REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Faculté des nouvelles Technologies de Information et de la Communication
Département d'Electroniques et des Télécommunications

Mémoire de Master

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation et systèmes

Présenté par :

BEN GUEHZA Soufiane

TIDJANI Souhaib El Wathek Billah

Thème

Détection des défauts dans les éoliennes à angle des pales

Membres de jury :

Dr. Hakim BAGUA	**Président**	**UKM Ouargla**
Dr. Saci Abdelmoumin	**Superviseur**	**UKM Ouargla**
Dr. Fouzia Kara	**Examinateur**	**UKM Ouargla**

Année Académique:2025/2026

Résumé

تقدم هذه المذكرة منهجية لتشخيص أعطال توربينات الرياح بهدف تحسين موثوقية النظام وتوافره. تبدأ الدراسة بعرض توربينات الرياح ومكوناتها الرئيسية، بالإضافة إلى أنواع الأعطال المختلفة التي قد تؤثر على أجهزة الاستشعار والمشغلات والنظام نفسه.

استُخدم نموذج مرجعي لتوربين رياح باستخدام برنامج MATLAB/Simulink لمحاكاة تشغيل النظام في الظروف العادية وفي حالة حدوث عطل. سمحت القيم المتبقية للإشارات المقاسة بالكشف عن المشكلات المحتملة. ثم طُبقت منهجية المنطق الضبابي لضمان الكشف عن الأعطال وتحديد موقعها وتشخيصها.

تُظهر نتائج المحاكاة أن المنهجية المقترحة تكشف الأعطال بكفاءة ودقة وسرعة عاليتين. ولذلك، تُشكل هذه المنهجية حلاً مناسباً لتعزيز السلامة التشغيلية لتوربينات الرياح وتحسين أدائها في حالة حدوث عطل.

الكلمات المفتاحية : كشف الأعطال، المنطق الضبابي، طريقة سوجينو، التغبيش (Fuzzification)، إزالة التغبيش (Defuzzification)، البواقي الداخلية، البواقي الخارجية، توليد البواقي، تحديد موقع الأعطال، نظام توجيه الشفرات، توربين الرياح، المستشعرات، المشغلات الهيدروليكية، مراقبة الأنظمة.

This thesis presents a method for diagnosing wind turbine faults aimed at improving system reliability and availability. The study begins with a presentation of wind turbines and their main components, as well as the different types of faults that can affect sensors, actuators, and the system itself.

A reference model of a wind turbine using MATLAB/Simulink was used to simulate system operation under normal conditions and in the event of a fault. The residual values of the measured signals allowed for the detection of potential problems. A fuzzy logic approach was then applied to ensure the detection, localization, and diagnosis of faults.

The simulation results demonstrate that the proposed method detects faults with high efficiency, accuracy, and speed. This approach therefore constitutes a relevant solution for strengthening the operational safety of wind turbines and improving their performance in the event of a fault.

Keywords: Fault Detection, Fuzzy Logic, Sugeno Method, Fuzzification, Defuzzification, Internal Residuals, External Residuals, Residual Generation, Fault Localization, Blade Pitch System, Wind Turbine, Sensors, Hydraulic Actuators, System Monitoring.

Cette Mémoire présente une méthode de diagnostic des pannes des éoliennes visant à améliorer la fiabilité et la disponibilité du système. L'étude débute par une présentation des éoliennes et de leurs principaux composants, ainsi que des différents types de pannes susceptibles d'affecter les capteurs, les actionneurs et le système lui-même.

Un modèle de référence d'une éolienne sous MATLAB/Simulink a été utilisé pour simuler le fonctionnement du système en conditions normales et en cas de panne. Les valeurs résiduelles des signaux mesurés ont permis de détecter d'éventuels problèmes. Une approche par logique floue a ensuite été appliquée pour garantir la détection, la localisation et le diagnostic des pannes.

