche Scientifique

Université De Abd Elhamid Ibn Badis

Mostaganem

Département de génie électrique

Faculté des sciences et de technologies

Spécialité Automatique et Informatique Industrielle



Mémoire de fin d'étude

Maintenance prédictive des éoliennes par d'intelligence artificielle

Présenté par :

- Ali PACHA Habiba
- YESSAD Meriem

Encadré par :

Ghomri Leila

Soutenu publiquement le 21/06/2026

Devant le jury :

Dr. BENTOUMI Mohammed
Dr. HENNI Sid Ahmed
Dr. GHOMRI Leila

MCA Université Mostaganem
MAA Université Mostaganem
Professeur Université Mostaganem

Président
Examineur
Encadrante

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2025/2026

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant pour les bienfaits qu'Il nous a accordés, pour la lumière et la guidance qu'Il nous a offertes, ainsi que pour l'aide, la force et la volonté qu'Il nous a données afin d'achever ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrante ,Madame **Leïla Ghomri** pour avoir accepté de superviser ce travail, ainsi que pour son aide précieuse ses encouragements, sa confiance et sa patience tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail. Nous espérons que ce mémoire sera à la hauteur de leurs attentes et témoignera de notre profond respect et de notre reconnaissance.

Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, ainsi qu'à tous ceux qui nous ont souhaité réussite et encouragement durant notre parcours.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants du département de génie électrique pour leurs efforts et les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Enfin, nous n'oublions pas nos parents pour leur soutien, leur patience et leurs sacrifices.

Merci à vous tous.

Dédicace

Je dédie cet humble travail à Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et le courage d'atteindre cette étape de ma vie.

À mes chers parents,

Les mots me manquent pour exprimer ma profonde gratitude pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour ma réussite. Merci pour votre amour, votre patience, votre soutien inconditionnel et vos prières qui m'ont donné la force de persévérer tout au long de mes études. Je prie Dieu de vous préserver, et de vous accorder santé, bonheur et longue vie.

À mes chers frères et sœur,

Pour votre affection, vos encouragements et votre présence à mes côtés, dans les moments difficiles comme dans les instants de joie. Merci pour votre confiance constante en moi.

À toute ma famille,

Pour votre soutien moral, vos précieux conseils et vos prières sincères qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours.

À mes chères amies,

Merci pour tous les moments formidables passés ensemble, ainsi que pour votre soutien, votre aide, vos encouragements et votre présence durant ce voyage académique. Votre amitié restera l'un des souvenirs les plus précieux de cette période.

Et enfin, à moi-même...

Pour tous les efforts fournis afin d'atteindre cette étape, pour ma patience durant les moments de doute, et pour la force dont j'ai fait preuve malgré la fatigue et les incertitudes.

Pour toutes les nuits blanches de travail, pour les sacrifices silencieux, pour les moments difficiles et pour les défis que j'ai surmontés avec courage et détermination.

Aujourd'hui, je suis fière du chemin parcouru et de tout ce que j'ai accompli. Cette thèse représente bien plus qu'un simple projet de fin d'études ; elle est le reflet de plusieurs années de persévérance, d'espoir et de volonté.

Ali Pacha Habiba

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail, réalisé grâce à Dieu Tout-Puissant, à toutes les personnes que j'aime et estime profondément

À mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur patience et leur soutien permanent afin de me voir réussir dans la vie.

À mes frères et sœurs, qui ont toujours été une source d'encouragement et de soutien.

À toutes les personnes qui occupent une place particulière dans mon cœur, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mes années d'études.

Je dédie également ce travail à moi-même, en reconnaissance des efforts, de la patience et des difficultés que j'ai surmontée pour atteindre cette étape et accomplir ce travail.

Enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce mémoire j'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

Yessad Meriem

المخلص:

تتمحور هذه المذكرة حول تطبيق استراتيجية الصيانة التنبؤية لتوربينات الرياح باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، بهدف تحسين الموثوقية التشغيلية والحد من توقفاتها المفاجئة. وقد ركز العمل على دراسة وفهم السلوك الديناميكي للتوربينات وذلك عبر الاعتماد على المحاكاة ونمذجة النظام في برنامج ماتلاب بالكامل مع الحلول البرمجية الذكية المعتمدة على معالجة البيانات بالذكاء الاصطناعي ضمن بيئة أناكوندا وواجهة سبايدر.

وقد أتاح هذا الدمج التكنولوجي رصد السلوك غير الطبيعي للتوربينات والكشف المبكر عن الاختلالات الميكانيكية والكهربائية قبل تفاقمها وتحولها إلى أعطال حقيقية من خلال تحليل نتائج المحاكاة والنماذج المطورة.

الكلمات المفتاحية: الصيانة التنبؤية – توربينات الرياح – الذكاء الاصطناعي – محاكاة ماتلاب – بيئة أناكوندا سبايدر – تشخيص الأعطال – تحليل البيانات

Abstract:

This thesis focuses on the application of a predictive maintenance strategy for wind turbines using artificial intelligence techniques, aiming to enhance operational reliability and minimize unscheduled downtime. The work concentrates on studying and understanding the dynamic behavior of turbines through simulation and system modeling in MATLAB, integrated with intelligent software solutions

.based on AI data processing within the Anaconda environment and Spyder interface

This technological integration enables the detection of abnormal turbine behavior and the early identification of mechanical and electrical anomalies before they escalate into actual failures, through

.the analysis of simulation results and the developed models

Keywords: Predictive Maintenance – Wind Turbines – Artificial Intelligence – MATLAB Simulation

.Anaconda Spyder Environment – Fault Diagnosis – Data Analysis –

Liste des figures

Figure I.1 : Les niveaux de maintenance.....	06
Figure I.2 : les types de la maintenance.....	07
Figure II.1 : éolienne de Charles F. Brush en 1887.....	16
Figure II.2 : éolienne de Paul La Cour en 1819.....	16
Figure II.3 : Types et stades de développement des éoliennes.....	17
Figure II.4 : Eolienne axe vertical.....	17
Figure II.5 : Eolienne axe horizontale.....	18
Figure II.6 : Principe de conversion d'énergie mécanique électrique.....	18
Figure II.7 : Principaux composants de l'éolienne.....	19
Figure II.8 : les pales d'éolienne.....	20
Figure II.9 : Moulage d'une pale d'éolienne.....	20
Figure II.10 : Arbre primaire d'éolienne.....	21
Figure II.11 : Multiplicateur de vitesse.....	21
Figure II.12 : Arbre secondaire d'éolienne.....	22
Figure II.13 : Générateur d'éolienne.....	22
Figure II.15 : Outils de mesure de la vitesse et le vent.....	23
Figure II.16 : Le refroidissement de la génératrice et le multiplicateur.....	23
Figure II.17 : Système d'orientation montré en rouge monté sur le mât.....	24
Figure II.18 : Le mât acier.....	25
Figure II.19 : Le mât béton.....	25
Figure III.1 : Modèle de simulation d'un système éolien.....	34
Figure III.2 : Profil du vent appliqué à la turbine (m/s).....	34
Figure III.3 : le couple mécanique (T_m).....	35
Figure III.4 : La vitesse rotorique (mW).....	36
Figure III.5 : Analyse de tension (V).....	36
Figure III.6 : Analyse de courant (A).....	37
Figure III .7 : fluctuations brusques du vent.....	38
Figure III.8 : Le couple mécanique en présence de défaut.....	38
Figure III.9 : La vitesse rotorique en présence de défaut.....	39
Figure III.10 : La tension en présence de défaut.....	39
Figure III.11 : Le courant en présence de défaut.....	40
Figure III.12 : Schéma bloc de défaut de générateur.....	40
Figure III.13 : Le courant en présence de défaut.....	41
Figure III.14 : La tension en présence de défauts.....	41

Figure III.15 : La vitesse rotorique en présence de défaut.....	42
Figure III.16 : Le couple mécanique en présence de défaut.....	43
Figure IV.1 : Exemple des données de fichier CSV utilisées.....	47
Figure IV.2 : Organigramme détection de pannes.....	48
Figure IV.3 : La matrice de confusion.....	53
Figure IV.4 : Le graphique fonctionnalité Importance.....	54
Figure IV.5 : La matrice de confusion.....	59
Figure IV.6 : Le graphique fonctionnalité Importance.....	60
Figure IV.7 : L'éolienne à axe horizontal de type Hilton RE570.....	66
Figure IV.8 : surveillance et détection des défauts d'une éolienne avec Arduino.....	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les avantages et inconvénients de la maintenance (tous les types)	12
Tableau II.1 : Les dysfonctionnements les plus courants dans les éoliennes.....	26

Liste des symboles

- A : courant électrique (Ampère)
- AC : Courant alternatif
- Arduino Uno : Carte électronique programmable
- CSV : Comma-Separated Values
- D : traînée (N)
- E_c : énergie cinétique (J)
- F1-score : Mesure de performance d'un modèle de classification
- IA : Intelligence Artificielle
- IDE : Integrated Development Environment
- Kaggle : Plateforme de données et d'apprentissage automatique
- L : longueur des pales (m)
- M : masse du volume d'air (kg)
- M/s : vitesse du vent (mètre par seconde)
- NumPy : Bibliothèque Python de calcul numérique
- P : puissance mécanique (W)
- Pandas : Bibliothèque Python d'analyse de données
- R : rayon de pale (m)
- Rad : angle en radians
- Random Forest : Algorithme d'apprentissage automatique
- S : surface des pales (m²)
- SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition
- Scikit-Learn : Bibliothèque Python d'apprentissage automatique
- T_m : couple mécanique
- V : tension électrique (Volt)
- V : vitesse instantanée du vent (m/s)
- V : volume d'air occupé (m³)
- V CC : Volt tension continu
- V_t : vitesse tangentielle (m/s)
- α : angle d'attaque des pales (°)
- Γ : couple mécanique (N.m)
- η : nombre de pales

- ξ : portance (N)
- ρ : masse volumique de l'air (kg/m^3)
- ω : vitesse angulaire du rotor (rad/s)

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Notions sur la maintenance industrielle	3
I.1. Introduction	4
I.2. La définition de la maintenance	4
I.3. Evolution de la notion de maintenance	4
I.4. Rôle de la maintenance.....	5
I.5. Les niveaux de maintenance	6
I.6. Les types de la maintenance	7
I.6.1. Maintenance corrective.....	7
a. Définition	7
b. Principe	7
c. Les diverses formes de maintenance corrective	7
d. Les actions liées à la maintenance corrective	8
I.6.2. Maintenance préventive.....	8
a. Définition	8
b. Principe	8
c. Les diverses formes de maintenance préventive.....	8
d. Les opérations de la maintenance préventive comprennent plusieurs activités clés:.....	9
I.6.3. Maintenance prédictive.....	9
a. Définition	9
b. Principe	9
c. Les différents types de maintenance prédictive.....	10
• Analyse des Huiles et Fluides :.....	10
• Analyse Acoustique et par Ultrasons :.....	10
• Analyse Électrique :	10
• Maintenance Prédictive par IA :	10
I.6.4. Maintenance améliorative.....	10
a. Définition	10
b. Principes Clés de la Maintenance Améliorative.....	11
c. Principaux types et actions	11
I.7. Avantages et inconvénients de la maintenance :.....	12
I.8. Domaines d'application de la maintenance dans les systèmes électriques	13
a. Production d'énergie électrique :	13
b. Transport et distribution d'électricité :	13
c. Installations électriques industrielles :	13
d. Bâtiments et installations tertiaires :	13
e. Systèmes électriques spécifiques :	13
f. Maintenance des équipements de protection et contrôle :	14

I.9.	Maintenance et Sécurité.....	14
•	Rôle de la maintenance dans la sécurité :	14
•	Mesures de sécurité lors des opérations de maintenance :	14
I.10.	Conclusion.....	15
Chapitre II : L'énergie éolienne		16
II.1.	Introduction	17
II.2.	Historique de L'éolienne	17
II.3.	Les différents types d'éolienne	18
➤	Par axe de rotation :	18
❖	Les éoliennes à axe horizontale :	18
II.4.	Principes de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique	19
II.5.	Principaux composants d'une éolienne.....	20
II.5.1.	Les pales	20
II.5.2.	Arbre primaire.....	21
II.5.3.	Multiplicateur.....	22
II.5.4.	Arbre rapide ou arbre secondaire.....	22
II.5.5.	Générateur Asynchrone	23
II.5.6.	Contrôleur électronique	23
II.5.7.	Outils de mesure.....	24
II.5.8.	Refroidissements	24
II.5.9.	Système d'orientation	25
II.5.10.	Mât (ou tour).....	25
II.6.	Les dysfonctionnements les plus courants dans les éoliennes	26
II.7.	La modélisation mathématique des éoliennes	27
II.7.1.	Energie cinétique.....	27
II.7.2.	Energie théoriquement récupérable	27
II.7.3.	Limite de Betz.....	28
II.7.4.	Vitesse angulaire du rotor	29
II.7.5.	Vitesse tangentielle.....	30
II.7.6.	Couple mécanique produit par l'éolienne	30
II.7.7.	Couple moteur.....	31
II.8.	Conclusion.....	31
Chapitre III : Simulation des défauts dans une turbine éolienne		32
III.1.	Introduction	33
III.2.	Matlab Simulink	33
III.3.	Représentation du modèle	33
III.3.1.	Analyse de la vitesse du vent	34
III.3.2.	Analyse du couple mécanique.....	35
III.3.3.	Analyse de la vitesse du rotor	35
III.3.4.	Analyse de tension	36
III.3.5.	Analyse de courant.....	36

III.4.	Étude du comportement du système en régime de défaut	37
III.4.1.	Défauts de vent.....	37
III.4.1.1	Analyse du vent et le couple	37
III.4.1.2.	Analyse de la vitesse du rotor.....	38
III.4.1.3.	Analyse de la tension et le courant	39
III.4.2.	Défaut au niveau du générateur.....	40
III.4.2.1.	Analyse de courant	41
III.4.2.2.	Analyse de tension.....	41
III.4.2.3.	Analyse de la vitesse	42
III.4.2.4.	Analyse le couple (T_m).....	42
III.5.	Conclusion.....	43
IV1	Introduction	45
IV3	Anaconda et introduction à l'interface utilisateur de Spyder.....	46
IV4	Protocole de Collecte des Données de Simulation	46
VI.3.1.	Application à l'éolienne :	47
IV5	L'organigramme de programme python	48
IV6	Analyse des résultats du système aérodynamique et électrique.....	49
IV6.1	Préparation et traitement des données :	49
IV.5. 2.	Génération des caractéristiques (Ingénierie des fonctionnalités).....	49
IV5.3	Performance du modèle Random Forest.....	50
IV.5.3.3	Comparaison entre Précision d'entraînement et de test.....	51
IV5.4	Analyse du rapport de classification.....	51
IV.5. 4.1	Classe Normal	51
IV.5.4.2	Classe défaut1 (Défaut du vent)	52
IV.5.4.3	Classe défaut 2 (Défaut électrique).....	52
IV5.5	Analyse de la matrice de confusion.....	52
IV5. 6.	Analyse du graphique fonctionnalité Importance.....	54
IV5.7.	Analyse du diagnostic final.....	55
IV5.7.1	Détection du défaut aérodynamique	55
	Interprétation :.....	55
7.2	Détection du défaut électrique	55
IV5.8	Analyse du système d'alerte intelligent	56
IV5.8.1	Fonctionnement du système d'alerte	56
IV5.8.2	Exemple d'alerte obtenue	57
IV.6	Analyse des résultats du système de la boîte de vitesses.....	57
IV6.2	Prétraitement des données	58
IV6.3	Génération des caractéristiques (Ingénierie des fonctionnalités)	58
IV6.4	Résultats du modèle Random Forest	58
IV6.5	Analyse du rapport de classification.....	58
IV6.6	Analyse de la matrice de confusion	59
IV6.7.	Analyse du graphique fonctionnalité Importance	60

IV.6.8	Analyse du système d’alerte intelligent	60
IV.6.9	Importance du système d’alerte.....	61
IV.7.	Programme Python – Diagnostic des défauts aérodynamiques et électriques :	62
IV.8	Programme Python – Diagnostic des défauts mécaniques de la boîte de vitesses	64
	Les résultats :	64
IV.9.	Perspectives de notre projet :	66
IV.9.1.	Caractéristiques techniques de la plateforme éolienne Hilton RE570 :	66
IV.9.2	Méthodologie de développement et perspectives de recherche.....	67
IV.10.	Conclusion :	68
	Conclusion Générale.....	69
Annexe :		70
	. Programme Python – Diagnostic des défauts mécaniques de la boîte de vitesses	76
	Références Bibliographiques	82

Introduction générale

Avec l'augmentation mondiale de la demande énergétique et les préoccupations environnementales liées aux énergies fossiles, les énergies renouvelables occupent aujourd'hui une place essentielle dans la production d'électricité. Parmi ces sources, l'énergie éolienne représente l'une des solutions les plus prometteuses grâce à sa disponibilité, son faible impact environnemental et sa capacité de production à grande échelle.

Cependant, les éoliennes fonctionnent dans des conditions climatiques variables et sont soumises à des contraintes mécaniques et électriques importantes. Ces conditions peuvent provoquer différents types de défaillances, tels que les défauts aérodynamiques, les déséquilibres électriques, les courts-circuits ou encore les anomalies mécaniques. Ces pannes entraînent des pertes de production, des coûts de maintenance élevés ainsi qu'une diminution de la durée de vie des équipements.

Dans ce contexte, la maintenance prédictive apparaît comme une solution intelligente permettant de surveiller l'état de fonctionnement des éoliennes et de détecter les anomalies avant l'apparition de défaillances critiques. Contrairement à la maintenance corrective ou préventive classique, cette approche repose sur l'analyse continue des données issues des capteurs afin d'anticiper les pannes et d'optimiser les opérations de maintenance.

L'évolution récente des techniques d'intelligence artificielle et du Machine Learning a considérablement amélioré les performances des systèmes de diagnostic et de détection des défauts. Grâce à leur capacité d'apprentissage à partir des données industrielles, ces méthodes permettent d'identifier automatiquement les comportements anormaux avec une grande précision.

Dans ce travail, nous proposons un système intelligent de maintenance prédictive appliqué aux éoliennes basées sur des techniques de Machine Learning. Le système exploite des données simulation contenant plusieurs paramètres de fonctionnement tels que la vitesse du vent, la vitesse du rotor, les courants électriques et le couple mécanique. Après une phase de prétraitement et de génération de caractéristiques (*Feature Engineering*), un modèle de classification de type *Random Forest* (Forêt aléatoire) est entraîné afin de détecter différents états de fonctionnement : fonctionnement normal, défaut aérodynamique lié au vent et défaut électrique de type court-circuit.

En complément du diagnostic, un système d'alerte intelligent a été développé afin de signaler automatiquement les défauts détectés, d'identifier leur localisation probable et de fournir une estimation de confiance associée à chaque prédiction.

L'objectif principal de cette étude est donc de développer une approche fiable et intelligente permettant d'améliorer la surveillance des éoliennes, de réduire les coûts de maintenance et d'augmenter la disponibilité des systèmes de production d'énergie éolienne.

Chapitre I : Notions sur la maintenance industrielle

I.1. Introduction

La maintenance, ayant pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des équipements, s'appuie sur des moyens techniques particuliers.

En effet la maintenance joue un rôle clé au sein des entreprises, où de nouvelles façons d'agir ont commencé à émerger peu à peu chaque jour, la pression monte pour faire baisser les dépenses liées à la fabrication. Pourtant, piloter ce domaine demande une attention sans faille. Ce n'est pas seulement une question d'argent, c'est aussi un défi organisationnel permanent. Ce qui change maintenant, c'est que sa mission ne se limite pas à remettre en état le matériel utilisé au quotidien, mais surtout anticiper les problèmes qui peuvent survenir, et ceci devient essentiel pour la bonne marche de l'entreprise.

Dans le système des éoliennes, la maintenance est un élément clé pour assurer la continuité de la production d'énergie avec un rendement élevé et pour réduire les pannes soudaines, en s'appuyant sur une maintenance prédictive et améliorative afin de maintenir les performances de la turbine et d'allonger sa durée de vie opérationnelle.

➤ Dans ce chapitre, nous aborderons la maintenance, son fonctionnement et son rôle essentiel au sein des usines et des entreprises, en passant en revue ses types et ses domaines d'application dans le système électrique.[1]

I.2. La définition de la maintenance

La maintenance est l'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. La fonction maintenance a pour but de garantir la disponibilité des équipements de production [2]

I.3. Evolution de la notion de maintenance

De 1960 à 1980, personne n'accordait vraiment d'importance à la maintenance dans l'industrie. Elle traînait loin derrière les priorités, vue plutôt comme un mal nécessaire. Quand une machine s'arrêtait net, là seulement on pensait à intervenir. Ce rôle était souvent jugé mince, presque secondaire. On agissait après le drame, jamais avant. Pas de prévention, juste des réparations en urgence. L'idée même de surveiller à l'avance semblait absente. Les pannes dictaient seules le rythme du travail.

La sécurité est devenue une préoccupation centrale pour les entreprises. C'est pourquoi elles ont commencé à renforcer leur attention vers la maintenance. Du fait que les équipements se sont complexifiés avec des systèmes plus avancés, les dangers ont grandi en

parallèle. Face à cette montée des menaces, les organisations ont cherché à réduire sérieusement les chances d'accidents.

Voilà pourquoi l'entretien des machines pèse davantage dans les usines, avec l'apparition progressive de règles précises. L'investissement dans cette démarche ne vise pas seulement la réduction des coûts, mais s'inscrit également dans une volonté d'améliorer le bien-être des ouvriers."

De 1980 à 2000, l'univers de l'industrie change peu à peu, partout En matière de maintenance des équipements, de nouvelles approches organisationnelles ont émergé, modifiant en profondeur la gestion de cette fonction au sein des entreprises. Aujourd'hui, les sociétés tentent de marquer leur place dans un environnement concurrentiel tendu, fort de plusieurs années d'avancées technologiques. Elles mettent chacune leurs propres méthodes en œuvre pour renforcer la supervision technique, visant ainsi moins d'interruptions, une meilleure performance des outils, aussi bien en rendement qu'en précision.[3]

I.4. Rôle de la maintenance

La maintenance doit garantir la rentabilité des investissements en équipements de l'entreprise, tout en préservant le potentiel opérationnel et en respectant la stratégie établie par l'entreprise.