Les résultats de la simulation démontrent que la méthode proposée détecte les pannes avec une grande efficacité, précision et rapidité. Cette approche constitue donc une solution pertinente pour renforcer la sécurité de fonctionnement des éoliennes et améliorer leurs performances en cas de panne.

Mots-clés : Détection des défauts, Logique floue, Méthode de Sugeno, Fuzzification, Défuzzification, Résidus internes, Résidus externes, Génération des résidus, Localisation des défauts, Système d’orientation des pales, Éolienne, Capteurs, Actionneurs hydrauliques, Surveillance des systèmes.

RECONNAISSANCE

Tout d'abord, je tiens à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont encouragés et soutenus tout au long de ce long parcours.

Les mots nous manquent pour exprimer notre reconnaissance envers notre famille et nos amis qui nous ont apporté leur soutien et leur inspiration et nous ont aidés à mener à bien ce travail.

Je souhaite également exprimer notre sincère gratitude à mon directeur de thèse, le Dr Saji Abdul-Mumin, pour ses précieux conseils, sa patience et son soutien indéfectible durant la préparation de ce travail.

DEDICATION

Aux êtres les plus chers et les plus précieux de nos vies :

.nos mères et nos pères

.À notre professeur, Tijani Zakaria

À nos chers amis qui ont joué un rôle essentiel dans nos

.vies

À nos collègues avec qui nous avons partagé de nombreuses

.années de collaboration

À nos professeurs qui ont été pour nous une source

.d'inspiration et d'ambition

À tous les membres du département d'électronique et de

,communications

nous dédions ce travail.

Table of Contents

Chapitre I : Généralités sur les turbines éoliennes et le diagnostic 1

I.1.Introduction..... 3

I.2.Généralités sur l'énergie éolienne 3

I.2.1. Historique de l'énergie éolienne 4

I.2.2. Définition de l'énergie éolienne 5

I.2.3. Principe de conversion de l'énergie éolienne 5

..... 6

I.2.4. Développement de l'énergie éolienne 6

I.2.5. Avantages de l'énergie éolienne 7

I.2.6. Inconvénients de l'énergie éolienne 8

I.2.7. Énergie éolienne en Algérie 8

I.3. Description et Technologie des Turbines Éoliennes 10

I.3.1. Classification des types des systèmes éoliens 10

I.3.1.1. Selon la vitesse de rotation 10

I.3.1.2. Selon l'orientation de l'axe de rotation 12

I.3.1.3. Selon la taille 14

I.3.2. Principaux composants d'une turbine éolienne à axe horizontal 14

La composition de la turbine est illustrée par la figure I.12, où nous distinguons : 14

I.4. Généralités sur le diagnostic de défauts 16

I.4.1. Concepts de Base 16

I.4.2. Diagnostic d'un système..... 17

I.4.2.1. Définition du diagnostic..... 17

I.4.2.2. Procédure de diagnostic..... 18

I.4.2.3. Approches de diagnostic 18

I.4.2.4. Diagnostic à base de modèles..... 18

I.4.2.5. Diagnostic sans modèle à priori 18

Conclusion 19

Chapitre II : Modélisation et Simulation d'une Turbine Éolienne 3

II.1. Introduction..... 20

II.2. Étude et modélisation du système de la turbine éolienne 20

II.2.1. Présentation générale du modèle de la turbine éolienne 21

Système d'entrainement..... 22

Les défauts testés dans le modèle de turbine éolienne..... 22

II.2.2. Modélisation aérodynamique de la turbine éolienne..... 23

II.2.3. Système à angle de tangage (orientation des pales)..... 24

II.3. Simulation de la turbine éolienne (Système d'orientation des pales) avec et sans défauts 27

II.3.1 signaux de mesure dans le système d'orientation des pales avec et sans défauts 28

Conclusion 34

Chapitre III : Diagnostic des défauts du système d'orientation des pales 20

III.1. Introduction 34

III.2. Étude des défauts du système d'orientation des pales 34

III.3. Structure de détection de défauts proposée 36

III.3.1. Principe de la structure de détection de défauts proposée 40
III.3.1. 1.Explication de la structure 41
III.3.1. 2.Génération de résidus 47
III.3.1. 3. Détection Défauts du système d'orientation des pales 49
III.4. Résultats et discussion **56**
Conclusion **58**
Références ***63***