La fonction de maintenance devra donc prendre en compte les :

- Planification à long terme : En rapport avec la stratégie de l'entreprise et facilitant la planification des coûts, des inventaires et des acquisitions d'équipement.

Projection à moyen terme :

- Le désir de préserver la capacité opérationnelle de l'entreprise implique une attention particulière à la minimisation des perturbations causées par les équipements sur le programme de production ;
- Anticipation à court terme : Dans ce scénario, le service de maintenance travaillera pour minimiser les temps d'arrêt de l'équipement et les dépenses liées à ses interventions.

Il est essentiel de préparer le travail et d'examiner les conditions opérationnelles, les pannes potentielles et les modalités de mise en œuvre des interventions, étant donné que les économies de coûts et d'immobilisation ne peuvent être réalisées que si le matériel et les interventions sont préalablement étudiés.[4]

I.5. Les niveaux de maintenance

Les niveaux de la maintenance sont représentés dans la figure ci-dessous :

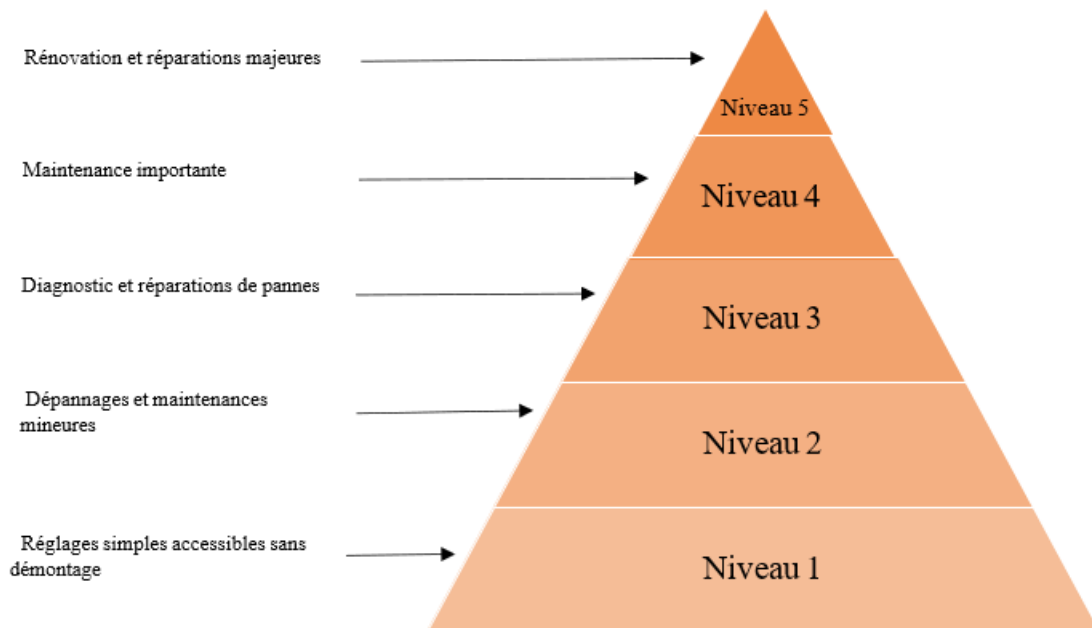


Figure I.1 : Les niveaux de maintenance

- **Niveau 1** : ajustements simples prévus par le fabricant à l'aide de composants accessibles sans nécessiter le démontage ou l'ouverture de l'équipement, remplacement d'éléments consommables facilement réalisable en toute sécurité (voyants, certains fusibles, etc.).
- **Niveau 2** : interventions de dépannage par échange standard et actions mineures d'entretien préventif. Par exemple, lubrification et vérification du bon état de fonctionnement.
- **Niveau 3** : détection et diagnostic des dysfonctionnements, réparation par substitution de composants ou d'éléments, réparations mécaniques mineures ainsi que toutes les interventions standards de maintenance préventive.
- **Niveau 4** : travaux significatifs de maintenance corrective ou préventive, exclusivement la rénovation et la reconstruction.
- **Niveau 5** : Rénovation, réhabilitation ou réalisation de réparations majeures déléguées à un centre de services ou une unité externe.[5]

I.6. Les types de la maintenance

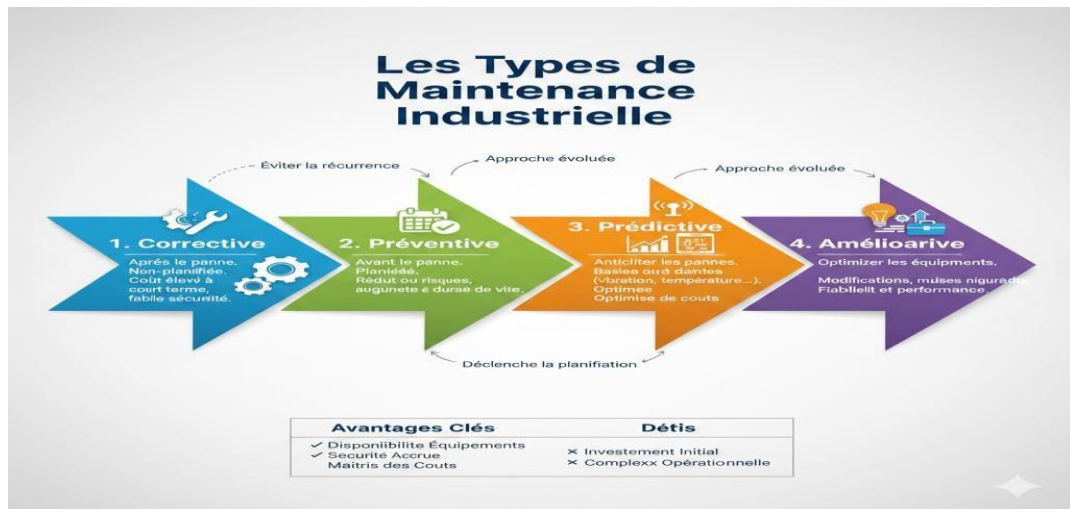


Figure I.2 : les types de la maintenance

I.6.1. Maintenance corrective

a. Définition

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.[6]

b. Principe

Quand une machine tombe en panne, c'est là que commence la maintenance corrective. Elle repère ce qui ne marche plus, cherche pourquoi ça a lâché, ensuite elle répare ou change la pièce fautive pour remettre l'engin en route. Parfois on agit tout de suite si c'est critique, parfois on attend un peu quand le problème reste tolérable pour la production ou sans danger évident.[7]

c. Les diverses formes de maintenance corrective

- ❖ **Maintenance palliative** : Ce sont des actions de maintenance correctives visant à permettre à un équipement d'exécuter temporairement tout ou partie d'une fonction nécessaire. Aussi connu sous le nom de dépannage, ce type de maintenance est principalement composé d'interventions temporaires qui doivent être suivies de mesures curatives.
- ❖ **Maintenance corrective** : Activités de maintenance visant à restaurer un bien à un état spécifié ou à lui donner la capacité d'exécuter une fonction requise. Les résultats des activités menées doivent démontrer une nature durable. Ces actions peuvent consister à effectuer des réparations, des modifications ou des aménagements visant à éliminer la défaillance.[8]

d. Les actions liées à la maintenance corrective

- ❖ **Le dépannage** : Intervention sur un équipement défectueux pour le rétablir en état de marche ; étant donné l'objectif, une opération de dépannage peut tolérer des résultats temporaires et des conditions d'exécution qui ne respectent pas les normes de procédures, de coûts et de qualité. Dans ce contexte, cela sera suivi d'une réparation.
- ❖ **La réparation** : action corrective et finale de maintenance à la suite d'une panne ou un dysfonctionnement.[9]

I.6.2. Maintenance préventive**a. Définition**

Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.[2]

- L'objectif de la maintenance préventive demeure de réduire la probabilité de défaillance.

b. Principe

Avant que les machines ne tombent en panne, on s'occupe d'elles à dates fixes. Parfois ce sont les heures passées en marche qui déclenchent l'intervention. D'autres fois, c'est le nombre de tours effectués. Ou bien encore la distance parcourue Cette démarche repose sur une surveillance fréquente, des vérifications rapides, un nettoyage régulier et des ajustements précis. Tout cela garde les outils opérationnels plus longtemps. Leur bon état se prolonge. Moins de pannes surviennent. Elles restent disponibles pour servir. Leur fiabilité tient avec soin.[10]

c. Les diverses formes de maintenance préventive

- ❖ **Systématique** : Réalisée à des périodes fixes ou selon une quantité déterminée d'unités d'utilisation, sans vérification préalable de la condition du bien (EN 13306 : avril 2001).[6]
- ❖ **Conditionnelle** : Fondée sur l'observation du fonctionnement de l'actif et/ou des indicateurs significatifs de ce fonctionnement, y compris les mesures qui en résultent.[4]

d. Les opérations de la maintenance préventive comprennent plusieurs activités clés:

- Contrôles : Activités de vérification visant à détecter des irrégularités sans avoir besoin d'interrompre le fonctionnement de l'équipement ;
 - Visites : Contrôle régulier basé sur un calendrier précis, qui peut exiger le démontage ou l'arrêt du matériel ;
 - Vérifications : Contrôle de la conformité avec décision sur l'approbation, le refus ou le report d'opérations ;
 - Révisions : Examen et interventions pour prévenir des défaillances majeures, incluant des révisions partielles et générales, conformément à la norme X60-011 ;
 - Échanges standards : Substitution d'un élément usé par un nouvel élément ou sa restauration à son état original, le coût étant fixé sur la base de la remise en état.
- Ces actions ont pour but de contrôler la progression de l'état des appareils à des fréquences régulières ou non, en fonction de leur utilisation.[4]

I.6.3. Maintenance prédictive**a. Définition**

La maintenance prédictive consiste à anticiper les défaillances à venir sur un équipement, un objet, un système, etc. Concrètement, il s'agit d'aller au-devant d'une panne ou d'un dysfonctionnement grâce au cumul d'un ensemble de données.[6]

b. Principe

Souvent, les machines présentent des signes avant l'apparition de la panne. Des capteurs analysent ces signaux en mesurant la vibration, la température ou le bruit. Au lieu d'attendre une panne, on surveille ce flux continu d'informations. Progressivement, des programmes apprennent à reconnaître ce que cache chaque anomalie. Quand un comportement change, même légèrement, il peut sonner l'alerte bien plus tôt grâce à des calculs basés sur des habitudes répétées. Ainsi, l'intervention arrive avant le pire, guidée par des indices invisibles autrefois.[11]

- Les données collectées par les capteurs peuvent inclure :
- Les vibrations
 - La température
 - La pression
 - Le débit
 - L'usure

c. Les différents types de maintenance prédictive

- **Analyse des Vibrations :**

- Permet de détecter l'usure ou les dysfonctionnements à travers les vibrations des moteurs, pompes, et turbines ;
- Avertit avant que les problèmes ne s'aggravent.

- **Thermographie :**

- Utilise des caméras infrarouges pour repérer les zones surchauffées, signalant des tensions ou des frottements anormaux, notamment dans les transformateurs et moteurs ;
- Anticipe les pannes en visualisant des détails invisibles.

- **Analyse des Huiles et Fluides :**

- Examine l'état de l'huile pour identifier l'usure des pièces ;
- Un suivi régulier aide à prévenir des incidents graves.

- **Analyse Acoustique et par Ultrasons :**

- Écoute les bruits d'air et détecte des défauts mécaniques au niveau des pompes et vannes ;
- Utile pour repérer des fissures invisibles.

- **Analyse Électrique :**

- Observe les courant et tension pour déceler des anomalies dans les circuits, comme pour les moteurs électriques ;
- Détecte les problèmes avant qu'ils n'affectent les machines.

- **Maintenance Prédictive par IA :**

- Utilise des algorithmes pour anticiper les ruptures grâce à l'analyse des données ;
- Permet une gestion plus efficace et moins coûteuse des opérations.[12]

I.6.4. Maintenance améliorative**a. Définition**

L'amélioration des équipements consiste en « un ensemble de mesures techniques, administratives et de gestion, visant à optimiser la fiabilité d'un équipement sans modifier sa fonction requise ».[6]

b. Principes Clés de la Maintenance Améliorative

- ❖ **Stratégie proactive** : À l'opposé de la maintenance corrective qui intervient après les défaillances, l'amélioration vise à apporter des modifications pour empêcher les dysfonctionnements futurs et optimiser les performances ;
- ❖ **Changement de conception** : Cela comprend des rénovations, des reconstructions ou l'intégration de composants afin d'améliorer les performances (par exemple : ajout de capteurs, utilisation de matériaux plus résistants).[13]

c. Principaux types et actions

- ❖ **Actualisation** : Substitution de pièces désuètes par des technologies plus modernes (par exemple : capteurs, automates) ;
- ❖ **Changement de conception** : Changement technique visant à supprimer des faiblesses structurelles ou des raisons de défaillances répétées ;
- ❖ **Amélioration de la facilité de maintenance** ;
- ❖ **Changements pour améliorer l'accessibilité et diminuer le temps d'intervention** (par exemple : ajout de points de lubrification) ;
- ❖ **Standardisation** : Normalisation des éléments pour simplifier la gestion des inventaires et l'entretien ;
- ❖ **Amélioration des processus** : Modifications visant à accroître la rapidité ou la qualité de production. [14]

I.7. Avantages et inconvénients de la maintenance :**Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de la maintenance.[15][16]**

Les types	Avantages	Inconvénients
Corrective	- Faible coût de maintenance	- Coût de réparation important. - Peu de sécurité des travailleurs.
Préventive	- Une augmentation de la longévité du matériel. - Un coût des réparations moins élevé.	- Ne détecte pas tous les problèmes. - La mise en place d'une nouvelle organisation
Prédictive	- Longévité des Équipements : Surveiller en continu pour prévenir les pannes. - Renforcement de la sécurité : Identification des risques pour un lieu de travail plus sécurisé.	- Elle peut entraîner un coût élevé à cause des contrôles et remplacements périodiques des pièces. - L'arrêt programmé des machines pour la maintenance peut réduire temporairement la production.
Améliorative	- Meilleure productivité et sécurité du personnel. - Réduction des coûts de maintenance à long terme.	- Problèmes de compatibilité avec les équipements existants. - Difficulté de planification.

I.8. Domaines d'application de la maintenance dans les systèmes électriques

a. Production d'énergie électrique :

Maintenance des équipements de production :

- Alternateurs ;
- Turbines (hydrauliques, vapeur, gaz, éoliennes) ;
- Systèmes d'excitation ;
- Transformateurs de puissance

➤ Objectif : assurer la continuité de production et éviter les arrêts imprévus.

b. Transport et distribution d'électricité :

- Lignes haute et moyenne tension ;
 - Postes électriques ;
 - Transformateurs ;
 - Disjoncteurs et sectionneurs ;
 - Parafoudres.

➤ Objectif : garantir la sécurité et la stabilité du réseau électrique.

c. Installations électriques industrielles :

- Tableaux électriques ;
- Moteurs électriques ;
- Variateurs de vitesse ;
- Automates programmables (API/PLC) ;
- Câblage industriel.

➤ Objectif : éviter les pannes qui arrêtent la production.

d. Bâtiments et installations tertiaires :

- Installations basse tension ;
- Éclairage ;
- Groupes électrogènes ;
- Systèmes de sécurité (alarme, incendie) ;
- Ascenseurs.

➤ Objectif : Assurer la continuité de service, la sécurité des usagers et le confort au sein des établissements.

e. Systèmes électriques spécifiques :

- Énergies renouvelables (éoliennes, panneaux solaires) ;
- Systèmes UPS (alimentation sans interruption) ;

- Systèmes de batteries ;
- Systèmes de commande et protection ;
- Objectif : Viser à mieux préserver les machines.

f. Maintenance des équipements de protection et contrôle :

- Relais de protection ;
- Systèmes SCADA ;
- Capteurs et instruments de mesure.
- Objectif : Viser à éviter les pannes d'électricité tout en bloquant les surtensions.[17]

I.9. Maintenance et Sécurité

Quand on s'occupe de l'équipement, tout tourne plus rond. Les choses tiennent longtemps si elles sont vues régulièrement. Moins de mauvaises surprises arrivent quand chaque détail est suivi avec attention.

- **Rôle de la maintenance dans la sécurité :**
 - Prévention des pannes dangereuses ;
 - Détection précoce des défauts ;
 - Réduction des risques d'incendie et d'explosion ;
 - Protection des travailleurs ;
 - Respect des normes de sécurité.
- **Mesures de sécurité lors des opérations de maintenance :**
 - Coupure et consignation électrique ;
 - Port des équipements de protection individuelle (EPI) ;
 - Respect des procédures de travail ;
 - Signalisation des zones dangereuses
 - Formation du personnel. [18]

I.10. Conclusion

En conclusion, il s'agit d'explorer la maintenance, son rôle et son importance cruciale dans nos usages et nos entreprises. Différents types de maintenance existent :

Corrective, préventive et itérative, chacune présentant des caractéristiques, des avantages et des inconvénients.

La maintenance ne vise pas uniquement à rectifier les pannes, mais également à supprimer les vulnérabilités, à sauvegarder les installations, à garantir la sûreté et à maintenir l'excellence de la production.

Dans le cas des fermes éoliennes, la présence des capteurs, le système de surveillance intelligent permettent d'appliquer, la maintenance prédictive et améliorative d'une manière efficace le fonctionnement

Dans le deuxième chapitre, Nous expliquerons leur fonctionnement, identifierons leurs composants et explorerons leurs applications. Ce chapitre sera également l'occasion de découvrir comment fonctionnent les éoliennes et ceci pour bien appliquer les méthodes de maintenance suscitées.

Chapitre II : L'énergie éolienne

II.1. Introduction

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. Comptant parmi les plus importantes sources d'énergie durable et propre, la technologie des éoliennes (ou parcs éoliens) a connu un développement rapide, notamment ces dernières décennies, en particulier dans le domaine de la production d'électricité. De nombreuses technologies sont utilisées pour capter l'énergie éolienne, et l'efficacité de leurs installations ne cesse de s'améliorer.[19]

Dans ce chapitre, nous avons définis les différents types et composants des éoliennes. Nous avons ensuite abordé le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Puis, nous avons présenté le modèle mathématique de chaque composant, ce qui nous a permis de comprendre en détail le fonctionnement des éoliennes.

II.2. Historique de L'éolienne

L'énergie éolienne a été utilisée mécaniquement dès 200 av. J.-C., avec des habitants du Moyen-Orient qui employaient des moulins à vent pour moudre le grain, et en Chine pour pomper l'eau. Plus tard, à partir du XIIe siècle, on a employé des moulins à vent pour des applications industrielles telles que le drainage des lacs et étangs en Europe.

Au cours du 19ème siècle, l'énergie du vent s'est imposée comme une source de production d'électricité. James Blyth, un ingénieur électrique britannique, est reconnu pour avoir construit la première éolienne en 1887. Il a rapidement emboîté le pas aux précurseurs américains de l'énergie éolienne, Charles Brush et le Danois Poul la Cour, qui ont œuvré pour le recours à l'énergie éolienne afin d'alimenter des édifices autonomes.



Figure II.1: éolienne de Charles F. Brush en 1887 Figure II.2 : éolienne de Paul La Cour en 1819

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée

d'électricité, la crise énergétique de 1973. Enfin plus récemment, les accords de Kyoto devraient être le moteur principal du développement des éoliennes.[20]



Figure II.3 : Types et stades de développement des éoliennes

II.3. Les différents types d'éolienne

➤ Par axe de rotation :

❖ Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical se distinguent par leur générateur placé au sol, leur faible impact sonore et visuel, ainsi que leur résistance aux vents forts grâce à des pales adaptatives. Malgré leurs avantages et plusieurs projets industriels, elles restent encore peu utilisées par rapport aux éoliennes à axe horizontal.[21]



Figure II.4 : Eolienne axe vertical

❖ Les éoliennes à axe horizontale :

Les éoliennes à axe horizontal, inspirées des moulins à vent, utilisent généralement trois pales aérodynamiques pour offrir un bon équilibre entre performance, coût et vitesse.

Elles sont les plus utilisées grâce à leur rendement élevé, leur meilleure stabilité mécanique et leur efficacité liée à leur grande hauteur.[22]



Figure II.5 : Eolienne axe horizontale

➤ Par taille et puissance :

- **Petite éolienne** : Puissance de 1 kW à 36 kW ;
- **Moyenne éolienne** : Puissance de 36 kW à 350 kW ;
- **Grande éolienne (grande échelle)** : Souvent > 500 kW, principalement en parc.

II.4. Principes de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

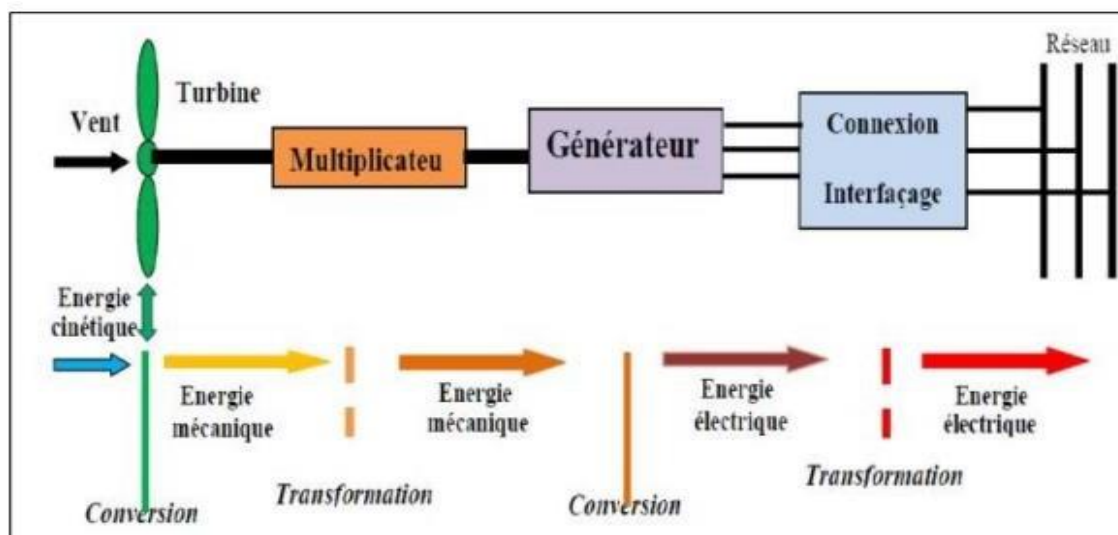


Figure II.6 : Principe de conversion d'énergie mécanique électrique

Dans ce chapitre, nous avons définis les différents types et composants des éoliennes

Nous avons ensuite abordé le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Puis, nous avons présenté le modèle mathématique de chaque composant, ce qui nous a permis de comprendre en détail le fonctionnement des éoliennes.