Table of figures

Figure I.1. Principe de conversion de l'énergie éolienne 4
Figure I.2. Conversion de l'énergie éolienne 6
Figure I.3. La Puissance des éoliennes en GW a évolué 7
Figure I.4. Carte du potentiel éolien en Algérie 9
Figure I.5. Première ferme éolienne en Algérie (Adrar) 9
Figure I.6. Turbine éolienne à vitesse fixe 10
Figure I.7. Turbine éolienne à vitesse variable pilotée au stator 11
Figure II.1. Le schéma d'un modèle d'une turbine éolienne 21
Figure II.2. Système hydraulique d'orientation de trois pales 25
Figure II.3. Schéma bloc du système utilisé pour l'orientation des pales 26
Figure II.4. Mesure $\beta 1.m1$ dans le $1er$ Actionneur du système d'orientation des pales. 28
Figure II.5. Mesure $\beta 1.m2$ dans le $1er$ actionneur du système d'orientation des pales. 29
Figure II.6. Mesure $\beta 2.m1$ dans le $2éme$ actionneur du système d'orientation des pales. 30
Figure II.7. Mesure $\beta 2.m2$ dans le $2éme$ actionneur du système d'orientation des pales. 31
Figure II.8. Zoom 1 et Zoom 2 dans les figures II.6 et II.7 respectivement. 31
Figure II.9. Mesure $\beta 3.m1$dans le $3éme$ actionneur du système d'orientation des pales. 32
Figure II.10 . Mesure $\beta 3.m1$dans le $3éme$ actionneur du système d'orientation des pales. 33
Figure III.1. Structure de base d'un régulateur flou. 36
Figure III.2. Représentation de la fonction triangulaire. 37
Figure III.3. Représentation de la fonction trapézoïdale. 38
Figure III.4. Représentation de la fonction gaussienne. 39
Figure III.5. Structure de logique floue. 41
Figure III.6. La fonction d'appartenance (GOOD) 42
Figure III.7. La fonction d'appartenance (NOT_GOOD) 42
Figure III.8. la Sortie constant (yes) 44
Figure III.9. la Sortie constant(NO) 45
Figure III.10. Les règles floues 46
Figure III.11. Schéma synoptique de générateur des résidus pour les pales 48
Figure III.12. Signaux de mesure β1.m1, β1.m2 du premier actionneur et β2.m1 du deuxième actionneur 50
Figure III.13. Signaux β2.m1, β2.m2 du 2ème actionneur et β3.m1 du 3ème actionneur 50
Figure III.14. Signaux de mesure β3.m1, β3.m2 du 3ème actionneur et β1.m1 du premier actionneur. 51
Figure III.15. Résidus internes {a, b, et c} pour le système d'orientation des pales 51
Figure III.16. Détection de défauts aux capteurs β1.m1, et β1.m2. 52
Figure III.17. Résidus externes {d, e, et f} pour le système d'orientation des pales 52
Figure III.18. Détection de défauts aux capteurs β2.m1, et β2.m2. 53
Figure III.19. Détection de défauts capteur aux β3.m1, et β3.m2. 53
Figure III.20. Détection de défauts actionneur dans le système d'orientation des pales 54
Figure III.21. Zooms (1,2) 54
Figure III.22. Zooms (3,4) 55
Figure III.23. Zooms (5,6) 55

Table of Table

Table II-1. Paramètres de la turbine éolienne 22
Table II-2. Paramètres du troisième scénario des défauts 22
Table III-1. Défauts du système d'orientation des pales 49

Introduction Générale

Introduction Générale

Face à la croissance continue de la demande mondiale en énergie et à la nécessité de réduire l'impact environnemental des sources conventionnelles, les énergies renouvelables occupent aujourd'hui une place essentielle dans la production d'électricité. Parmi elles, l'énergie éolienne constitue une solution efficace et durable grâce à sa capacité à produire une énergie propre et abondante.