II.5. Principaux composants d'une éolienne

Les éoliennes sont composées de plusieurs éléments qui assurent leur bon fonctionnement, comme suit :

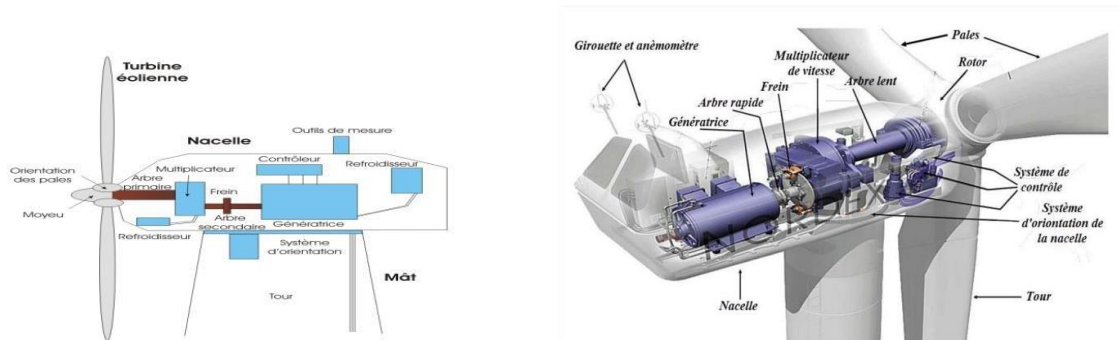


Figure II.7 : Principaux composants de l'éolienne

II.5.1. Les pales

Les pales sont confectionnées à partir de matériaux composites tels que la fibre de verre, le carbone et d'autres composants. Elles mesurent entre 40 et 107 mètres et leur poids peut aller de 6 à plus de 25 tonnes. Le rotor est composé de trois pales fixées sur un moyeu.

➤ Remarque : Le diamètre du rotor de l'éolienne géante est le double de la longueur de la pale ajouté au diamètre de son moyeu.[23]



Figure II.8 : les pales d'éolienne



Figure II.9 : Moulage d'une pale d'éolienne.

II.5.2. Arbre primaire

Il s'agit de l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il opère à une cadence de rotation variant entre 10 tours par minute (tr/min) et plus de 25 tr/min. Il se branche sur l'arbre secondaire par le biais du multiplicateur.[23]



Figure II.10 : Arbre primaire d'éolienne.

II.5.3. Multiplicateur

La vitesse lente du rotor, souvent comprise entre 20 et 40 tours chaque minute, monte en puissance grâce au réducteur. Du coup, elle atteint ce que le générateur exige pour bien marcher. Grâce aux roues dentées, on passe à 1 500 rotations par minute sans effort apparent. Ce rythme précis rend possible une production électrique régulière.[23]



Figure II.11 : Multiplicateur de vitesse

II.5.4. Arbre rapide ou arbre secondaire

L'arbre secondaire (arbre à grande vitesse) tourne à environ 1 500 tr/min et entraîne le générateur. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui s'active en cas d'urgence lorsque les freins pneumatiques sont défaillants, notamment lors de la maintenance de l'éolienne ou par vents forts.[23]



Figure II.12 : Arbre secondaire d'éolienne.

II.5.5. Générateur Asynchrone

Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, produisant jusqu'à 7,5 mégawatts de puissance. Il s'agit généralement d'une machine asynchrone avec multiplicateur.[23]



Figure II.13 : Générateur d'éolienne.

II.5.6. Contrôleur électronique

L'unité de commande électronique (ECU) est le cerveau de l'éolienne. Elle gère l'ensemble du fonctionnement de l'éolienne, ce qui inclut entre 100 et 500 paramètres. Elle contrôle notamment le démarrage, le freinage, l'orientation des pales et du moteur, ainsi que le refroidissement du générateur. Elle est reliée au système de mesure (anémomètre et anémomètre).[23]

II.5.7. Outils de mesure

Les instruments de mesure montés sur la structure d'une éolienne comprennent :

- Un anémomètre, appareil de mesure de la vitesse du vent.
- Un petit rotor se déplace avec le vent, suivant les variations des courants d'air. Ce mécanisme indique la direction du vent, chaque mouvement correspondant à une direction précise. L'appareil réagit même aux courants faibles et change constamment de position, garantissant ainsi une connaissance permanente de la direction du vent. Ces appareils de mesure sont connectés en permanence au système de contrôle. [23]

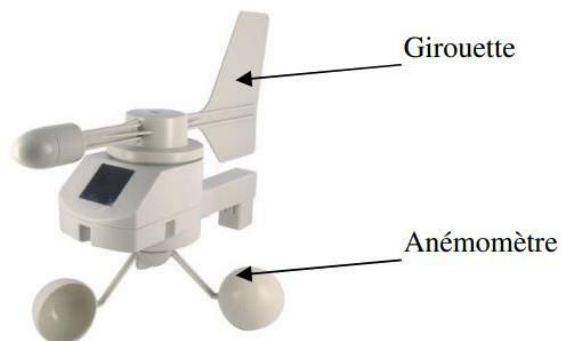


Figure II.15 : Outils de mesure de la vitesse et le vent

II.5.8. Refroidissements

Le refroidissement de la génératrice et le multiplicateur est indispensable. Les refroidisseurs employés sont :

- Ventilateurs.
- Radiateurs à eau et à huile.[23]

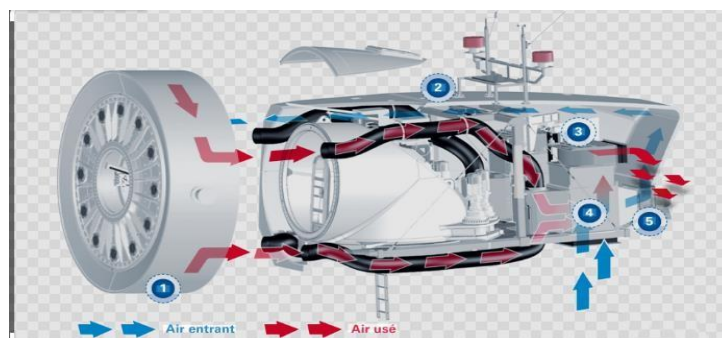


Figure II.16 : Le refroidissement de la génératrice et le multiplicateur

II.5.9. Système d'orientation

Des moteurs électriques orientent la nacelle d'éoliennes (300 à 500 tonnes) pour maximiser la collecte d'énergie éolienne en plaçant le rotor face au vent.[23]

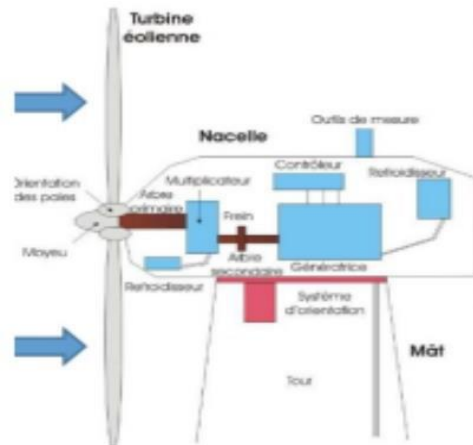


Figure II.17 : Système d'orientation montré en rouge monté sur le mât.

II.5.10. Mât (ou tour)

Le mât remplit les fonctions suivantes :

- Il supporte le moteur et les hélices ;
- Il abrite les câbles de distribution ;
- Sa hauteur varie de 40 à plus de 100 mètres ;
- Il existe deux types de mâts (figure 27) ;
- En acier, d'un poids supérieur à 100 tonnes ;
- En béton, d'un poids supérieur à 250 tonnes ;

La base du mât pèse plus de 300 tonnes, avec un diamètre pouvant dépasser 20 mètres et une profondeur supérieure à 3,5 mètres.[23]



Figure II.18 : Le mât acier



figure II.19 : Le mât béton

II.6. Les dysfonctionnements les plus courants dans les éoliennes

Tableau II.1 : Les dysfonctionnements les plus courants dans les éoliennes

Type	Panne courants	Cause principale	Solution/ Réparation
Electrique	Surchauffe du générateur	Refroidissement insuffisant	Améliorer le système de refroidissement, ajouter des ventilateurs ou refroidissement liquide
Electrique	Court-circuit électrique	Dommages à l'isolation ou à l'humidité	Les câbles de remplacement améliorent l'isolation
Electrique	Fuite par défaut à la terre	Dommages à l'isolation ou aux câbles	Réparation d'isolation, installation de systèmes de détection de défauts à la terre
Mécanique	Dommages aux roulements	Charges excessives, lubrification insuffisante	Re lubrification et remplacement des roulements endommagés
Mécanique	Problèmes de boîte de vitesses	Charges élevées, lubrification insuffisante	Re lubrification ou remplacement des engrenages endommagés
Mécanique	Câble coupé	Vibrations, Mauvaise installation, Pression externe	Remplacement du câble et fixation correcte

II.7. La modélisation mathématique des éoliennes

Afin d'étudier le comportement du système et d'analyser ses performances, nous présentons dans cette section les lois physiques et mathématiques fondamentales qui régissent le fonctionnement de l'éolienne :

II.7.1. Energie cinétique

L'énergie cinétique est en réalité, l'énergie possédée par un objet du fait de son mouvement, qu'il se déplace en ligne droite ou en rotation, par rapport à un point considéré comme fixe. L'énergie est fonction de la masse de l'objet et de sa vitesse, elle est donc connectée directement à la masse et au carré de la vitesse.[24]

Énergie cinétique du vent

$$E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad \dots (II.1)$$

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : énergie cinétique (en joules)

II.7.2. Energie théoriquement récupérable

En tenant compte d'un mécanisme de récupération de cette énergie de surface S, et en supposant que la vitesse du vent est uniforme à travers chaque point de cette surface, le volume d'air qui passe à travers cette surface en une seconde correspond à $v \cdot S$. [24]

Puissance théoriquement récupérable

$$P = E_{c/s} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v \cdot S \cdot v^2 \quad \dots (II.2)$$

P : puissance récupérable (Watt)

m : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

ρ_0 : masse volumique de l'air (kg/m³)

v : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m²)

vS : débit volumique d'air (m³/s)

- Ce qui revient à la formule qui suit.
- Puissance du vent contenue dans un cercle de section

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \dots (II.3)$$

ρ : Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar).

S : Surface des pales (m²)

R : rayon de pale (21,7m)

v : vitesse du vent (en m/s)

- Cette puissance (en Watt) est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée en totalité par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

II.7.3. Limite de Betz

La limite de Betz (ou loi de Betz) établit que la puissance maximale qu'une éolienne peut extraire du vent est de 16/27, soit environ 59,3 % de la puissance cinétique totale disponible. Albert Betz a démontré en 1919 qu'il est impossible de capter 100 % de l'énergie, car cela arrêterait totalement le vent derrière le rotor.

- Betz calcule que :

- La puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne ;
- Cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air. [24]

➤ On peut regrouper ces résultats selon ces formules :

$$P_{\text{extraite}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incidente}} \text{ avec } P_{\text{incidente}} = P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S v_{\text{amont}}^3$$

lorsque $v_{\text{aval}} = \frac{1}{3} v_{\text{amont}}$ (II.4)

ρ : masse volumique du fluide (1,20 kg m⁻³ pour l'air à 20 °C)

S : surface du capteur éolien (surface balayée) en m²

v_{amont} : vitesse incidente (amont) du fluide en m/s

II.7.4. Vitesse angulaire du rotor

La vitesse angulaire du rotor (appelée aussi fréquence angulaire) mesure la rapidité de sa rotation C'est-à-dire un angle par seconde exprimée en radians par seconde (rad/s). [24]

Vitesse angulaire

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad \text{....(II.5)}$$

ω : vitesse angulaire (en rad/s)

f : fréquence de rotation du rotor (en s⁻¹ ou Hz)

II.7.5. Vitesse tangentielle

Là où tourne la turbine, les bouts des pales filent vite - cette course s'appelle vitesse tangentielle. Elle compte beaucoup, puisque du mouvement dépend comment bien l'air est capté pour fabriquer du courant. [24]

Formule de la vitesse tangentielle :

$$V_t = \omega \times R \quad \text{.....(II.6)}$$

Avec :

V_t : vitesse tangentielle (m/s)

R : rayon de l'éolienne (longueur des pales) (m)

ω : vitesse angulaire de rotation du rotor (rad/s)

Remarque : si la vitesse est donnée en tours par minute (n rpm), il faut d'abord convertir en rad/s :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

II.7.6. Couple mécanique produit par l'éolienne

Le couple mécanique d'une éolienne est la force de rotation appliquée au rotor par le vent agissant sur les pales et augmente avec la vitesse du vent. Ce couple est transmis par un arbre à un multiplicateur et est généralement amplifié pour entraîner un générateur électrique. [24]

Couple mécanique produit par

$$\text{l'éolienne : } \Gamma = P / \omega \quad \text{.....(II.7)}$$

Γ : couple mécanique produit par l'éolienne (en N.m)

P : puissance mécanique (en W)

ω : fréquence de rotation du rotor (en rad/s)

II.7.7. Couple moteur

Le couple moteur est la puissance de rotation qui entraîne la rotation du rotor. Ce couple est obtenu grâce à une somme des éléments de portance et de traînée, qui dépend du nombre de pales sur le rotor [24]

Couple moteur

$$\Gamma = \int (D \rightarrow L) d\Gamma = \eta \cdot \int (D \rightarrow L) [\xi \cdot \sin \alpha - D \cdot \cos \alpha] \quad \dots\dots(\text{II.7})$$

Γ : couple moteur (en N.m)

η : nombre de pales (sans unité)

α : angle d'attaque des pales (en degrés)

ξ : portance (en N)

D : traînée (en N)

L : longueur des pales (en m)

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons définis les différents types et composants des éoliennes. Nous avons ensuite abordé le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Puis, nous avons présenté le modèle mathématique de chaque composant, ce qui nous a permis de comprendre en détail le fonctionnement des éoliennes.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler le fonctionnement d'une éolienne à partir des formules mathématiques présentées et des données réelles du vent, et nous aborderons les types de dysfonctionnements affectant leurs composants et leurs causes, en utilisant le logiciel MATLAB Simulink pour simuler et comprendre leur impact sur le système de l'éolienne.

Chapitre III : Simulation des défauts dans une turbine éolienne

III.1. Introduction

La simulation des défauts dans les systèmes éoliens est essentielle pour analyser le comportement des turbines et évaluer leur performance face aux différentes anomalies notamment dans des conditions environnementales sévères. Ce chapitre aborde l'analyse des défauts des composants critiques à l'aide de la modélisation et de la simulation avec Matlab, offrant une vue d'ensemble du comportement du système en tenant compte des paramètres électriques et mécaniques.

III.2. Matlab Simulink

Matlab Simulink est un environnement de modélisation par blocs permettant la simulation et l'analyse virtuelle de système dynamique et électriques complexes.

Tester les éoliennes en simulation est crucial pour leur efficacité. Ces tests évaluent la production d'électricité et ajustent les réglages des machines. En cas de panne, la simulation identifie rapidement le problème et analyse la réaction de chaque composant. Cela aide à prévenir l'usure et à planifier les interventions, réduisant ainsi les arrêts imprévus et les coûts de réparation. Modéliser leur fonctionnement est essentiel pour garantir un flux d'énergie stable.

III.3 Représentation du modèle

Cette simulation présente un exemple d'éolienne raccordée au réseau, créée avec le logiciel MATLAB Simulink. L'énergie éolienne est transformée en électricité grâce à un système commençant par une alimentation triphasée représentant le réseau électrique. Un transformateur ajuste la tension, tandis qu'un générateur asynchrone produit l'électricité nécessaire. La puissance de rotation de la turbine varie avec la direction du vent et l'angle des pales. Des mesures d'énergie, comme la tension et le courant, sont prises, et un réseau numérique simule différentes conditions de vent pour analyser le rendement et proposer des améliorations.

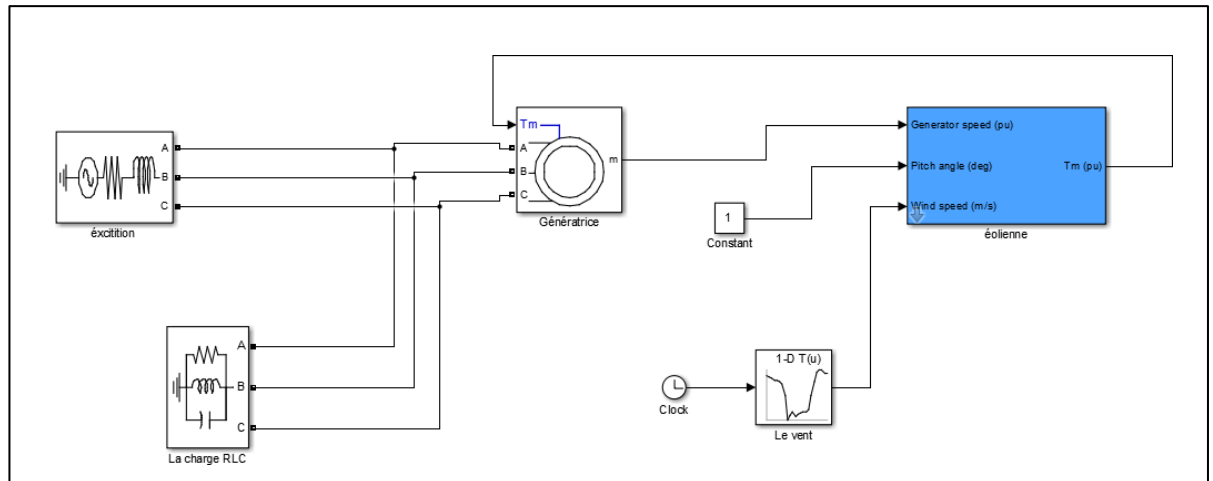


Figure III.1 : Modèle de simulation d'un système éolien

➤ **Les figures suivantes illustrent** les courbes obtenues, accompagnées d'une analyse technique détaillée pour chaque variable :

III.3.1. Analyse de la vitesse du vent

La courbe montre les variations de la vitesse du vent à Mostaganem, avec des enregistrements entre 6,7 m/s et 10,5 m/s, indiquant un fort potentiel éolien. Les

performances du système ont été testées, montrant que le générateur s'adapte bien aux variations et maintient une production stable même lors de chutes soudaines de la vitesse du vent.

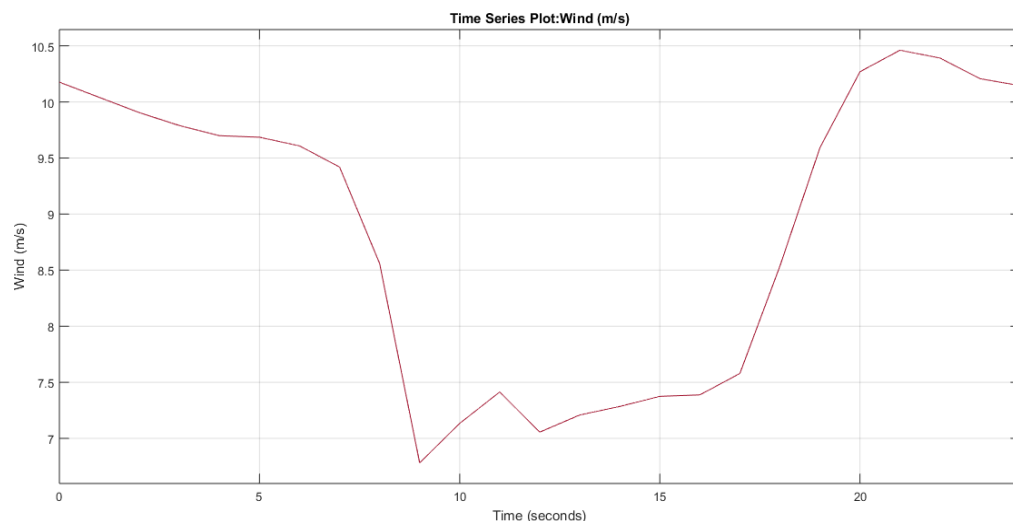


Figure III.2 : Profil du vent appliqué à la turbine (m/s)

III.3.2. Analyse du couple mécanique

La courbe illustre la manière dont la turbine extrait l'énergie du vent dans la province de Mostaganem. Le couple suit directement la vitesse du vent, avec des variations. Les oscillations initiales sont normales et résultent de l'inertie du système au démarrage. Le signal négatif confirme que l'énergie est bien transmise de la turbine au générateur, démontrant ainsi la réussite du processus de conversion d'énergie dans la simulation.

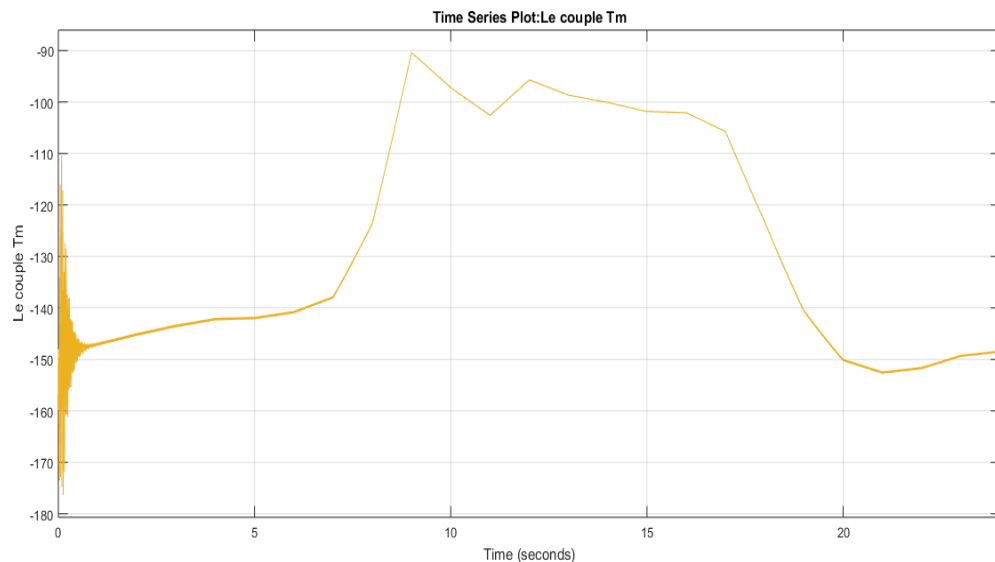


Figure III.3 : le couple mécanique (T_m).

III.3.3. Analyse de la vitesse du rotor

Illustre la vitesse de rotation de la partie mobile du générateur. Après une phase de démarrage turbulent, la vitesse se stabilise à une valeur constante (environ 190 rad/s). Cette stabilité démontre que le système est capable d'absorber les fluctuations du vent grâce à son inertie mécanique, assurant ainsi une production d'énergie stable.

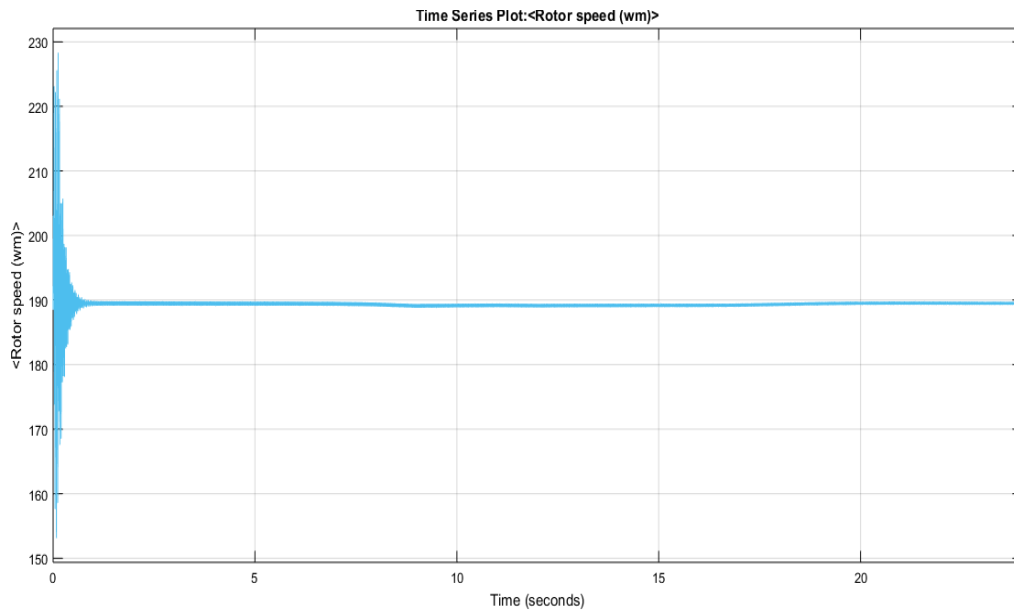


Figure III.4 : La vitesse rotorique (mW)

III.3.4. Analyse de tension

Cette courbe représente la tension aux bornes des trois phases et montre une stabilité parfaite à 1500 V. Cette stabilité confirme que le système a atteint un état stable et est capable d'alimenter la charge avec une tension constante.

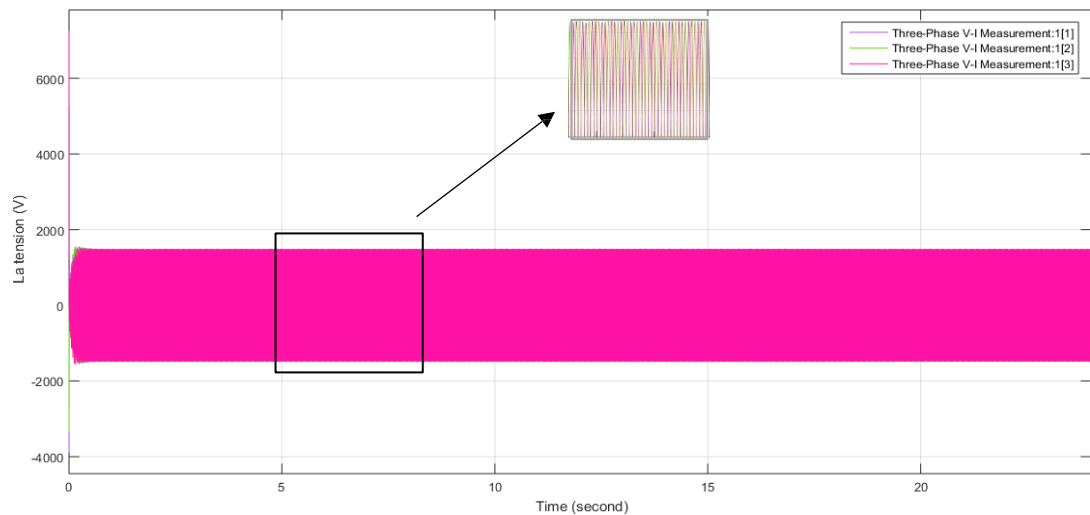


Figure III.5 : Analyse de tension (V)

III.3.5. Analyse de courant

Cette courbe représente le courant électrique triphasé, qui se stabilise à une valeur de 15 ampères. La régularité et la symétrie des ondes indiquent que le système est

électriquement équilibré et fonctionne efficacement sans perturbation.

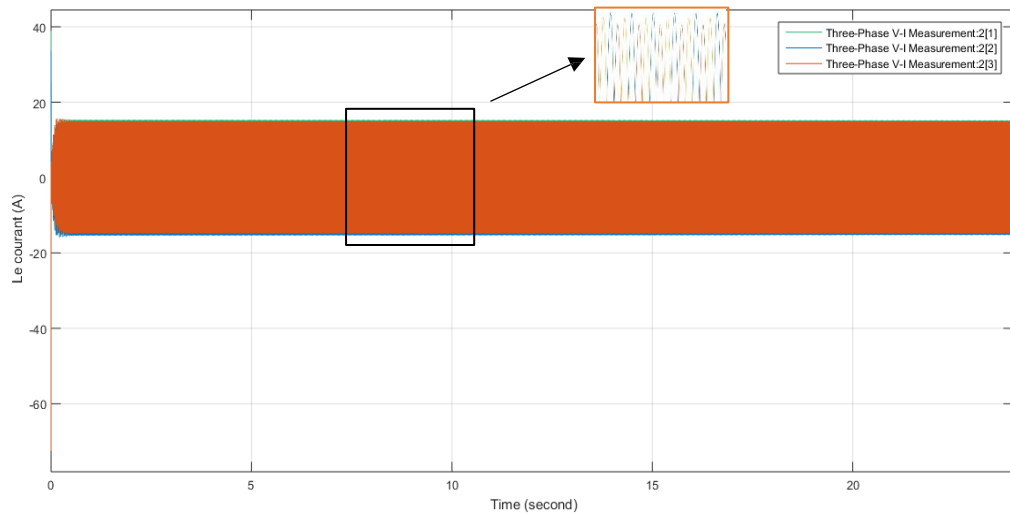


Figure III.6 : Analyse de courant (A)

III.4. Étude du comportement du système en régime de défaut

III.4.1. Défauts de vent

Pour étudier la stabilité dynamique du système, nous avons appliqué des turbulences au profil du vent. Cette démarche permet d'analyser comment le générateur réagit aux variations brutales de la ressource primaire (le vent), et de vérifier si le système de contrôle parvient à lisser les oscillations pour maintenir la stabilité de la tension et de la fréquence.

➤ **Les figures suivantes illustrent** les courbes obtenues, accompagnées d'une analyse technique détaillée pour chaque variable :

III.4.1.1 Analyse du vent et le couple

Les résultats obtenus montrent des variations aléatoires et intermittentes de la vitesse du vent, pouvant parfois chuter à zéro. Ceci ne correspond pas à une croissance normale du vent, mais indique plutôt une interruption soudaine ou un dysfonctionnement de la source d'énergie. Cette fluctuation se reflète directement sur **le couple mécanique (T_m)**. On observe que ce dernier suit fidèlement l'évolution de la vitesse du vent (les valeurs négatives indiquent l'état de production), ce qui signifie que la turbine ne produit de l'énergie que lorsque le vent est suffisant.

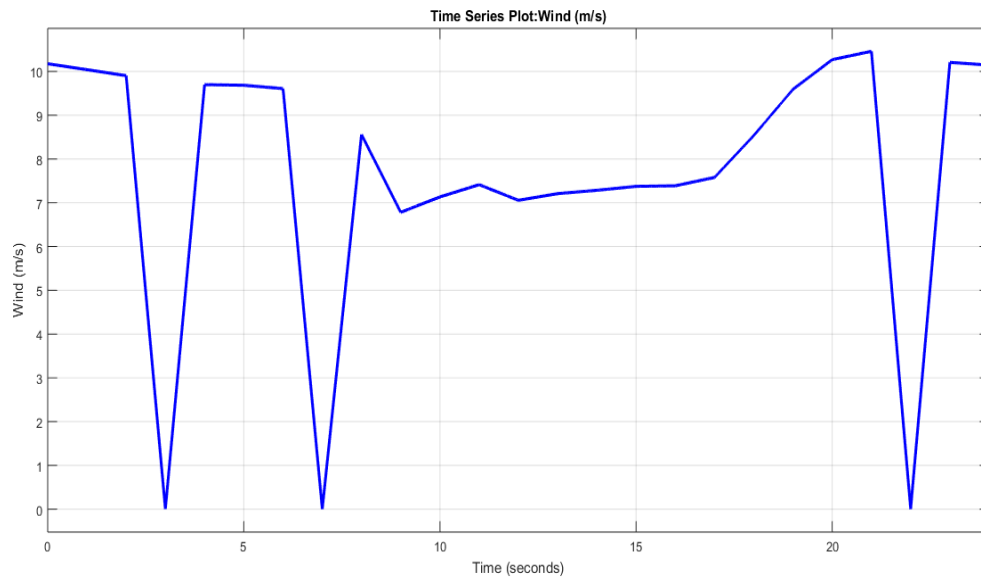


Figure III.7 : fluctuations brusques du vent.

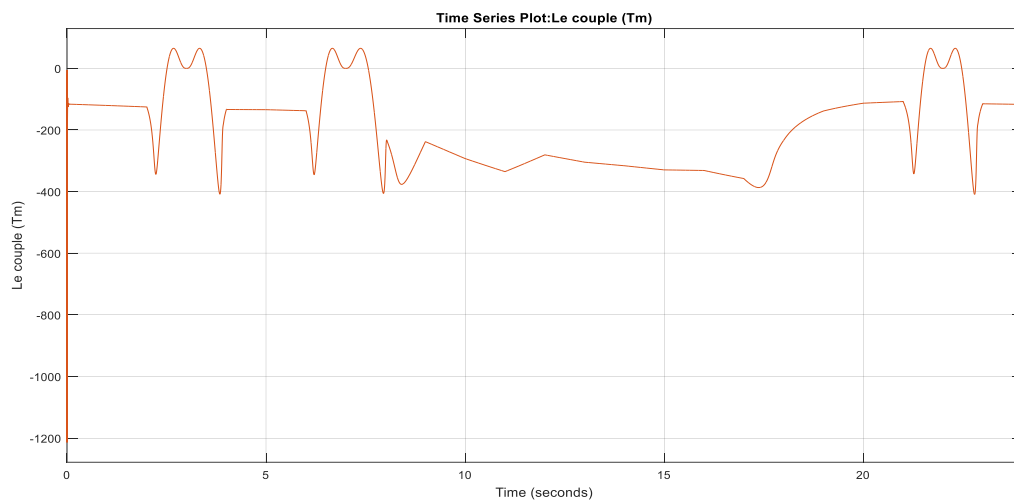


Figure III.8 : Le couple mécanique en présence de défaut

III.4.1.2. Analyse de la vitesse du rotor

Cette courbe représente l'évolution de la vitesse du rotor en présence d'un défaut. On observe plusieurs chutes brusques de la vitesse suivies d'un retour progressif vers une valeur stable. Cette récupération est due au caractère rapide et temporaire des perturbations du vent, qui permettent à l'éolienne de retrouver rapidement son régime normal de fonctionnement. Malgré ces variations transitoires, la vitesse rotorique reste globalement maîtrisée. Cependant, si la baisse de la vitesse du vent se prolonge dans le temps, l'éolienne ne dispose plus de l'énergie nécessaire pour fonctionner et peut alors s'arrêter.

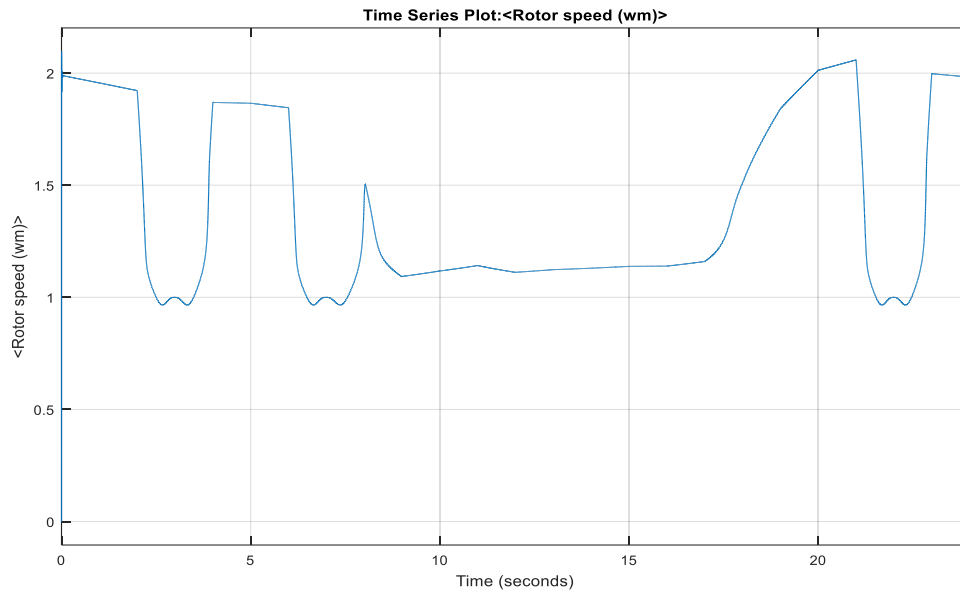


Figure III.9 : La vitesse rotorique en présence de défaut

III.4.1.3. Analyse de la tension et le courant

La tension :

Lors d'un défaut de vent caractérisé par une chute brutale de sa vitesse, le couple mécanique appliqué à la génératrice diminue, ce qui entraîne une réduction de sa vitesse de rotation. Cette variation affecte directement la tension produite, provoquant ainsi des fluctuations et des baisses temporaires. Cependant, grâce à l'intervention du système de contrôle, la tension retrouve rapidement son état stable.

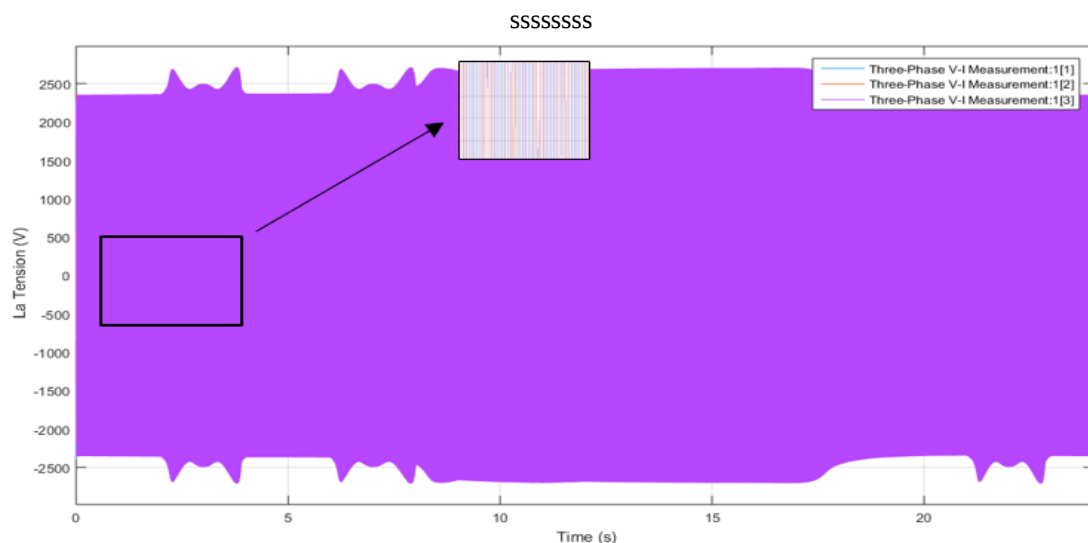


Figure III.10 : La tension en présence de défaut

Le courant :

La chute brutale de la vitesse du vent entraîne une diminution du couple mécanique, puis une baisse de la vitesse de rotation de la génératrice. Par conséquent, la puissance produite varie, ce qui se manifeste par des oscillations du courant. Après la disparition de la perturbation et le retour de la vitesse de rotation à son état stable, le courant retrouve sa valeur normale.

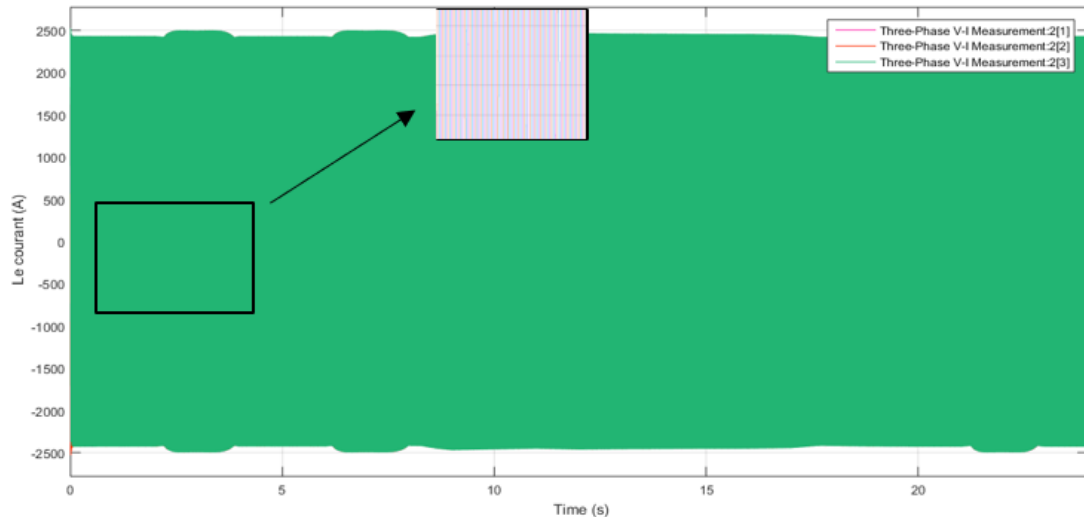


Figure III.11 : Le courant en présence de défaut

III.4.2. Défaut au niveau du générateur

Cette simulation porte sur l'étude de la réponse dynamique de la génératrice asynchrone soumise à une perturbation asymétrique du réseau électrique, représentée par un défaut de court-circuit monophasé sur la phase (a) à l'aide du bloc « Défaut triphasé ». Cet essai technique vise à analyser le comportement de la machine en conditions de déséquilibre. Sur cette base, nous procéderons à l'analyse des courbes obtenues afin de comprendre le comportement de la génératrice.

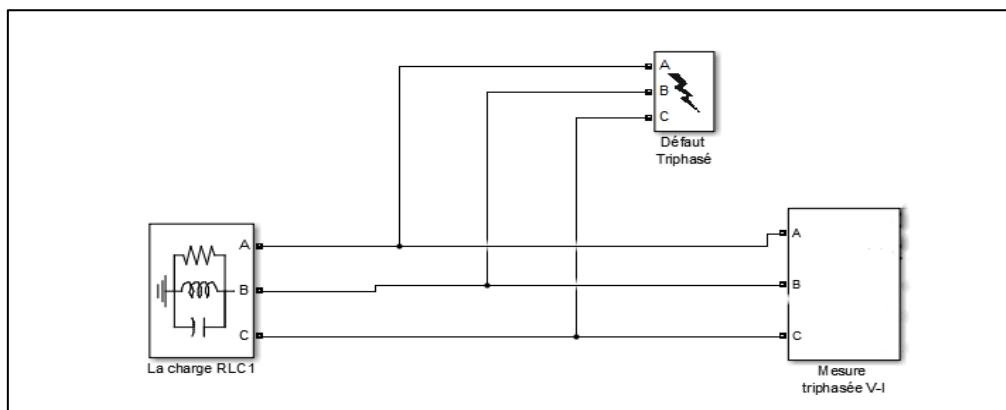


Figure III.12 : Schéma bloc de défaut de générateur.

III.4.2.1. Analyse de courant

La courbe montre la réponse de la génératrice à un défaut de court-circuit sur la phase (a), où l'on observe une augmentation brusque et intense du courant de la phase affectée entre les instants 3s et 3.5s. La cause principale de cette hausse est la chute brutale et soudaine de l'impédance du réseau au moment de l'apparition du défaut, ce qui permet le passage d'un courant de court-circuit très élevé. Cette perturbation traduit un état de déséquilibre électrique qui engendre des contraintes sur la génératrice, avant que le système ne retrouve sa stabilité.