Les turbines éoliennes sont des systèmes électromécaniques complexes soumis à des conditions de fonctionnement variables et à de nombreuses contraintes mécaniques et électriques. Afin d'assurer une production optimale et sécurisée, plusieurs systèmes de commande sont intégrés dans ces installations. Parmi les sous-systèmes les plus importants figure le système d'orientation des pales (Pitch System), dont le rôle est de régler l'angle des pales en fonction de la vitesse du vent afin d'optimiser la puissance produite et de protéger la turbine contre les surcharges.

Cependant, ce système peut être affecté par différents défauts touchant les capteurs, les actionneurs ou les éléments de commande, ce qui peut dégrader les performances de l'éolienne et entraîner des arrêts non planifiés. Pour cette raison, la surveillance et la détection précoce des défauts constituent des aspects essentiels pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des turbines éoliennes.

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à l'étude et à la détection des défauts dans le système d'orientation des pales à l'aide de techniques de diagnostic adaptées, permettant d'identifier rapidement les anomalies et d'assurer le bon fonctionnement de l'installation.

Pour cela, ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre présente des généralités sur les turbines éoliennes, leurs principaux composants, les différents types d'éoliennes et de génératrices utilisés, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients en tant que sources d'énergie renouvelable. Les notions fondamentales liées au sujet y sont également introduites.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation d'un modèle de simulation de référence d'une turbine éolienne. Ce modèle permet de représenter

Le Comportement du système dans les conditions normales de fonctionnement ainsi qu'en présence de défauts.

Le troisième chapitre traite de la détection des défauts dans le système d'orientation des pales. La structure proposée de diagnostic est présentée en détaillant les principales étapes de calcul et de traitement des signaux. Cette approche permet de distinguer les conditions de fonctionnement normales des situations dégradées associées aux défauts étudiés les résultats obtenus serviront à analyser les performances du système et à évaluer l'efficacité des méthodes de détection appliquées.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et présente quelques perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre I : Généralités sur les turbines éoliennes et le diagnostic

I.1.Introduction

Au cours des dernières décennies, l'énergie éolienne s'est progressivement imposée comme une alternative pertinente pour satisfaire la demande énergétique mondiale croissante, tout en limitant les effets négatifs sur l'environnement. Néanmoins, malgré les progrès technologiques réalisés, les éoliennes modernes demeurent des systèmes complexes et sensibles aux défaillances. Ces anomalies peuvent dégrader leurs performances, entraîner des arrêts non planifiés et générer des pertes économiques significatives.

Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de comprendre le principe de fonctionnement des systèmes éoliens ainsi que leurs principaux éléments constitutifs. Les éoliennes, notamment celles à axe horizontal, assurent la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique grâce à un ensemble de sous-systèmes mécaniques et électriques, associés à des lois de commande avancées, telles que le contrôle de l'angle de calage des pales (pitch control) [1]. Cependant, la présence conjointe de capteurs, d'actionneurs et de structures mécaniques rend ces systèmes particulièrement exposés à différents types de défauts.

Dans ce contexte, l'intégration de méthodes de diagnostic et de détection des défauts apparaît comme une approche essentielle pour assurer la surveillance de l'état du système, améliorer sa fiabilité et garantir la continuité de son fonctionnement [2].

I.2.Généralités sur l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui repose sur l'exploitation de l'énergie cinétique du vent. Cette énergie est convertie en énergie mécanique par les pales de l'éolienne, puis en énergie électrique grâce à un générateur (voir figure I.1).