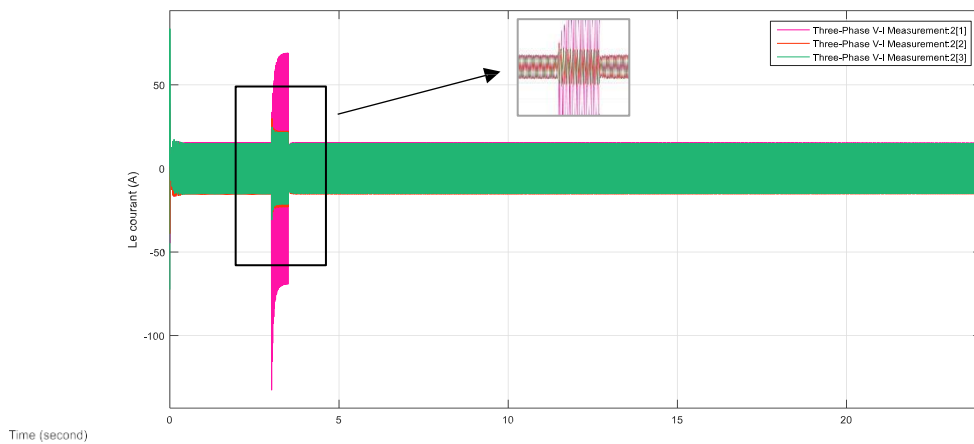


Figure III.13 : Le courant en présence de défaut

III.4.2.2. Analyse de tension

La courbe illustre la réponse des tensions de phases lors du défaut, où l'on observe une chute brutale de la tension de la phase affectée, atteignant des valeurs quasi nulles entre les instants 3s et 3.5s. Cette baisse est due au court-circuit qui annule la différence de potentiel sur la phase (a), expliquant ainsi l'instabilité de la génératrice avant que la tension ne retrouve son état stationnaire dès l'élimination de la perturbation.

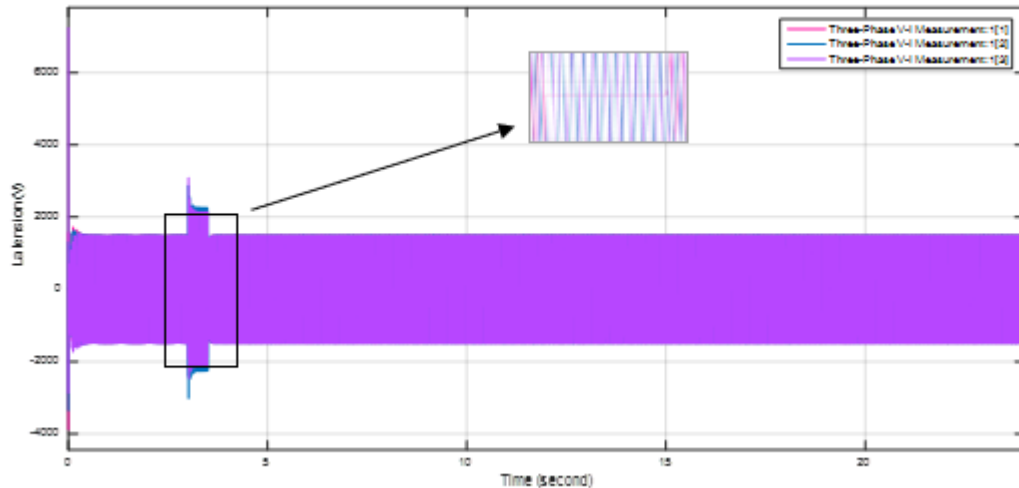


Figure III.14 : La tension en présence de défauts

III.4.2.3. Analyse de la vitesse

La courbe illustre l'impact d'un défaut de court-circuit monophasé sur la phase (a) sur les performances cinétiques de la génératrice. On observe des oscillations marquées de la vitesse du rotor à l'instant $t=3s$. Cela s'explique par la rupture soudaine de l'équilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique, par suite de la chute de tension dans la phase affectée.

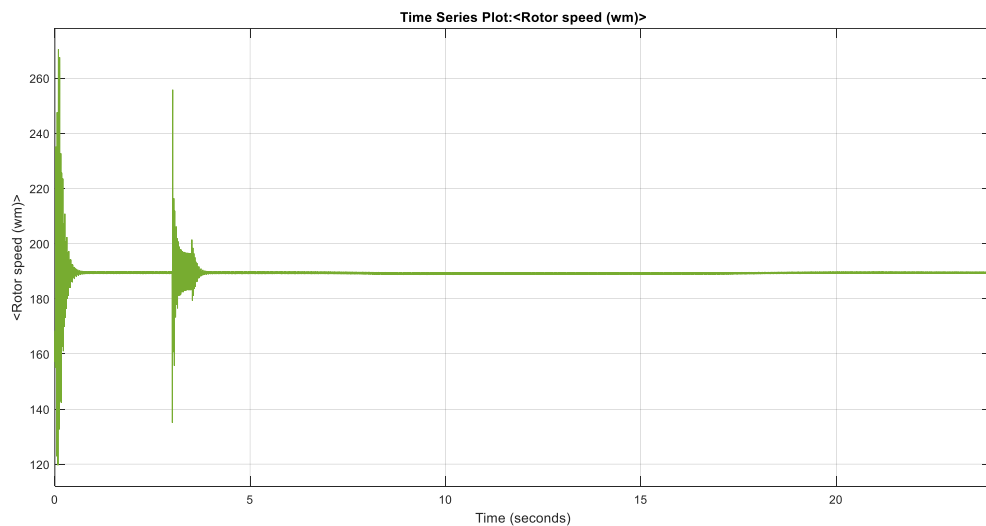


Figure III.15 : La vitesse rotorique en présence de défaut

III.4.2.4. Analyse le couple (T_m)

Cette courbe met en évidence l'instabilité du couple mécanique (T_m) provoquée par le défaut électrique, traduite par des oscillations brusques. En effet, le choc électromagnétique subi par le générateur se transmet instantanément à l'arbre de la turbine, créant ainsi ces

fortes secousses. On observe toutefois que le système parvient à amortir ces fluctuations rapidement après l'élimination du défaut, ce qui démontre la capacité du contrôle à rétablir le régime permanent de la machine.

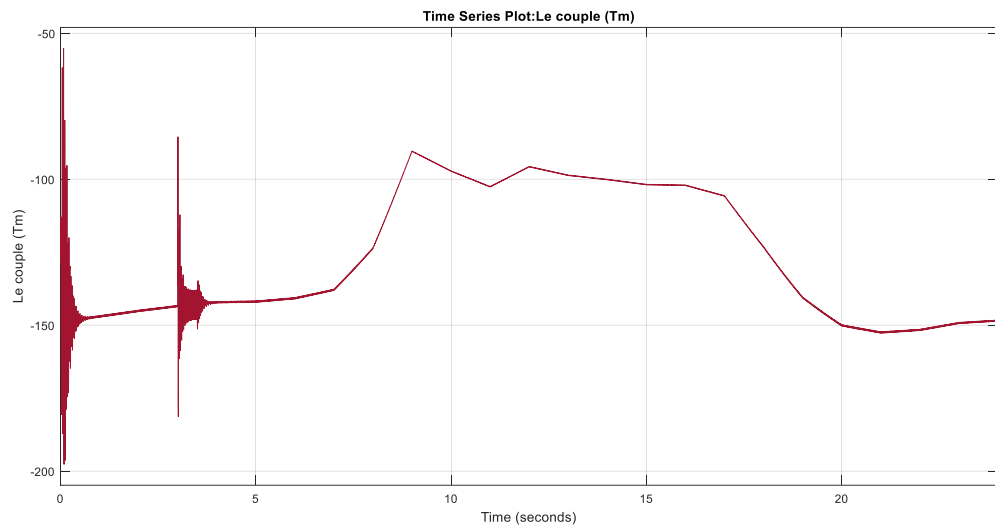


Figure III.16 : Le couple mécanique en présence de défaut

III.5. Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation des turbines à l'aide d'un logiciel de simulation. Cette étude vise à comprendre le système dans différentes conditions de fonctionnement. Dans un premier temps, l'effet des variations de la vitesse du vent a été analysé, révélant des modifications des niveaux de puissance et de temps, et indiquant la réponse de la turbine à cette variable fondamentale. Ensuite, un second défaut a été simulé à l'aide d'un bloc « défaut triphasé » afin d'étudier les performances du générateur. Cette analyse permet d'observer l'impact des perturbations électriques sur la stabilité et le comportement dynamique du système. Les résultats soulignent l'importance d'une surveillance et d'une analyse précoces des défauts, essentielles pour améliorer les performances des éoliennes et garantir leur fonctionnement efficace et continu.

Cette simulation a également permis d'obtenir les données nécessaires pour la partie programmation. Les valeurs générées ont été utilisées afin de développer et tester le programme de détection des défauts dans différentes conditions de fonctionnement.

Le chapitre suivant abordera la programmation des défauts étudiés, ainsi qu'une analyse détaillée des valeurs obtenues. L'objectif est d'approfondir la compréhension et d'améliorer la précision de l'évaluation des performances du système dans diverses conditions de fonctionnement.

Chapitre IV : Utilisation des méthodes intelligentes pour la détection et la localisation des défauts dans une éolienne

IV.1 Introduction

La demande croissante en énergies renouvelables a incité à se concentrer davantage sur l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des éoliennes. La maintenance prédictive est un élément clé pour atteindre cet objectif, permettant aux opérateurs d'identifier et de résoudre les problèmes avant qu'ils n'entraînent des arrêts de production ou des pannes mécaniques. L'apprentissage automatique est de plus en plus utilisé dans les systèmes modernes de surveillance des éoliennes pour analyser les données des capteurs et détecter les problèmes en temps réel. Avec l'augmentation de la production d'énergie éolienne, il devient essentiel d'assurer le bon fonctionnement des éoliennes. C'est là qu'intervient l'intelligence artificielle (IA), qui devient le principal moteur du processus de maintenance. Elle transforme notre approche traditionnelle, qui consiste à réparer les turbines après leur arrêt, en une approche proactive de la maintenance préventive. Cette méthode repose sur l'exploitation des vastes quantités de données collectées par les capteurs et les systèmes SCADA à partir des composants de la turbine (tels que le multiplicateur, le générateur et les roulements). L'IA analyse ces données pour détecter les défauts invisibles à l'œil nu, permettant ainsi une intervention rapide.[25]

IV.2 Un état de l'art sur la détection des défauts dans les systèmes éoliens

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude des défauts affectant les systèmes éoliens en raison de leur impact direct sur l'efficacité opérationnelle et la fiabilité du système. Ainsi, Peng, Zhang, Fan, Shangguan et Yang 2023 ont étudié les défauts des roulements, considérés parmi les pannes les plus fréquentes dans les éoliennes. Gu, Liu, Gao et Zhang 2021 se sont concentrés sur le diagnostic des défauts de la boîte de vitesses à l'aide de techniques d'analyse vibratoire et de surveillance de l'état. Par ailleurs, Liu et ses collaborateurs 2024 ont analysé les défauts électriques et mécaniques des générateurs, tels que les défauts du stator, du rotor et les défauts liés à l'entrefer. En outre, Qiu, Feng et Infield 2020 ont proposé des méthodes de diagnostic basées sur les données SCADA pour la détection des anomalies de fonctionnement des éoliennes. De leur côté, Zaher et ses collaborateurs 2009 ont développé des approches de surveillance de l'état des équipements afin d'améliorer la détection précoce des défauts. Enfin, Cao, Qian, Zareipour et Huang 2019 ont utilisé les techniques d'apprentissage profond pour le diagnostic des défauts de la boîte de vitesses, démontrant ainsi l'efficacité des méthodes d'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance prédictive des systèmes éoliens.[26][27][28][29][30][31]

- Parmi les technologies les plus récentes utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts dans les éoliennes, on peut citer les suivantes :
- Apprentissage automatique (Machine Learning),
 - Apprentissage profond (Deep Learning),
 - Jumeau numérique (Digital Twin),
 - Internet Industriel des Objets (Industrial Internet of Things - IIoT),
 - Systèmes de surveillance de l'état des équipements (Condition Monitoring Systems - CMS),
 - Analyse des mégadonnées (Big Data Analytics),
 - Détection d'anomalies basée sur l'intelligence artificielle (AI-based Anomaly Detection),
 - Maintenance prédictive basée sur les données (Data-Driven Prédictive Maintenance).

IV.3 Anaconda et introduction à l'interface utilisateur de Spyder

Anaconda est une distribution libre et open source pour les langages de programmation Python et R, conçue spécifiquement pour faciliter la gestion des packages et des environnements virtuels dans les domaines de la science des données, de l'apprentissage automatique et de l'analyse du Big Data.

Anaconda constitue une plateforme unique pour les programmeurs et les chercheurs, offrant un environnement complet avec plus de 1 500 packages logiciels et bibliothèques scientifiques populaires (telles que NumPy, Pandas et Scikit-Learn) prêts à l'emploi, évitant ainsi l'installation séparée de chaque bibliothèque.

Spyder, un environnement de développement intégré (IDE), est couramment utilisé conjointement avec Anaconda pour la programmation scientifique en Python. Bien qu'il existe d'autres IDE, Spyder est privilégié en raison de sa compatibilité avec Anaconda et de sa gamme étendue de fonctionnalités. Ces fonctionnalités incluent une intégration transparente avec les notebooks Jupyter, un explorateur de variables conçu pour une analyse de données efficace, des outils d'analyse de code et de débogage, ainsi que des options de personnalisation. Spyder est très apprécié des data scientists.[32]

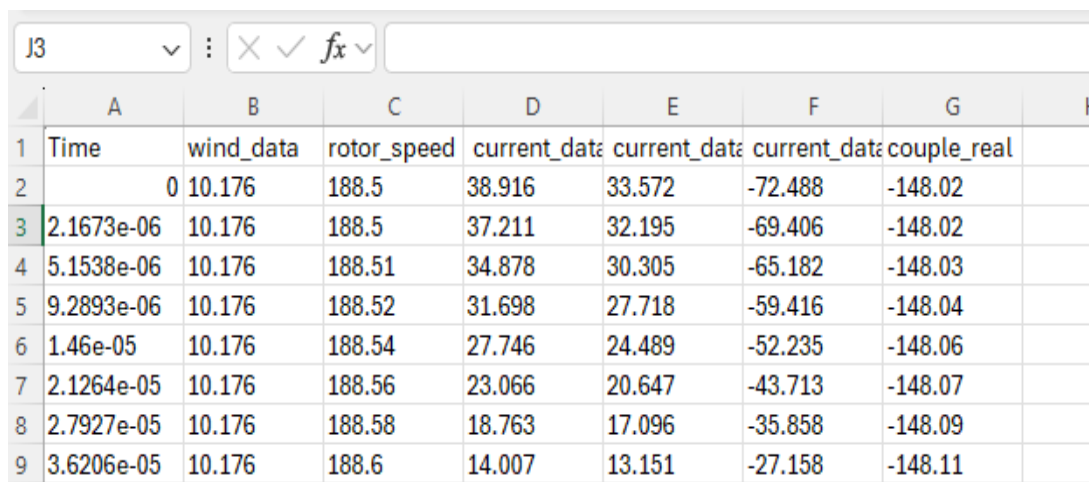
IV.4 Protocole de Collecte des Données de Simulation

Le succès de l'analyse des défaillances des éoliennes dans cette étude repose sur un protocole rigoureux d'acquisition et de traitement des données, commençant par l'extraction

des variables physiques et mécaniques de l'environnement de simulation et leur stockage dans des fichiers CSV structurés temporellement afin de capturer les signatures dynamiques des défauts. Ce protocole inclut une phase de filtrage visant à éliminer les valeurs aberrantes et le bruit numérique généré par les oscillations du simulateur, suivie d'une opération de normalisation des variables pour uniformiser leurs plages numériques, garantissant ainsi l'efficacité des algorithmes analytiques. Enfin, les données sont organisées en synchronisant temporellement les capteurs virtuels et en classant les états entre « sain » et « défectueux », tout en mettant l'accent sur les régimes transitoires pour assurer la construction d'une base de données précise représentant le comportement réel de l'éolienne sous diverses conditions de fonctionnement.[27]

VI.3.1. Application à l'éolienne :

Dans notre travail, nous avons commencé par utiliser l'environnement Simulink pour simuler le système de l'éolienne et générer des données de fonctionnement couvrant à la fois l'état normal et les états de défaut. Ensuite, les mesures résultantes ont été extraites et sauvegardées dans des fichiers d'extension CSV, contenant les variables clés de l'étude telles que la vitesse du rotor, le couple et le courant. Afin de faciliter le traitement et l'analyse ultérieure de ces données, ces dernières ont été organisées et préparées pour une utilisation sous Python en se basant sur l'environnement de développement Spyder . Ces étapes ont abouti à la construction d'une base de données structurée, constituant le socle pratique pour l'étude et le diagnostic des défauts de l'éolienne.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Time	wind_data	rotor_speed	current_data	current_data	current_data	couple_real	
2	0	10.176	188.5	38.916	33.572	-72.488	-148.02	
3	2.1673e-06	10.176	188.5	37.211	32.195	-69.406	-148.02	
4	5.1538e-06	10.176	188.51	34.878	30.305	-65.182	-148.03	
5	9.2893e-06	10.176	188.52	31.698	27.718	-59.416	-148.04	
6	1.46e-05	10.176	188.54	27.746	24.489	-52.235	-148.06	
7	2.1264e-05	10.176	188.56	23.066	20.647	-43.713	-148.07	
8	2.7927e-05	10.176	188.58	18.763	17.096	-35.858	-148.09	
9	3.6206e-05	10.176	188.6	14.007	13.151	-27.158	-148.11	

Figure IV.1 : Exemple des données de fichier CSV utilisées

IV5. L'organigramme de programme python

Organigramme détection de pannes

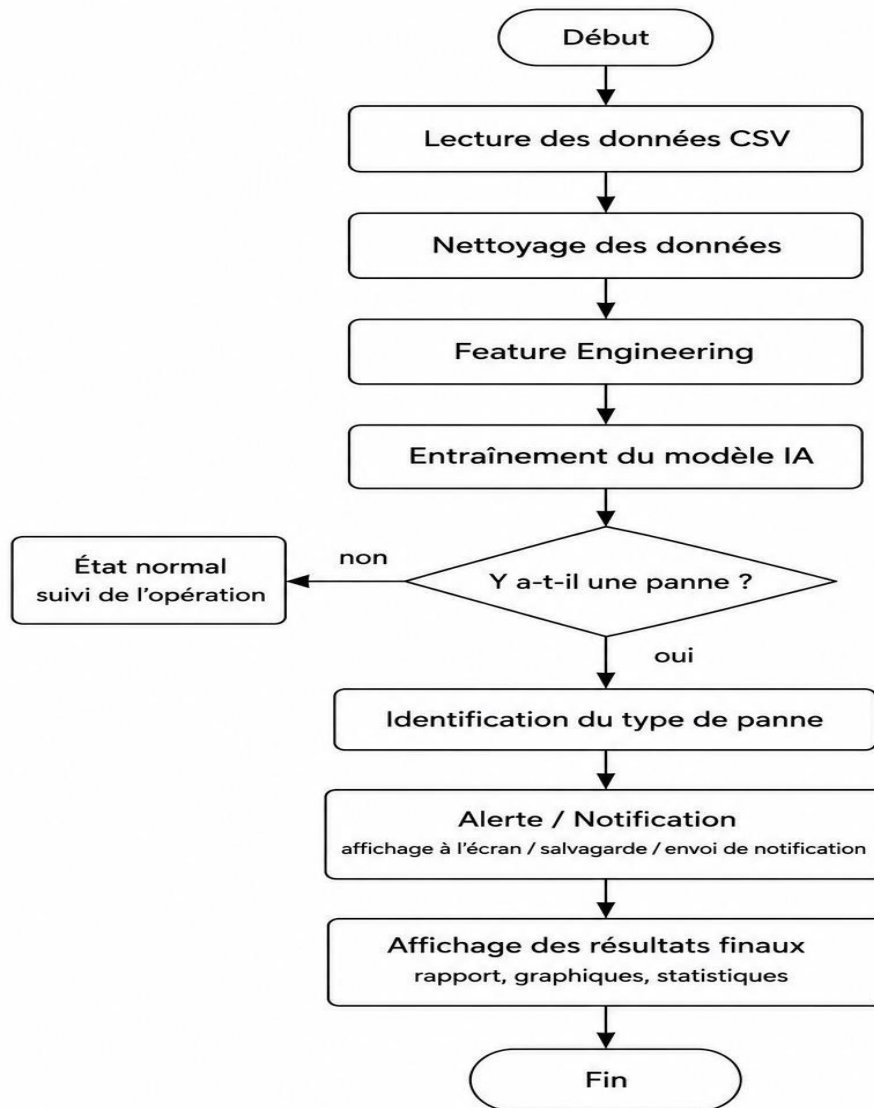


Figure IV.2 : Organigramme détection de pannes

➤ Cet organigramme détaille l'opérationnel de notre système de détection de pannes : Tout commence par le prétraitement des données (ingestion CSV, nettoyage et ingénierie des fonctionnalités) pour caler le modèle d'IA. Ensuite, le système analyse l'état de l'éolienne afin de vérifier la présence d'une panne. En l'absence de défaut, le fonctionnement normal est maintenu. En cas d'anomalie, le système identifie le type de panne et envoie une alerte. Enfin, les résultats sont affichés sous forme de rapports et de statistiques afin de faciliter le suivi des performances du système et la prise de décision pour la maintenance.

IV.6 Analyse des résultats du système aérodynamique et électrique

IV.6.1 Préparation et traitement des données :

Dans cette étude, les données utilisées proviennent de trois fichiers CSV représentant :

- L'état normal de fonctionnement de l'éolienne ;
- Un défaut aérodynamique lié à une faible vitesse du vent ;
- Un défaut électrique de type court-circuit ;
- Après la fusion des données, le système a obtenu un ensemble global contenant :

119390 échantillons

➤ Après l'étape de nettoyage des données :

- Suppression des doublons ;
- Traitement des valeurs manquantes.

➤ Le nombre final d'échantillons est devenu :

119383 échantillons

Cette légère différence montre que la base de données est globalement propre et adaptée à l'apprentissage automatique.

IV.5. 2. Génération des caractéristiques (Ingénierie des fonctionnalités)

Afin d'améliorer les performances du modèle, plusieurs caractéristiques supplémentaires ont été créées à partir des données initiales.

Les nouvelles variables générées sont :

- Les différences entre courants :
 - Current_diff_12 (différence de courant entre la phase 1 et la phase 2),
 - Current_diff_23 (différence de courant entre la phase 2 et la phase 3),
 - Current_diff_13 (différence de courant entre la phase 1 et la phase 3).
- Les paramètres liés au couple :
 - Couple au carré ;
 - Couple en fonction de la vitesse ;
 - Couple en fonction du vent.
- Les paramètres statistiques :
 - Moyenne actuelle ;
 - Écart-type actuel.

➤ Cette étape est très importante car elle permet au modèle de mieux distinguer les

comportements normaux des comportements défectueux. Les variables liées au vent et au couple permettent d'identifier les défauts aérodynamiques, tandis que les différences entre courants facilitent la détection des défauts électriques. Par exemple :

- Un déséquilibre entre les courants peut indiquer un court-circuit ;
- Une baisse du couple ou de la vitesse du vent peut indiquer un défaut aérodynamique.

IV.5.3 Performance du modèle Random Forest

Après l'entraînement du modèle « Random Forest », plusieurs indicateurs de performance ont été obtenus.

Le système affiche :

Précision de l'entraînement = 98.44%

Et

Précision du test = 98.26%

IV.5.3.1 Signification du Précision de l'entraînement

La Précision de l'entraînement représente la précision du modèle sur les données utilisées pendant l'apprentissage.

Une valeur de :

98.44%

Signifie que le modèle a correctement appris les relations entre les données et les différents défauts.

Autrement dit, sur les données d'entraînement :

- Environ 98 échantillons sur 100 ont été classés correctement.

➤ Cette valeur élevée montre que le modèle a bien compris les signatures caractéristiques des défauts.

IV.5.3.2 Signification du Précision du test

Le Précision du test représente la capacité du modèle à fonctionner sur de nouvelles données jamais vues auparavant.

La valeur obtenue :

98.26%

Montre que le système conserve pratiquement le même niveau de performance même sur des données inconnues.

- Cela signifie que le modèle possède une bonne capacité de généralisation.

IV.5.3.3 Comparaison entre Précision d'entraînement et de test

La différence entre les deux valeurs est très faible :

98.44% – 98.26% = 0.18%

- Cette faible différence est très importante scientifiquement.

Elle montre que :

- Le modèle n'est pas en situation d'overfitting,
- Le système ne mémorise pas simplement les données,
- Mais il apprend réellement les comportements des défauts.

Si la Précision de l'entraînement était très élevée et la Précision du test faible, cela aurait indiqué un problème d'apprentissage excessif.

- Dans notre cas, les deux valeurs sont proches, ce qui confirme la robustesse du modèle Random Forest.

IV.5.4 Analyse du rapport de classification

Le rapport de classification contient plusieurs indicateurs :

- Précision
- Rappel
- Score F1 Pour chaque classe.

IV.5.4.1 Classe Normal

Les résultats obtenus pour l'état normal sont :

- Précision = 1.00
- Rappel = 1.00
- F1-score = 1.00 Cela signifie que:

Chapitre IV : Utilisation des méthodes intelligentes pour la détection et la localisation des défauts dans une éolienne

- Toutes les données normales ont été détectées correctement,
 - Aucun état normal n'a été confondu avec un défaut.
- Le système reconnaît donc parfaitement le fonctionnement sain de l'éolienne.

IV.5.4.2 Classe défaut1 (Défaut du vent)

Résultats :

- Précision = 0.96
 - Rappel = 0.99
 - F1-score = 0.97
- Ces valeurs montrent que le modèle détecte très efficacement les défauts liés à la vitesse du vent.
- Le rappel élevé signifie que presque tous les défauts ont été détectés.

IV.5.4.3 Classe défaut 2 (Défaut électrique)

Résultats :

- Précision = 0.99
 - Rappel = 0.96
 - F1-score = 0.97
- Ces résultats montrent une excellente détection des défauts électriques.
- La précision élevée signifie que lorsqu'un défaut électrique est détecté, la prédiction est presque toujours correcte.

IV55 Analyse de la matrice de confusion

La matrice de confusion représente les performances du modèle de classification sur les données de test.

Elle permet d'évaluer la capacité du système à distinguer correctement les différents états de fonctionnement de l'éolienne.

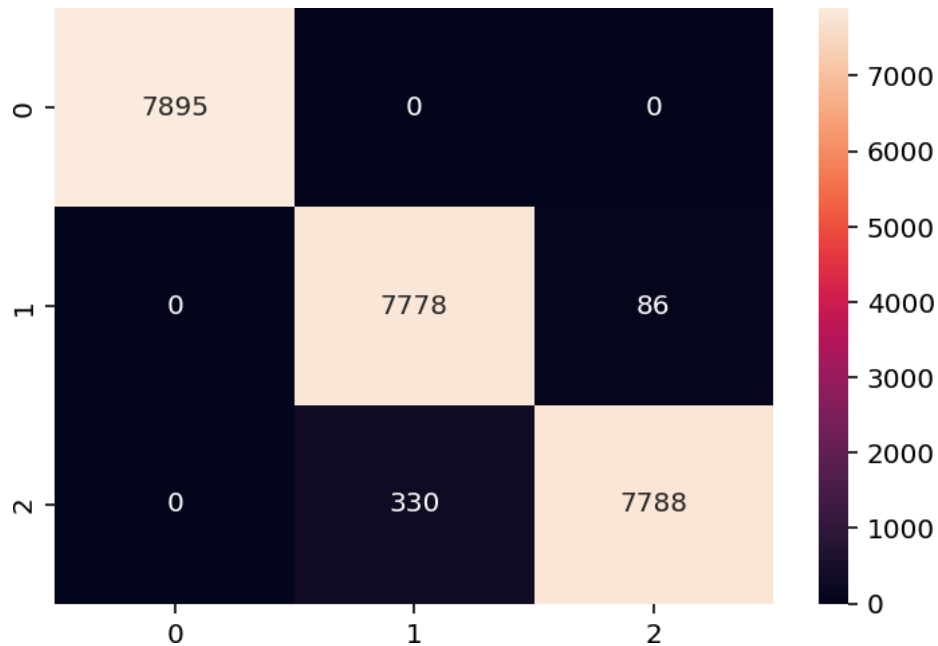


Figure IV.3: La matrice de confusion

Les lignes représentent les classes réelles, tandis que les colonnes représentent les classes prédites par le modèle.

Dans notre cas :

- Classe 0 → fonctionnement normal,
- Classe 1 → défaut aérodynamique (défaut du vent),
- Classe 2 → défaut électrique (court-circuit).

Résultats observés :

- 7895 états normaux correctement classés,
- 7778 défauts défaut 1 correctement détectés,
- 7788 défauts défaut 2 correctement détectés.

Les valeurs proches obtenues pour les défauts 1 et 2 indiquent que le modèle Random Forest a appris les caractéristiques des deux classes avec un niveau de performance presque identique. Cette similarité s'explique principalement par l'équilibre de l'ensemble de données (dataset), puisque chaque type de défaut possède un nombre d'échantillons relativement proche. Ainsi, le modèle ne favorise pas une classe au détriment d'une autre durant l'apprentissage.

Quelques erreurs existent :

- 86 défauts 1 ont été classés comme défaut 2,
- 330 défauts 2 ont été classés comme défaut 1.

Les quelques erreurs observées s'expliquent par le fait que certains défauts mécaniques peuvent provoquer des variations électriques, et inversement. Ainsi, certaines signatures deviennent partiellement similaires dans des situations particulières. Malgré cela, le faible nombre d'erreurs confirme la robustesse et la fiabilité du modèle proposé.

IV.5 6. Analyse du graphique fonctionnalité Importance

Le graphique fonctionnalité Importance montre l'importance de chaque variable dans la décision du modèle.

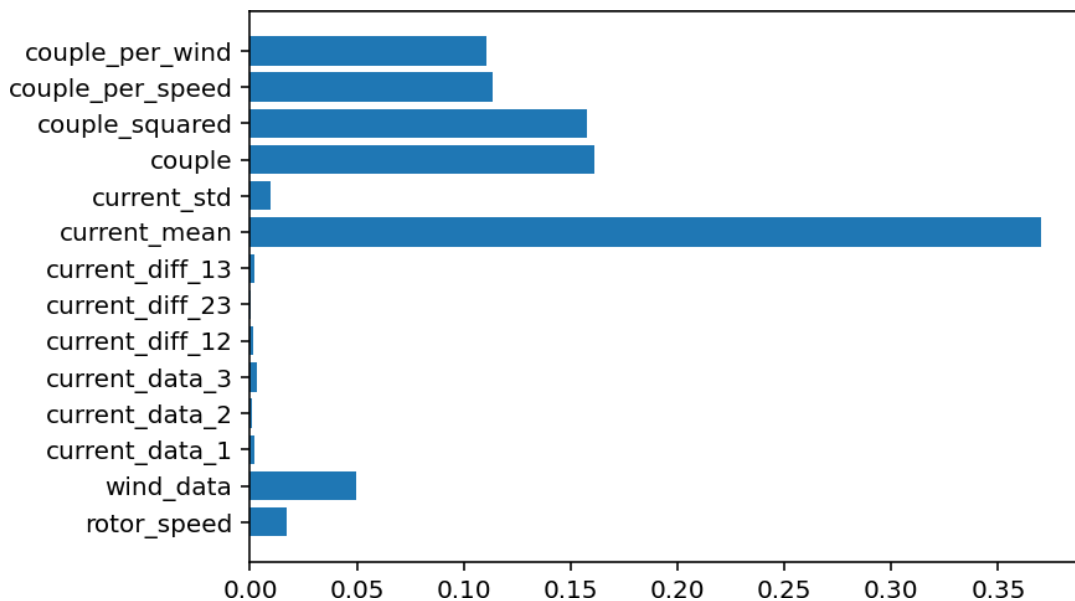


Figure IV.4 : Le graphique fonctionnalité Importance

La variable la plus importante est :

Courant moyen

Cela signifie que les courants électriques jouent un rôle essentiel dans la détection des défauts.

Les variables liées au couple et au vent possèdent également une importance élevée :

- Couple,
- Couple au carré,

- Couple en fonction de la vitesse,
 - Couple en fonction du vent
- Ces résultats sont cohérents avec le fonctionnement physique réel d'une éolienne.

IV57. Analyse du diagnostic final

Le système génère automatiquement un tableau de diagnostic contenant :

- Le type du défaut,
- Sa description,
- Le système concerné,
- La localisation,
- Le niveau de confiance.

IV57.1 Détection du défaut aérodynamique

Exemple obtenu :

- Type de défaut : Défaut du vent
- Description : Faible vitesse du vent
- System : Turbine (Aérodynamique)
- Location : Système éolien
- Confidence : 0.97

Interprétation :

- Le système détecte une baisse importante de la vitesse du vent.

Cette anomalie influence :

- La vitesse de rotation,
- Le couple mécanique,
- Et les performances globales de la turbine.

Le modèle identifie correctement ce comportement grâce aux variables mécaniques et aérodynamiques.

7.2 Détection du défaut électrique

Exemple obtenu :

- Type de défaut : Défaut électrique

- Description : Short Circuit
- System : Générateur
- Location : Phase C
- Confidence : 0.99

Interprétation :

- Le système détecte un court-circuit dans le générateur.

La localisation dans :

- Phase A,
- Phase B,
- Phase C

Est obtenue grâce à l'analyse du déséquilibre entre les trois courants électriques.

- Cette méthode est scientifiquement logique car un court-circuit provoque généralement une anomalie importante dans une phase précise.

IV58 Analyse du système d'alerte intelligent

Le système de supervision développé contient également un module d'alerte automatique appelé :

SMART ALERT SYSTEM

Ce système fonctionne en temps réel après chaque prédiction.

IV581 Fonctionnement du système d'alerte

Lorsque le modèle détecte un défaut :

Un signal sonore est déclenché,

- Une fenêtre d'alerte apparaît,
- Les informations détaillées du défaut sont affichées.

Les informations affichées sont :

- Le type du défaut,
- La description,
- Le système concerné,
- La localisation,

- Le niveau de confiance.

IV582 Exemple d’alerte obtenue

Le système a affiché :

- Type de défaut : Défaut du vent
- Description: Faible vitesse du vent
- System: Turbine (Aerodynamic)
- Location: Système éolien
- Confidence : 0.82

Cela signifie que le système a détecté avec une très grande certitude une anomalie liée à une faible vitesse du vent.

IV.6 Analyse des résultats du système de la boîte de vitesses

Afin d’enrichir ce travail et d’élargir le champ d’application du système intelligent de supervision développé précédemment, un second programme consacré au diagnostic des défauts mécaniques de la boîte de vitesses (Boîte de vitesse) a été ajouté.

Contrairement au premier modèle centré sur les défauts aérodynamiques et électriques de l’éolienne, cette seconde approche s’intéresse aux anomalies mécaniques pouvant affecter le système de transmission.

Pour rendre l’étude plus réaliste et plus proche des conditions industrielles réelles, des données SCADA réelles provenant de la plateforme « Kaggle » ont été exploitées [34].

Ces données contiennent plusieurs paramètres physiques importants liés au fonctionnement de la boîte de vitesses, notamment :

- La température de l’huile de la boîte de vitesse,
- La température des roulements,
- Les vibrations selon les axes X, Y et Z,
- La pression d’huile,
- Le nombre de particules métalliques dans l’huile.

L’objectif principal de ce programme est de détecter automatiquement les anomalies mécaniques, d’identifier leur type, de localiser leur origine et de générer un système d’alerte

intelligent en temps réel.

IV.62 Prétraitement des données

Les données SCADA importées depuis Kaggle ont subi une étape de nettoyage comprenant la suppression des valeurs manquantes, la conversion des variables numériques et l'élimination des doublons. Cette étape a permis d'obtenir une base de données fiable et adaptée à l'apprentissage automatique.

IV.63 Génération des caractéristiques (Ingénierie des fonctionnalités)

Afin d'améliorer les performances du modèle, plusieurs variables supplémentaires ont été créées, telles que la moyenne des vibrations, l'écart-type des vibrations, le couple mécanique approximatif et l'indice de friction. Ces paramètres permettent une meilleure représentation du comportement mécanique du boîtier de vitesse.

IV.64 Résultats du modèle Random Forest

Après l'entraînement du modèle Random Forest, des performances très élevées ont été obtenues :

- Précision de l'entraînement = **100 %**
- Précision des tests $\approx$ **99.99 %**

Ces résultats montrent que le modèle est capable de détecter les anomalies mécaniques avec une très grande précision tout en conservant une bonne capacité de généralisation.

➤ Remarque :

La précision plus élevée du deuxième programme s'explique par l'utilisation de données SCADA réelles issues de Kaggle ainsi que par la présence de signatures mécaniques plus visibles, comme les vibrations et les variations de température, ce qui facilite la détection des défauts par le modèle.

IV.65 Analyse du rapport de classification

Le rapport de classification montre que les quatre états du système ont été correctement détectés :

- Normal,
- Défaut de roulement,
- Défaut de lubrification,

- Défaut de vibration sévère.

Les valeurs de précision, de rappel et de F1-score sont proches de 1.00 pour presque toutes les classes, ce qui confirme l'efficacité du système de diagnostic proposé.

IV.6.6 Analyse de la matrice de confusion

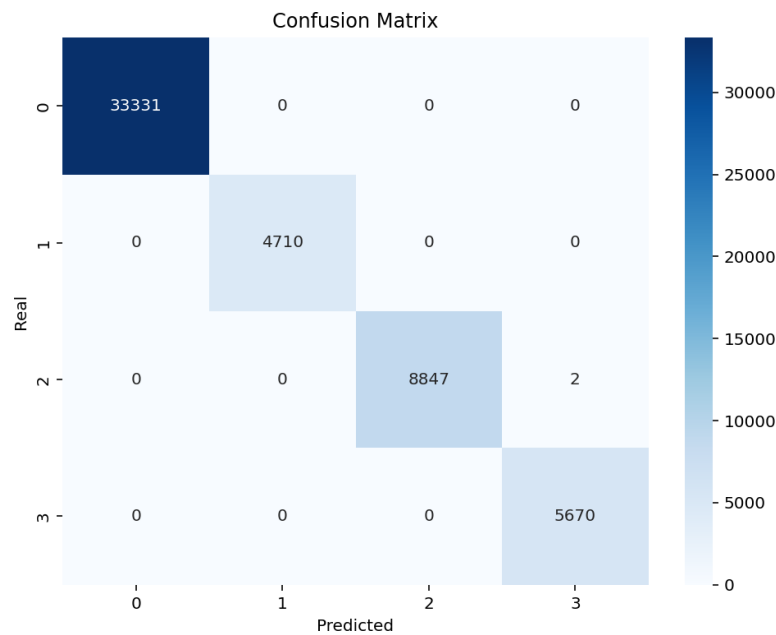


Figure IV.5 : La matrice de confusion

La matrice de confusion montre que la majorité des échantillons ont été correctement classifiés :

- 33331 états normaux détectés correctement,
- 4710 défauts de roulements correctement identifiés,
- 8847 défauts de lubrification correctement détectés,
- 5670 défauts de vibrations sévères correctement classifiés.

Le très faible nombre d'erreurs observées confirme la robustesse du modèle développé.

IV.67. Analyse du graphique fonctionnalité Importance

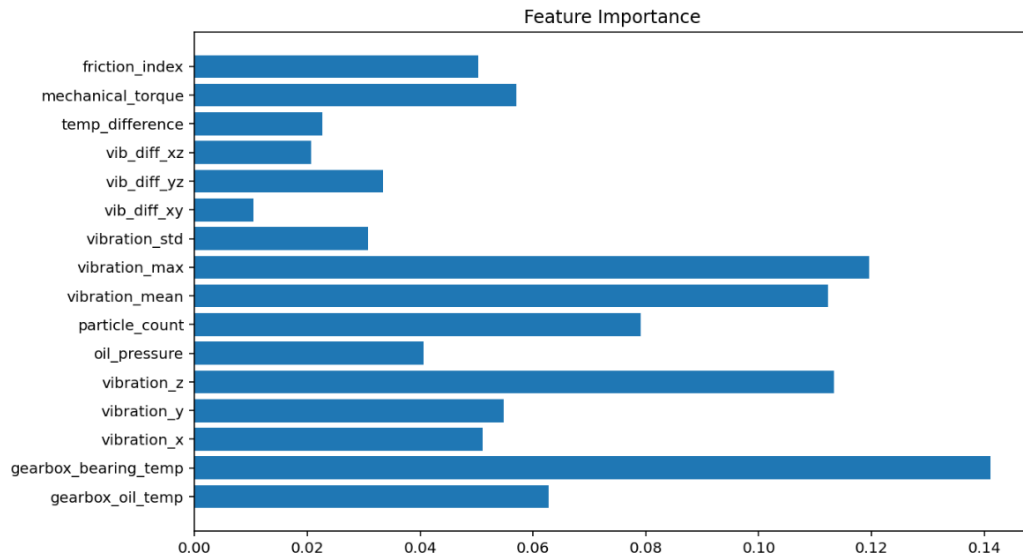


Figure IV.6 : Le graphique fonctionnalité Importance

Le graphique fonctionnalité Importance montre que les variables les plus influentes dans la prise de décision du modèle sont :

- Température du roulement de la boîte de vitesses
- Vibration maximale
- Vibration selon l'axe Z
- Nombre de particules dans l'huile

➤ Ces résultats sont cohérents avec le comportement réel des systèmes mécaniques, où la température et les vibrations représentent des indicateurs importants de dégradation.

IV.68 Analyse du système d'alerte intelligent

Le programme génère automatiquement une alerte lorsqu'un défaut est détecté.

L'alerte contient :

- Le type du défaut,
- La localisation probable,
- Le système concerné,
- Le niveau de confiance.

Cette fonctionnalité améliore la rapidité d'intervention et facilite les opérations de maintenance prédictive.

Exemple obtenu :

❖ **Défaut de lubrification**

- Location : Circuit d'huile
- Confidence : 1.00

Interprétation :

Le système détecte un problème dans le circuit de lubrification causé par une baisse de pression d'huile.

❖ **Défaut de roulement**

- Location : Roulement
- Confidence : 1.00

Interprétation :

Le modèle détecte une surchauffe des roulements accompagnée de fortes vibrations.

IV.69. Importance du système d'alerte

Cette fonctionnalité transforme le modèle d'intelligence artificielle en système intelligent de maintenance prédictive.

Elle permet :

- Une détection rapide des anomalies,
- Une intervention plus rapide des opérateurs,
- Une réduction des risques de panne,
- Une amélioration de la sécurité,
- Et une meilleure disponibilité de l'éolienne.