Elle est considérée comme une énergie propre et durable, car elle ne produit ni émissions polluantes ni déchets dangereux durant son fonctionnement. De plus, elle constitue une alternative intéressante aux énergies fossiles et contribue à la

Réduction des émissions de gaz à effet de serre, dans le contexte actuel de transition énergétique. [3]

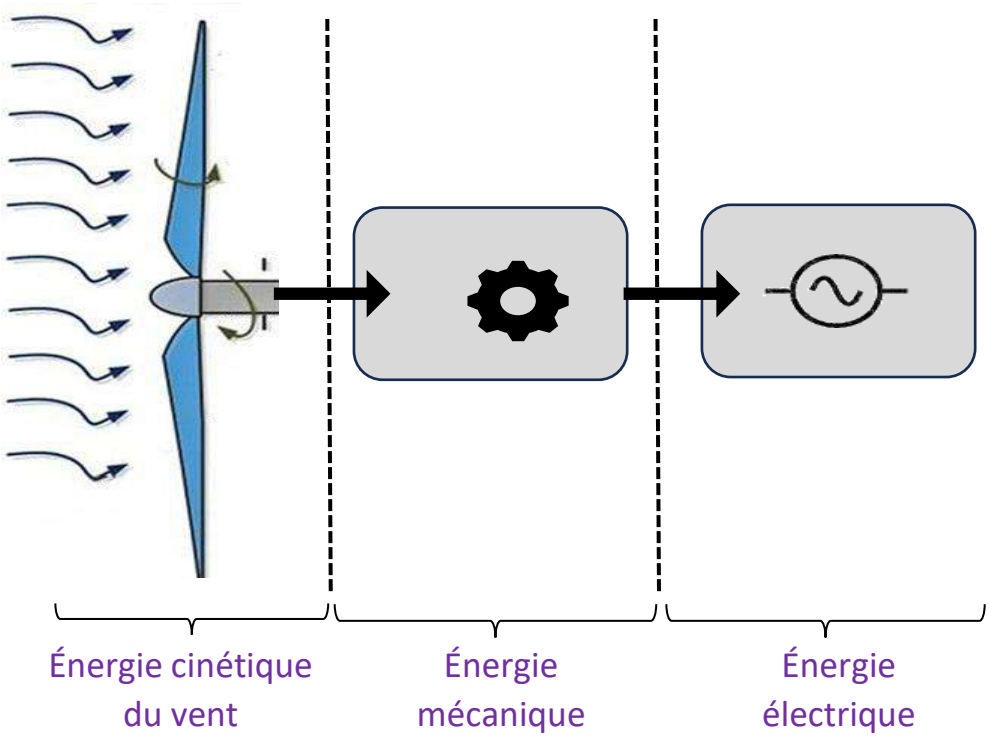


Figure I.1. *Principe de conversion de l'énergie éolienne*

I.2.1. Historique de l'énergie éolienne

L'utilisation de l'énergie du vent remonte à plusieurs siècles, notamment pour le pompage de l'eau et le broyage des céréales. La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne a réellement commencé à la fin du XIX^{e} siècle, avec les premières éoliennes expérimentales développées en Europe et aux États-Unis. Au fil du temps, les avancées scientifiques en aérodynamique et en technologies de conversion ont permis d'améliorer considérablement les performances des turbines. [4]

Le développement de l'énergie éolienne a connu un regain d'intérêt à partir des années 1970, notamment suite aux crises énergétiques, ce qui a conduit à l'émergence de grandes éoliennes industrielles et à l'amélioration des systèmes de contrôle, tels que la régulation de l'angle de calage des pales. Aujourd'hui,

L'énergie éolienne représente une composante majeure des énergies renouvelables, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition énergétique mondiale. [5]

I.2.2. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie obtenue à partir du mouvement des masses d'air. Elle repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique à l'aide d'éoliennes.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non dégradée et géographiquement diffuse. Elle présente également une corrélation saisonnière, car la demande en électricité est souvent plus élevée en hiver, période durant laquelle la vitesse moyenne du vent est généralement plus importante. De plus, cette énergie ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

L'énergie éolienne constitue ainsi une alternative aux sources d'énergie conventionnelles et peut être exploitée aussi bien sur terre (parcs éoliens onshore) qu'en mer (offshore), où les conditions de vent sont souvent plus favorables. [4] [3].