IV.7. Programme Python – Diagnostic des défauts aérodynamiques et électriques :

```
1 # =====
2 # PARTIE 1 : Lecture des fichiers CSV et préparation des données
3 import pandas as pd
4
5 path = r'C:\Users\EvoTech\Desktop\CSV'
6
7 data_normal = pd.read_csv(path + r'\data_real.csv', sep=';', decimal='.')
8 data_fault1 = pd.read_csv(path + r'\results_default1.csv', sep=';', decimal='.')
9 data_fault2 = pd.read_csv(path + r'\results_default2.csv', sep=';', decimal='.')
10
11 cols = ['Time', 'wind_data', 'rotor_speed',
12         'current_data_1', 'current_data_2',
13         'current_data_3', 'couple']
14
15 data_normal.columns = cols
16 data_fault1.columns = cols
17 data_fault2.columns = cols
18
19 # Labels
20 data_normal['label'] = 0
21 data_fault1['label'] = 1
22 data_fault2['label'] = 2
23
24 # Fusion des données
25 data_all = pd.concat([data_normal, data_fault1, data_fault2], ignore_index=True)
26
27 print("✓ Données chargées")
28 print("Taille des données :", data_all.shape)
29 print(data_all['label'].value_counts())
30 # =====
31 # PARTIE 2 : Nettoyage des données
32 # =====
33
34 cols_numeric = ['Time', 'wind_data', 'rotor_speed',
35                 'current_data_1', 'current_data_2',
36                 'current_data_3', 'couple']
37
38 for col in cols_numeric:
39     data_all[col] = pd.to_numeric(data_all[col], errors='coerce')
40
```

- Les résultats :

```
In [5]: %runfile C:/Users/EvoTech/Desktop/CSV/sanstitre0.py --wdir
✓ Données chargées
Taille des données : (119390, 8)
label
2    41165
1    39114
0     39111
Name: count, dtype: int64
✓ Après nettoyage : (119383, 8)
✓ Nouvelles features créées
✓ Modèle entraîné
📊 Précision du modèle : 98.26%

📊 Rapport de classification :

              precision    recall  f1-score   support

   Normal         1.00        1.00         1.00       7895
  Fault1         0.96        0.99         0.97       7864
  Fault2         0.99        0.96         0.97       8118

 accuracy          0.98          0.98          0.98       23877
 macro avg         0.98          0.98          0.98       23877
weighted avg         0.98          0.98          0.98       23877

Train accuracy : 0.984398885933868
Test accuracy : 0.9825773757172174

===== FINAL DIAGNOSTIC =====

   fault_name  description  ...  location  confidence
0   Wind Fault  Low Wind Speed  ...  Wind System    0.976275
1     Normal      No fault      ...      -         0.999432
2  Electrical Fault  Short Circuit  ...   Phase C    0.971164
3     Normal      No fault      ...      -         1.000000
4  Electrical Fault  Short Circuit  ...   Phase B    0.983692
5   Wind Fault  Low Wind Speed  ...  Wind System    0.976931
6   Wind Fault  Low Wind Speed  ...  Wind System    0.935673
7  Electrical Fault  Short Circuit  ...   Phase C    0.998085
8  Electrical Fault  Short Circuit  ...   Phase B    0.951033
9  Electrical Fault  Short Circuit  ...   Phase A    0.990761

[10 rows x 5 columns]
```

===== SMART ALERT SYSTEM =====

△ WIND FAULT DETECTED

Sample Index : 43041

Fault Type : Wind Fault

Description : Low Wind Speed

System : Turbine (Aerodynamic)

Location : Wind System

Confidence : 1.00

△ WIND FAULT DETECTED

Sample Index : 43312

Fault Type : Wind Fault

Description : Low Wind Speed

System : Turbine (Aerodynamic)

Location : Wind System

Confidence : 1.00

△ ELECTRICAL FAULT DETECTED

Sample Index : 83621

Fault Type : Electrical Fault

Description : Short Circuit

System : Generator

Location : Phase A

Confidence : 1.00

△ ELECTRICAL FAULT DETECTED

Sample Index : 83622

Fault Type : Electrical Fault

Description : Short Circuit

System : Generator

Location : Phase A

Confidence : 1.00

IV.8 Programme Python – Diagnostic des défauts mécaniques de la boîte de vitesses

```
1 # =====
2 # PARTIE 1 : Lecture du fichier CSV et préparation des données
3 # =====
4
5 import pandas as pd
6 import numpy as np
7
8 path = r'C:\Users\EvoTech\Desktop\CSV'
9
10 # Lecture du fichier SCADA du Gearbox
11 data_all = pd.read_csv(
12     path + r'\turbine_5yr_complex_data.csv',
13     sep=';'
14 )
15
16 print("✓ Données chargées")
17
18 print("Taille des données :", data_all.shape)
19
20 print("\n🚀 Les 5 premières lignes :\n")
21 print(data_all.head())
22
23 # =====
24 # PARTIE 2 : Nettoyage des données
25 # =====
26
27 cols_numeric = [
28     'gearbox_oil_temp',
29     'gearbox_bearing_temp',
30     'vibration_x',
31     'vibration_y',
32     'vibration_z',
33     'oil_pressure',
34     'particle_count'
35 ]
36
37 # Conversion des valeurs en float
38 for col in cols_numeric:
39     data_all[col] = pd.to_numeric(
40         data_all[col], errors='coerce'
41     )
```

Les résultats :

```
101: %cd C:/users/EvoTech/desktop/CSV/sans titre.py --wdir
✓ Données chargées
Taille des données : (262800, 8)

🚀 Les 5 premières lignes :
   timestamp  gearbox_oil_temp  ...  oil_pressure  particle_count
0  01/01/2025 00:00           59.24  ...         4.53             100
1  01/01/2025 00:10           60.12  ...         4.48             100
2  01/01/2025 00:20           59.50  ...         4.53             100
3  01/01/2025 00:30           60.28  ...         4.54             100
4  01/01/2025 00:40           60.72  ...         4.49             100

[5 rows x 8 columns]

✓ Après nettoyage : (262800, 8)
✓ Nouvelles features créées

📊 Nombre des états détectés :
label
0    167114
1     23324
2     44007
3      28355
Name: count, dtype: int64

✓ Modèle de détection entraîné

📈 Précision du modèle : 100.00%

📊 Rapport de classification :
              precision  recall  f1-score  support
Normal              1.00     1.00     1.00    33331
Bearing Fault       1.00     1.00     1.00     4710
Lubrication Fault   1.00     1.00     1.00     8849
Severe Vibration    1.00     1.00     1.00     5670

accuracy              1.00
macro avg             1.00
weighted avg          1.00
```

Chapitre IV : Utilisation des méthodes intelligentes pour la détection et la localisation des défauts dans une éolienne

```
Train accuracy: 1.0
Test accuracy: 0.9999619482496195
```

```
===== FINAL DIAGNOSTIC =====
```

	fault_name	...	confidence
0	Normal	...	0.999652
1	Lubrication Fault	...	1.000000
2	Bearing Fault	...	0.999979
3	Normal	...	0.999898
4	Normal	...	0.999997
5	Severe Vibration Fault	...	0.999288
6	Normal	...	0.999983
7	Lubrication Fault	...	0.999766
8	Severe Vibration Fault	...	0.999158
9	Normal	...	0.999843

```
[10 rows x 5 columns]
```

```
===== ALERT SYSTEM =====
```

```
🚨 FAULT DETECTED !
```

```
...
```

```
△ LUBRICATION FAULT DETECTED
```

```
Sample Index : 1
```

```
Fault Type : Lubrication Fault
```

```
Description : Oil pressure problem
```

```
System : Lubrication System
```

```
Location : Oil Circuit
```

```
Confidence : 1.00
```

```
△ BEARING FAULT DETECTED
```

```
Sample Index : 2
```

```
Fault Type : Bearing Fault
```

```
Description : Bearing overheating + vibration
```

```
System : Bearing
```

```
Location : Bearing
```

```
Confidence : 1.00
```

```
...
```

```
△ SEVERE VIBRATION FAULT DETECTED
```

```
Sample Index : 5
```

```
Fault Type : Severe Vibration Fault
```

```
Description : Abnormal vibration detected
```

```
System : Gearbox
```

```
Location : Axis Y
```

```
Confidence : 1.00
```

```
△ LUBRICATION FAULT DETECTED
```

```
Sample Index : 7
```

```
Fault Type : Lubrication Fault
```

```
Description : Oil pressure problem
```

```
System : Lubrication System
```

```
Location : Oil Circuit
```

```
Confidence : 1.00
```

```
...
```

```
△ SEVERE VIBRATION FAULT DETECTED
```

```
Sample Index : 8
```

```
Fault Type : Severe Vibration Fault
```

```
Description : Abnormal vibration detected
```

```
System : Gearbox
```

```
Location : Axis Y
```

```
Confidence : 1.00
```

```
✅ SYSTEM NORMAL
```

IV.9. Perspectives de notre projet :

IV.9.1. Caractéristiques techniques de la plateforme éolienne Hilton RE570 :

L'université met à disposition une plateforme expérimentale intégrée, composée de véritables éoliennes dédiées au développement et au test de systèmes de surveillance intelligents et d'algorithmes de détection de défauts. L'éolienne à axe horizontal de type Hilton RE570 constitue le pilier de cette plateforme, ayant été conçue spécifiquement à des fins pédagogiques et de recherche. Ce système est doté d'un générateur à courant alternatif triphasé (AC) équipé d'un redresseur permettant la conversion de l'énergie en courant continu avec une tension nominale de 13,8 V CC. De plus, la plateforme comprend un système de mesure et de contrôle sophistiqué, incluant des anémomètres pour mesurer la vitesse du vent et des tachymètres pour la vitesse de rotation, ainsi qu'une unité d'acquisition de données permettant d'étudier et de simuler les performances énergétiques avec précision au sein du laboratoire.[33]



Figure IV.7 : L'éolienne à axe horizontal de type Hilton RE570

IV.9.2 Méthodologie de développement et perspectives de recherche

Afin de contribuer au développement de ce système, nous avons mis en place un cadre de travail exploitable pour de futures recherches sur la maintenance intelligente. L'idée repose sur le suivi en temps réel des indicateurs de fonctionnement essentiels (tels que la tension, le courant, la vitesse et la puissance) et leur transmission instantanée vers un ordinateur pour traitement. Une partie du système a été développée logiciellement sous l'environnement Anaconda et l'éditeur Spyder afin d'analyser ces données et de détecter les anomalies en les comparant aux états de fonctionnement nominaux. En cas de défaut, le programme émet un ordre de commande vers une carte Arduino Uno pour exécuter les mesures de protection nécessaires, comme l'arrêt de la turbine ou l'isolation du système.

Ce projet, qui s'achève sur cette phase d'analyse initiale, ouvre la voie aux futurs étudiants pour optimiser les algorithmes et intégrer des techniques d'intelligence artificielle afin de développer un système de contrôle plus performant.

IDÉE PROPOSÉE : SURVEILLANCE ET DÉTECTION DES DÉFAUTS D'UNE ÉOLIENNE AVEC ARDUINO

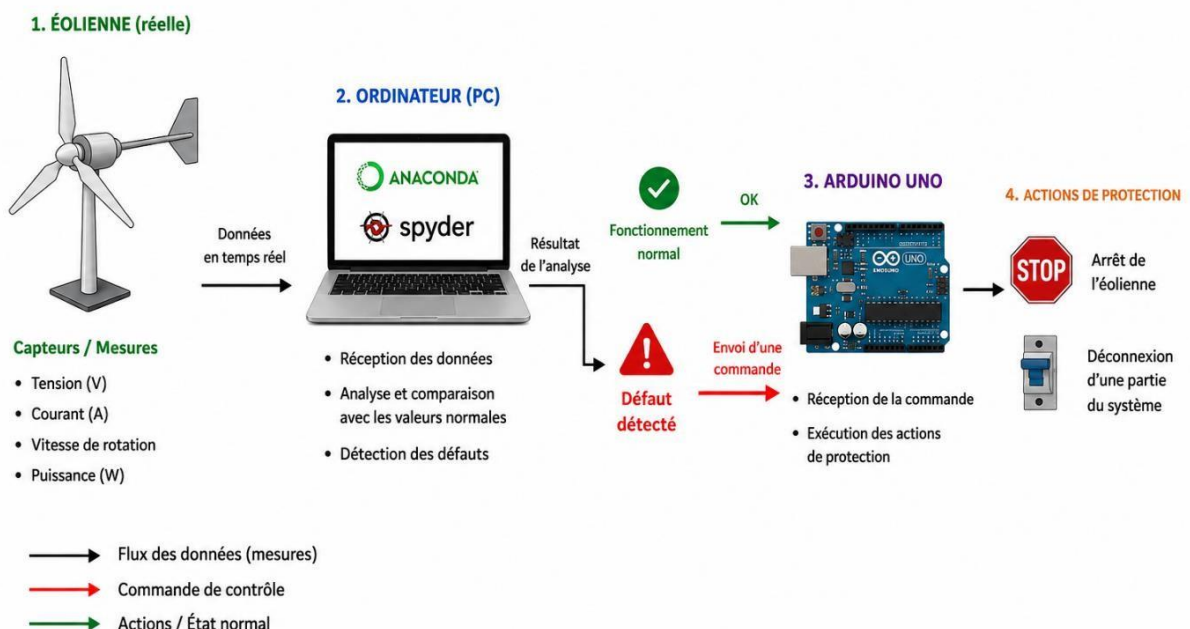


Figure IV.8 : surveillance et détection des défauts d'une éolienne avec Arduino (idée proposée)

IV.10. Conclusion :

Pour clore cette partie de notre étude, nous avons concrétisé les étapes pratiques et techniques de notre programme applicatif. Nous avons d'abord préparé l'environnement de travail en utilisant la plateforme Anaconda et l'éditeur de code Spyder, vu la flexibilité qu'offre ce duo dans la manipulation des codes informatiques. De plus, nous avons veillé à expliquer l'organisation et le formatage des données dans des fichiers CSV, une étape qui était indispensable pour garantir la précision des résultats sur lesquels nous allons nous baser.

À travers l'exécution du programme et l'analyse des statistiques obtenues, nous avons essayé de comprendre et d'interpréter chaque résultat pour atteindre notre objectif principal : exploiter l'intelligence artificielle dans le processus de prédiction des pannes. En effet, le programme que nous avons développé ne se contente pas de repérer les anomalies, mais il vise à anticiper la panne avant qu'elle ne survienne dans les turbines éoliennes.

Nous pensons que cette orientation vers la maintenance prédictive est la solution idéale pour éviter les arrêts soudains et réduire les coûts, ce qui rend la production de l'énergie éolienne plus stable et plus rentable sur les plans technique et économique.

Conclusion Générale

En guise de conclusion à ce mémoire portant sur la maintenance prédictive des éoliennes par l'intelligence artificielle, il apparaît clairement que les outils technologiques modernes jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances des systèmes d'énergie verte. Aujourd'hui, les éoliennes se positionnent comme l'une des sources les plus importantes de production d'électricité propre à travers le monde. À travers cette étude, nous avons pu approfondir notre compréhension des défis industriels liés à la maintenance, tout en obtenant une vision plus claire des principes fondamentaux du vent en tant que source d'énergie, ainsi qu'une explication détaillée du fonctionnement interne des turbines.

Dans le cadre de ce projet, l'accent a été mis sur les défaillances susceptibles d'impacter les performances et la durée de vie des éoliennes. Un programme a été développé progressivement sous l'environnement Anaconda, en utilisant l'interface Spyder, combinant des techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning) et de traitement de données brutes. Ce système repose sur une architecture intelligente capable de prédire les pannes futures, ce qui contribue à réduire les coûts de réparation, à limiter les arrêts imprévus et à améliorer la stabilité globale du processus de production.

Les résultats obtenus démontrent que le système proposé est capable de détecter et de prédire les pannes avec une bonne précision, confirmant ainsi l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance prédictive des éoliennes avant l'apparition effective des pannes. Par ailleurs, cette étude ouvre de nouvelles perspectives de recherche, notamment la collecte de volumes de données brutes plus importants, le recours à des techniques d'apprentissage profond (Deep Learning) plus avancées, ainsi que la possibilité de coupler ces systèmes aux technologies de l'Internet des Objets (IoT) afin d'optimiser davantage les performances du système.

Enfin, nous espérons que ce mémoire aura contribué à mettre en évidence l'importance de l'intelligence artificielle dans le domaine des énergies renouvelables, non seulement sur le plan théorique, mais aussi à travers des applications pratiques sur le terrain. Nous espérons également qu'il constituera une référence utile pour les étudiants et les chercheurs s'intéressant à ce domaine en constante évolution et en pleine expansion, qui recèle encore de nombreuses opportunités de développement et d'innovation pour l'avenir.

Annexe :

Programme Python – Diagnostic des défauts aérodynamiques et électriques :

```

1 # =====
2 # PARTIE 1 : Lecture des fichiers CSV et préparation des données
3 import pandas as pd
4
5 path = r'C:\Users\EvoTech\Desktop\CSV'
6
7 data_normal = pd.read_csv(path + r'\data_real.csv', sep=';', decimal='.')
8 data_fault1 = pd.read_csv(path + r'\results_default1.csv', sep=';', decimal='.')
9 data_fault2 = pd.read_csv(path + r'\results_default2.csv', sep=';', decimal='.')
10
11 cols = ['Time', 'wind_data', 'rotor_speed',
12        'current_data_1', 'current_data_2',
13        'current_data_3', 'couple']
14
15 data_normal.columns = cols
16 data_fault1.columns = cols
17 data_fault2.columns = cols
18
19 # Labels
20 data_normal['label'] = 0
21 data_fault1['label'] = 1
22 data_fault2['label'] = 2
23
24 # Fusion des données
25 data_all = pd.concat([data_normal, data_fault1, data_fault2], ignore_index=True)
26
27 print("✓ Données chargées")
28 print("Taille des données :", data_all.shape)
29 print(data_all['label'].value_counts())
30 # =====
31 # PARTIE 2 : Nettoyage des données
32 # =====
33
34 cols_numeric = ['Time', 'wind_data', 'rotor_speed',
35                'current_data_1', 'current_data_2',
36                'current_data_3', 'couple']
37
38 for col in cols_numeric:
39     data_all[col] = pd.to_numeric(data_all[col], errors='coerce')
40

```

;

```

41 # Remplacement des valeurs manquantes
42 data_all.fillna(data_all.mean(), inplace=True)
43
44 # Suppression des doublons
45 data_all = data_all.drop_duplicates()
46
47 print("✓ Après nettoyage :", data_all.shape)
48
49 # =====
50 # PARTIE 3 : Feature Engineering
51 # =====
52
53 # Caractéristiques du couple
54 data_all['couple_squared'] = data_all['couple'] ** 2
55 data_all['couple_per_speed'] = data_all['couple'] / (data_all['rotor_speed'] + 1e-9)
56 data_all['couple_per_wind'] = data_all['couple'] / (data_all['wind_data'] + 1e-9)
57
58 # Différences des courants
59 data_all['current_diff_12'] = abs(data_all['current_data_1'] - data_all['current_data_2'])
60 data_all['current_diff_23'] = abs(data_all['current_data_2'] - data_all['current_data_3'])
61 data_all['current_diff_13'] = abs(data_all['current_data_1'] - data_all['current_data_3'])
62
63 # Moyenne et écart-type
64 data_all['current_mean'] = (
65     data_all['current_data_1'] +
66     data_all['current_data_2'] +
67     data_all['current_data_3']
68 ) / 3
69
70 data_all['current_std'] = data_all[
71     ['current_data_1', 'current_data_2', 'current_data_3']
72 ].std(axis=1)
73
74 print("✓ Nouvelles features créées")
75
76
77

```

```

78 # =====
79 # PARTIE 4 : Entraînement du modèle
80 # =====
81
82 from sklearn.model_selection import train_test_split
83 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
84 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
85 from sklearn.metrics import classification_report, accuracy_score
86
87 # Variables d'entrée
88 X = data_all[
89     ['rotor_speed',
90      'wind_data',
91      'current_data_1', 'current_data_2', 'current_data_3',
92      'current_diff_12', 'current_diff_23', 'current_diff_13',
93      'current_mean', 'current_std',
94      'couple',
95      'couple_squared',
96      'couple_per_speed',
97      'couple_per_wind']
98 ]
99
100 y = data_all['label']
101
102 # Division des données
103 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
104     X, y, test_size=0.2, random_state=42
105 )
106
107 # Normalisation
108 scaler = StandardScaler()
109 X_train = scaler.fit_transform(X_train)
110 X_test = scaler.transform(X_test)
111
112 # Modèle Random Forest
113 model = RandomForestClassifier(
114     n_estimators=300,
115     max_depth=10,
116     random_state=42
117 )
118

```

```

119 model.fit(X_train, y_train)
120
121 print("✓ Modèle entraîné")
122
123 # =====
124 # PARTIE 5 : Évaluation
125 # =====
126
127 y_pred = model.predict(X_test)
128
129 accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
130
131 print(f"🎯 Précision du modèle : {accuracy * 100:.2f}%")
132
133 print("\n📊 Rapport de classification :\n")
134 print(classification_report(
135     y_test,
136     y_pred,
137     target_names=['Normal', 'Fault1', 'Fault2']
138 ))
139
140 print("Train accuracy :", model.score(X_train, y_train))
141 print("Test accuracy :", model.score(X_test, y_test))
142
143 from sklearn.metrics import confusion_matrix
144 import seaborn as sns
145 import matplotlib.pyplot as plt
146
147 cm = confusion_matrix(y_test, y_pred)
148
149 sns.heatmap(cm, annot=True, fmt='d')
150 plt.show()
151
152 import matplotlib.pyplot as plt
153
154 plt.barh(X.columns, model.feature_importances_)
155 plt.show()
156
157
158

```

```

159 # =====
160 # INTERPRÉTATION + NOM DU DÉFAUT + LOCALISATION
161 # =====
162
163 import pandas as pd
164 import numpy as np
165
166 # 1) Nom des défauts selon la prédiction
167 def get_fault_info(pred):
168
169     if pred == 0:
170         return ("Normal", "No fault", "-")
171
172     elif pred == 1:
173         return ("Wind Fault", "Low Wind Speed", "Turbine (Aerodynamic)")
174
175     elif pred == 2:
176         return ("Electrical Fault", "Short Circuit", "Generator")
177
178
179 # 2) Détection de la localisation
180 def detect_location(row, pred):
181
182     # Wind Fault
183     if pred == 1:
184         return "Wind System"
185
186     # Electrical Fault
187     elif pred == 2:
188
189         currents = [
190             row['current_data_1'],
191             row['current_data_2'],
192             row['current_data_3']
193         ]
194
195         phases = ["Phase A", "Phase B", "Phase C"]
196
197         # Calcul de la moyenne
198         mean_current = sum(currents) / 3
199
200         # Calcul de l'écart
201         deviations = [abs(c - mean_current) for c in currents]
202
203         # Phase avec le plus grand déséquilibre
204         return phases[deviations.index(max(deviations))]
205
206     else:
207         return "-"
208
209
210 # 3) Création du tableau des résultats
211 results = pd.DataFrame(X_test, columns=X.columns)
212
213 results['prediction'] = y_pred
214
215 # Conversion des prédictions en noms compréhensibles
216 results[['fault_name', 'description', 'system']] = results['prediction'].apply(
217     lambda x: pd.Series(get_fault_info(x))
218 )
219
220 # Détermination de la localisation
221 results['location'] = results.apply(
222     lambda row: detect_location(row, row['prediction']), axis=1
223 )
224
225 # 4) Ajout du niveau de confiance
226 proba = model.predict_proba(X_test)
227 results['confidence'] = proba.max(axis=1)
228
229 # 5) Affichage des résultats
230 print("\n===== FINAL DIAGNOSTIC =====\n")
231
232 print(results[
233     ['fault_name', 'description', 'system', 'location', 'confidence']
234 ].head(10))
235
236