I.2.3. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Le vent de la zone d'exploitation entraîne la rotation du rotor de l'éolienne. Cette énergie mécanique est transmise à travers un arbre de transmission, puis sa vitesse est généralement augmentée par un multiplicateur de vitesse afin d'adapter la rotation aux exigences de la génératrice électrique. [6]

La génératrice convertit alors l'énergie mécanique en énergie électrique. Ensuite, des convertisseurs électroniques de puissance assurent l'adaptation de la fréquence du courant produit à celle du réseau électrique.

Enfin, un transformateur élève la tension de l'électricité produite afin de permettre son transport et son raccordement au réseau électrique public. La figure I.2 illustre les différentes étapes de conversion de l'énergie éolienne [5] [4].

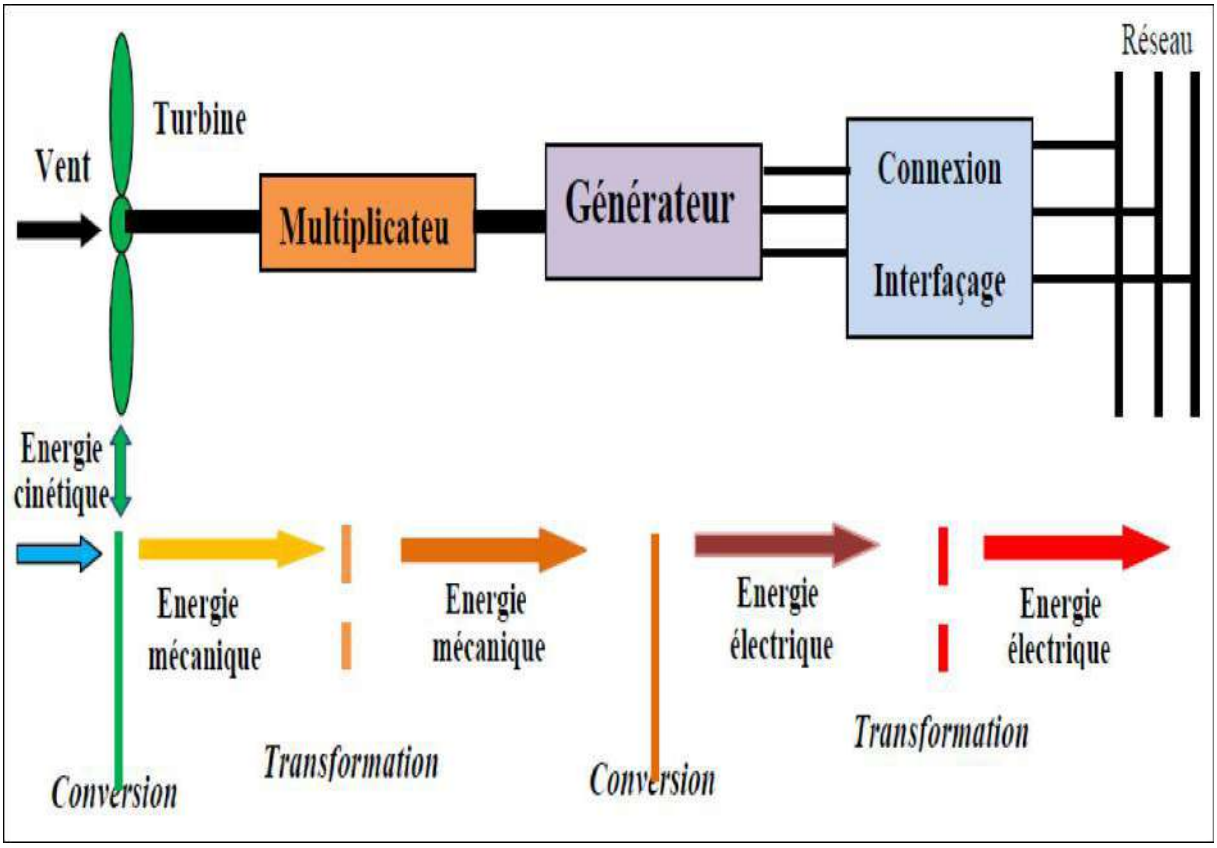


Figure I.2. *Conversion de l'énergie éolienne*

I.2.4. Développement de l'énergie éolienne