```

```

237 # =====
238 # SMART ALERT SYSTEM
239 # =====
240
241 import winsound
242 import tkinter as tk
243 from tkinter import messagebox
244
245 print("\n==== SMART ALERT SYSTEM =====\n")
246
247 # =====
248 # DETECT LOCATION
249 # =====
250
251
252 def detect_location(row, pred):
253
254     # Wind Fault
255     if pred == 1:
256         return "Wind System"
257
258     # Electrical Fault
259     elif pred == 2:
260
261         currents = [
262             row['current_data_1'],
263             row['current_data_2'],
264             row['current_data_3']
265         ]
266
267         phases = [
268             "Phase A",
269             "Phase B",
270             "Phase C"
271         ]
272
273         mean_current = sum(currents) / 3
274
275         deviations = [
276             abs(c - mean_current)
277             for c in currents
278

```

```

280         return phases[
281             deviations.index(max(deviations))
282         ]
283
284     else:
285         return "."
286
287 # =====
288 # PREDICTION
289 # =====
290
291 all_data_scaled = scaler.transform(X)
292 pred_all = model.predict(all_data_scaled)
293 proba_all = model.predict_proba(all_data_scaled)
294
295 # =====
296 # STOCKAGE DES ALERTES
297 # =====
298
299 wind_alerts = []
300 electrical_alerts = []
301
302 for i in range(len(pred_all)):
303
304     pred = pred_all[i]
305
306     # Ignorer l'état normal
307     if pred == 0:
308         continue
309
310     confidence = proba_all[i].max()
311
312     fault = get_fault_info(pred)
313
314     location = detect_location(
315         X.iloc[i],
316         pred
317     )

```

```

323     alert = {
324         "index": i,
325         "pred": pred,
326         "fault": fault,
327         "location": location,
328         "confidence": confidence
329     }
330
331     # Défaut aérodynamique
332     if pred == 1:
333         wind_alerts.append(alert)
334
335     # Défaut électrique
336     elif pred == 2:
337         electrical_alerts.append(alert)
338
339
340 # =====
341 # TRI PAR NIVEAU DE CONFIANCE
342 # =====
343
344 wind_alerts = sorted(
345     wind_alerts,
346     key=lambda x: x["confidence"],
347     reverse=True
348 )
349
350 electrical_alerts = sorted(
351     electrical_alerts,
352     key=lambda x: x["confidence"],
353     reverse=True
354 )
355
356
357 # =====
358 # SÉLECTION DES ALERTES PRINCIPALES
359 # =====
360
361 final_alerts = (
362     wind_alerts[:2] +
363     electrical_alerts[:2]
364 )

```

```

367 # =====
368 # AFFICHAGE DES ALERTES
369 # =====
370
371 for alert in final_alerts:
372
373     # =====
374     # WIND FAULT
375     # =====
376
377     if alert["pred"] == 1:
378
379         winsound.Beep(1000, 700)
380
381         title = "▲ WIND FAULT DETECTED"
382
383     # =====
384     # ELECTRICAL FAULT
385     # =====
386
387     else:
388
389         winsound.Beep(1500, 1000)
390
391         title = "▲ ELECTRICAL FAULT DETECTED"
392
393     # =====
394     # MESSAGE D'ALERTE
395     # =====
396
397     alert_message = f"""
398 {title}
399
400 Sample Index : {alert['index']}
401 Fault Type : {alert['fault'][0]}
402 Description : {alert['fault'][1]}
403 System : {alert['fault'][2]}
404
405
406
407

```

```
408     Location : {alert['location']}
409
410     Confidence : {alert['confidence']:.2f}
411     """
412
413     print(alert_message)
414
415     root = tk.Tk()
416     root.withdraw()
417
418     messagebox.showwarning(
419         "SMART ALERT SYSTEM",
420         alert_message
421     )
422
423     root.destroy()
424
425
426     # =====
427     # CAS SANS DÉFAUT
428     # =====
429
430     if len(final_alerts) == 0:
431
432         print("✅ SYSTÈME EN FONCTIONNEMENT NORMAL")
433
434         root = tk.Tk()
435         root.withdraw()
436
437         messagebox.showinfo(
438             "SYSTEM STATUS",
439             "No fault detected"
440         )
441
442         root.destroy()
```

. Programme Python – Diagnostic des défauts mécaniques de la boîte de vitesses

```

1  # =====
2  # PARTIE 1 : Lecture du fichier CSV et préparation des données
3  # =====
4
5  import pandas as pd
6  import numpy as np
7
8  path = r'C:\Users\EvoTech\Desktop\CSV'
9
10 # Lecture du fichier SCADA du Gearbox
11 data_all = pd.read_csv(
12     path + r'\turbine_5yr_complex_data.csv',
13     sep=';'
14 )
15
16 print("✓ Données chargées")
17
18 print("Taille des données :", data_all.shape)
19
20 print("\n✈ Les 5 premières lignes :\n")
21 print(data_all.head())
22
23
24 # =====
25 # PARTIE 2 : Nettoyage des données
26 # =====
27
28 cols_numeric = [
29     'gearbox_oil_temp',
30     'gearbox_bearing_temp',
31     'vibration_x',
32     'vibration_y',
33     'vibration_z',
34     'oil_pressure',
35     'particle_count'
36 ]
37
38 # Conversion des valeurs en float
39 for col in cols_numeric:
40
41     data_all[col] = pd.to_numeric(

```

```

42         data_all[col],
43         errors='coerce'
44     )
45
46 # Remplacement des valeurs manquantes
47 data_all.fillna(
48     data_all.mean(numeric_only=True),
49     inplace=True
50 )
51
52 # Suppression des doublons
53 data_all = data_all.drop_duplicates()
54
55 print("\n✓ Après nettoyage :", data_all.shape)
56
57
58 # =====
59 # PARTIE 3 : Feature Engineering
60 # =====
61
62 # Moyenne des vibrations
63 data_all['vibration_mean'] = (
64     data_all['vibration_x'] +
65     data_all['vibration_y'] +
66     data_all['vibration_z']
67 ) / 3
68
69 # Vibration maximale
70 data_all['vibration_max'] = data_all[
71     ['vibration_x', 'vibration_y', 'vibration_z']
72 ].max(axis=1)
73
74 # Écart-type des vibrations
75 data_all['vibration_std'] = data_all[
76     ['vibration_x', 'vibration_y', 'vibration_z']
77 ].std(axis=1)
78
79 # Différences des vibrations
80 data_all['vib_diff_xy'] = abs(

```

```

82 data_all['vib_diff_xy'] = abs(
83     data_all['vibration_x'] -
84     data_all['vibration_y']
85 )
86
87 data_all['vib_diff_yz'] = abs(
88     data_all['vibration_y'] -
89     data_all['vibration_z']
90 )
91
92 data_all['vib_diff_xz'] = abs(
93     data_all['vibration_x'] -
94     data_all['vibration_z']
95 )
96 # Différence de température
97 data_all['temp_difference'] = abs(
98     data_all['gearbox_oil_temp'] -
99     data_all['gearbox_bearing_temp']
100 )
101
102 # Couple mécanique approximatif
103 data_all['mechanical_torque'] = (
104     data_all['gearbox_bearing_temp'] *
105     data_all['oil_pressure']
106 )
107
108 # Indice de friction
109 data_all['friction_index'] = (
110     data_all['particle_count'] *
111     data_all['vibration_mean']
112 )
113
114 print("✓ Nouvelles features créées")
115
116 # =====
117 # PARTIE 4 : Création des labels des défauts
118 # =====
119 # 0 = Normal
120 # 1 = Bearing Fault
121 # 2 = Lubrication Fault
122 # 3 = Severe Vibration Fault
123

```

```

125 conditions = [
126
127     (
128         (data_all['vibration_max'] < 0.025) &
129         (data_all['gearbox_bearing_temp'] < 80) &
130         (data_all['oil_pressure'] > 4.2)
131     ),
132
133     (
134         (data_all['vibration_max'] >= 0.025) &
135         (data_all['gearbox_bearing_temp'] >= 80)
136     ),
137
138     (
139         (data_all['oil_pressure'] < 4.2) |
140         (data_all['particle_count'] > 800)
141     ),
142
143     (
144         data_all['vibration_std'] > 0.003
145     )
146 ]
147
148 choices = [0, 1, 2, 3]
149
150 data_all['label'] = np.select(
151     conditions,
152     choices,
153     default=0
154 )
155
156
157 print("\n🔍 Nombre des états détectés :\n")
158 print(data_all['label'].value_counts().sort_index())
159
160 # =====
161 # PARTIE 5 : Entraînement du modèle
162 # =====
163
164 from sklearn.model_selection import train_test_split
165 from sklearn.preprocessing import StandardScaler

```

```

165 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
166 # Features
167 X = data_all[
168     [
169         'gearbox_oil_temp',
170         'gearbox_bearing_temp',
171         'vibration_x',
172         'vibration_y',
173         'vibration_z',
174         'oil_pressure',
175         'particle_count',
176         'vibration_mean',
177         'vibration_max',
178         'vibration_std',
179         'vib_diff_xy',
180         'vib_diff_yz',
181         'vib_diff_xz',
182         'temp_difference',
183         'mechanical_torque',
184         'friction_index'
185     ]
186 ]
187
188 # Labels
189 y = data_all['label']
190
191 # Division des données
192 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
193     X,
194     y,
195     test_size=0.2,
196     random_state=42
197 )
198
199 # Normalisation
200 scaler = StandardScaler()
201
202 X_train = scaler.fit_transform(X_train)
203 X_test = scaler.transform(X_test)
204
205

```

```

206 # Modèle
207 model = RandomForestClassifier(
208     n_estimators=300,
209     max_depth=12,
210     random_state=42
211 )
212
213 model.fit(X_train, y_train)
214
215 print("\n✓ Modèle de détection entraîné")
216
217 # =====
218 # PARTIE 6 : Évaluation du modèle
219 # =====
220
221 from sklearn.metrics import (
222     classification_report,
223     accuracy_score,
224     confusion_matrix
225 )
226
227 y_pred = model.predict(X_test)
228
229 accuracy = accuracy_score(
230     y_test,
231     y_pred
232 )
233
234 print(f"\n📊 Précision du modèle : {accuracy * 100:.2f}%")
235
236 print("\n📊 Rapport de classification :\n")
237
238 print(
239     classification_report(
240         y_test,
241         y_pred,
242         labels=[0,1,2,3],
243         target_names=[
244             'Normal',

```

```

247         'Bearing Fault',
248         'Lubrication Fault',
249         'Severe Vibration'
250     ],
251     zero_division=0
252 )
253 )
254
255 print(
256     "Train accuracy:",
257     model.score(X_train, y_train)
258 )
259 print(
260     "Test accuracy:",
261     model.score(X_test, y_test)
262 )
263 # =====
264 # PARTIE 7 : Affichage de la Confusion Matrix
265 # =====
266 import seaborn as sns
267 import matplotlib.pyplot as plt
268
269 cm = confusion_matrix(
270     y_test,
271     y_pred
272 )
273 plt.figure(figsize=(8,6))
274
275 sns.heatmap(
276     cm,
277     annot=True,
278     fmt='d',
279     cmap='Blues'
280 )
281 plt.title("Confusion Matrix")

```

```

289 plt.xlabel("Predicted")
290 plt.ylabel("Real")
291 plt.show()
292
293 # =====
294 # PARTIE 8 : Importance des Features
295 # =====
296
297 plt.figure(figsize=(10,6))
298
299 plt.barh(
300     X.columns,
301     model.feature_importances_
302 )
303
304 plt.title("Feature Importance")
305
306 plt.show()
307
308 # =====
309 # PARTIE 9 : INTERPRETATION + FAULT NAME
310 # =====
311
312 def get_fault_info(pred):
313
314     if pred == 0:
315
316         return (
317             "Normal",
318             "No anomaly detected",
319             "Gearbox System"
320         )
321
322     elif pred == 1:
323
324         return (
325             "Bearing Fault",
326             "Bearing overheating + vibration",
327             "Bearing"
328         )
329
330

```

```

331     elif pred == 2:
332
333         return (
334             "Lubrication Fault",
335             "Oil pressure problem",
336             "Lubrication System"
337         )
338
339     elif pred == 3:
340
341         return (
342             "Severe Vibration Fault",
343             "Abnormal vibration detected",
344             "Gearbox"
345         )
346 # =====
347 # PARTIE 10 : Détermination de la localisation du défaut
348 # =====
349
350 def detect_location(row, pred):
351
352     if pred == 1:
353
354         return "Bearing"
355
356     elif pred == 2:
357
358         return "Oil Circuit"
359
360     elif pred == 3:
361
362         vibrations = [
363             row['vibration_x'],
364             row['vibration_y'],
365             row['vibration_z']
366         ]
367         axes = [
368             "Axis X",
369             "Axis Y",
370             "Axis Z"
371         ]

```

```

373         return axes[
374             vibrations.index(max(vibrations))
375         ]
376
377     else:
378
379         return "-"
380 # =====
381 # PARTIE 11 : Création du tableau des résultats
382 # =====
383
384 results = pd.DataFrame(
385     X_test,
386     columns=X.columns
387 )
388
389 results['prediction'] = y_pred
390
391 results[
392     ['fault_name', 'description', 'system']
393 ] = results['prediction'].apply(
394     lambda x: pd.Series(
395         get_fault_info(x)
396     )
397 )
398
399 results['location'] = results.apply(
400     lambda row: detect_location(
401         row,
402         row['prediction']
403     ),
404     axis=1
405 )
406
407 # Niveau de confiance
408 proba = model.predict_proba(X_test)
409
410 results['confidence'] = proba.max(axis=1)
411
412 print("\n===== FINAL DIAGNOSTIC =====\n")
413 print(
414

```

```

414
415     results[
416         [
417             'fault_name',
418             'description',
419             'system',
420             'location',
421             'confidence'
422         ]
423     ].head(10)
424
425 )
426 # =====
427 # PARTIE 13 : Affichage de la distribution des défauts
428 # =====
429
430 plt.figure(figsize=(8,5))
431
432 sns.countplot(
433     x='fault_name',
434     data=results
435 )
436
437 plt.title("Detected Faults")
438
439 plt.xticks(rotation=10)
440
441 plt.show()
442
443 # =====
444 # PARTIE 14 : Système d'alerte des défauts
445 # =====
446
447 import winsound
448
449 print("\n===== ALERT SYSTEM =====\n")
450
451 # Extraction des défauts uniquement
452 alerts = results[
453     results['prediction'] != 0
454 ]
455

```

```

456
457 # Si des défauts existent
458 if len(alerts) > 0:
459
460     print("🚨 FAULT DETECTED !\n")
461
462     # Signal sonore
463     winsound.Beep(1000, 1000)
464
465     # Affichage des 5 premiers défauts
466     for i, row in alerts.head(5).iterrows():
467
468         print("=====")
469
470         print(f"🚨 Fault Name : {row['fault_name']}")
471
472         print(f"📍 Location : {row['location']}")
473
474         print(f"⚙️ System : {row['system']}")
475
476         print(f"📊 Confidence : {row['confidence']:.2f}")
477
478         print(f"📄 Description: {row['description']}")
479
480         print("=====\n")
481
482 # Si aucun défaut n'est détecté
483 else:
484
485     print("✅ SYSTEM NORMAL")
486
487     print("No faults detected.")

```

Références Bibliographiques

- [1] M. Mohamed Lamine & M. Ahcen, mémoire de MASTER « Analyse de l'historique d'un équipement et proposition d'action en maintenance », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, Année 2011
- [2] Norme AFNOR X 60-010
- [3] G. Hocine Chapitre 1 : ' Politique et organisation de la maintenance', Centre Universitaire Abdelhafid Bousouf Mila, support de cours, Année universitaire 2022/2023.
- [4] B. Mahfoud, (2017). Analyse de la fonction maintenance à l'unité TSS – SIDER Annaba [Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba].
- [5] B. Samira, cour de Sécurité et maintenance, spécialité License Ingénierie de la Maintenance des Moyens de Transport.
- [6] Norme NF EN 13306
- [7] Benahmed, B. A., & Guidoum, B. (2023). Etude quantitative et qualitative de la maintenance pour une ligne de production - au niveau de société de fonderie Tiaret (Mémoire de Master non publié). Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie
- [8] Université de Mila. (S.d.). Chapitre I – Généralités et types de maintenance. Récupéré de ning.univ-mila.dz
- [9] Dr/Aouad R, Chapitre 03/ les opérations et les niveaux des maintenances, 2eme Année Académique.
- [10] Bessayah, F. Z. R., & Slimani, M. F. Z. (2024). Application de l'intelligence artificielle dans la maintenance industrielle (Mémoire de Master non publié). Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Algérie
- [11] L. Fatima Zohra, Modélisation et gestion de la maintenance dans les systèmes de production, Thèse de Doctorat, Département d'Informatique, Faculté des Sciences d'Ingénieur, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, Novembre 2007.
- [12] Y. Madani & A. Hamed, Mise en place d'une maintenance prédictive pour un système industriel de production, Mémoire de fin d'études, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie, 2021.

Bibliographie

- [13] Z. Khaldi & O. Doubal, (2024). Amélioration de la maintenance basée sur fiabilité des équipements industriels (Mémoire de Master non publié). Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Algérie
- [14] B. Mohamed, Étude de la maintenance améliorative dans les systèmes industriels, Mémoire de Master en électromécanique, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2021.
- [15] k. Abdallah, Techniques de Maintenance Prédictive pour l'Amélioration de la disponibilité des Installations, Doctorat d'État, Département d'Électromécanique, Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [16] R. Mandanozi Nangaa & M. Etshoni Madhira, Conception et réalisation d'un système de surveillance et de maintenance prédictive des machines dans une zone industrielle, Mémoire de baccalauréat, Institut Supérieur de Techniques Appliquées, Goma, République Démocratique du Congo, 2024.
- [17] L. Kadi, (2019). Contribution à l'optimisation de stratégies de maintenance des équipements dans les systèmes électriques industriels et de transport. Thèse de Doctorat, Énergie et Génie Électrique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger
- [18] T. Salima. Maintenance Industrielle : Polycopié de Cours. Université Tahri Mohamed Béchar, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Algérie, 2023/2024.
- [19] Journal Éolien, "Le fonctionnement d'une éolienne", disponible sur : <https://www.journal-eolien.org>.
- [20] S. Sagger, Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, Mémoire de fin d'étude de Master, Filière Électrotechnique, Spécialité Énergies Renouvelables, Université de Ghardaïa, 2016/2017.
- [21] Document PDF, Chapitre I, Généralités sur les systèmes éoliens, <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11642/4/CHAPITREI.pdf>.
- [22] B. Ahmed abdessalem & L. Khalil, mémoire de MASTER : « Une étude de choix de densité de probabilité dans le calcul de la fréquence de la vitesse du vent ». Année 2020 / 2021.
- [23] Histoire de Energie éolienne, Université Batna 2, Module de Systèmes d'énergies autonomes, Niveau de Master 2/ Electronique des systèmes embarqués.

Références Bibliographiques

- [24] B. Nada Hibat Errahmen, Mémoire de fin d'étude : « Energie éolienne ». Faculté des Sciences de l'ingénierat, année 2020-2021.
- [25] C. Rogers, Machine Learning-Based Anomaly Detection for the Flinders University VAWT-X Vertical Axis Wind Turbine, Bachelor of Engineering (Software)(Honours) Thesis, Flinders University, College of Science and Engineering, Australia, Oct. 2025.
- [26] H. Peng, H. Zhang, Y. Fan, L. Shangguan and Y. Yang, "A Review of Research on Wind Turbine Bearings' Failure Analysis and Fault Diagnosis," *Lubricants*, vol. 11, no. 1, p. 14, 2023.
- [27] H. Gu, W. Y. Liu, Q. W. Gao and Y. Zhang, "A Review on Wind Turbines Gearbox Fault Diagnosis Methods," *Journal of Vibroengineering*, vol. 23, no. 3, pp. 749–767, 2021.
- [28] X. Liu et al., "Wind Turbine Generator Failure Analysis and Fault Diagnosis: A Review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 18, no. 5, pp. 1048–1065, 2024.
- [29] Y. Qiu, Y. Feng and D. Infield, "Fault Diagnosis of Wind Turbine with SCADA Alarms Based Multidimensional Information Processing Method," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1924–1934, 2020.
- [30] A. Zaher, S. D. J. McArthur, D. G. Infield and Y. Patel, "Online Wind Turbine Fault Detection Through Automated SCADA Data Analysis," *Wind Energy*, vol. 12, no. 6, pp. 574–593, 2009.
- [31] L. Cao, Z. Qian, H. Zareipour and Z. Huang, "Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on Deep Bi-Directional Long Short-Term Memory Under Time-Varying Non-Stationary Operating Conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 187860–187869, 2019.
- [32] S. Abdellatif & M. Python for Renewable Energy Applications, 1ère édition, Qatar Naval Academy, 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.33942.85973.
- [33] P. A. Hilton Ltd. (2021). Manuel d'utilisation et de maintenance : Banc d'étude d'une éolienne à axe horizontal RE570 (Document No. RE570/F/6/014). Hampshire, UK.
- [34] Kaggle.com