L'évolution des parcs éoliens terrestres entre 2012 et 2017. Fin 2016, la capacité mondiale des parcs éoliens terrestres atteignait 494 GW (voir figure I.3). Cette statistique met en évidence une tendance à la hausse de la capacité cumulée mondiale d'énergie éolienne terrestre, notamment au cours des quatre dernières années, où la capacité des éoliennes a augmenté de 50 GW par an [7]

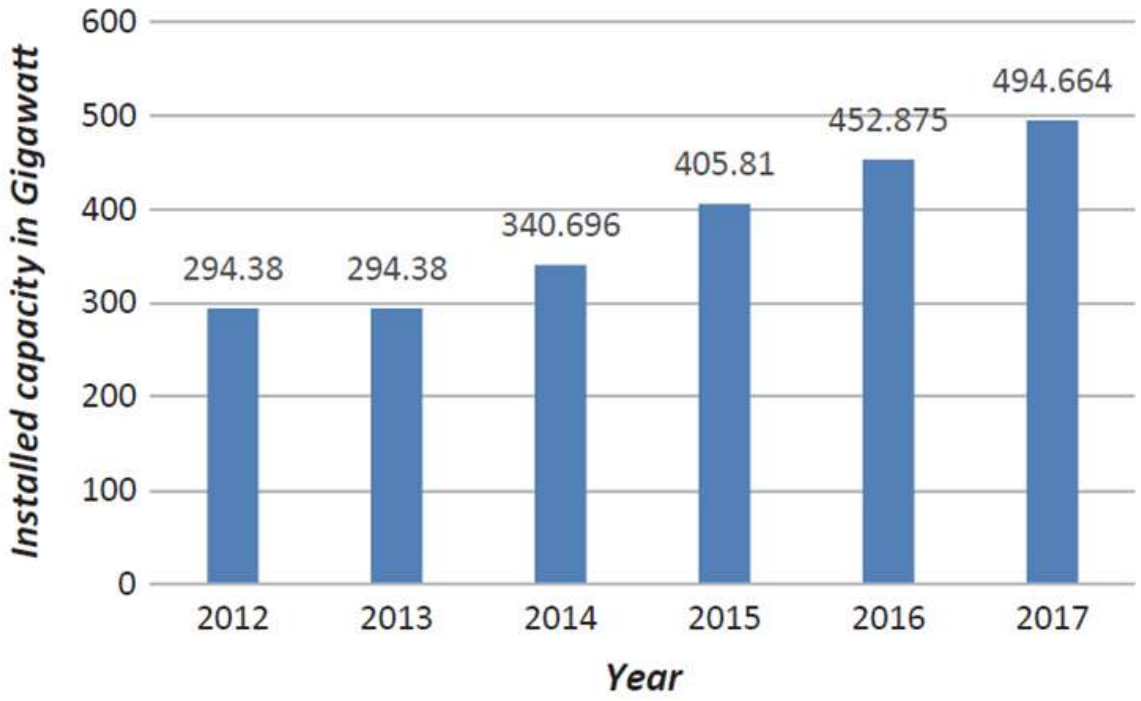


Figure I.3. *La Puissance des éoliennes en GW a évolué*

I.2.5. Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et inépuisable, reposant sur une ressource naturelle disponible dans de nombreuses régions du monde.
- Il s'agit d'une énergie propre qui ne produit ni émissions polluantes ni déchets dangereux, contribuant ainsi à la protection de l'environnement.
- Les parcs éoliens ont un faible impact sur les sols et n'altèrent pas les ressources en eau, notamment les nappes phréatiques [8].
- Les coûts d'exploitation et de maintenance des éoliennes restent relativement faibles par rapport à d'autres moyens de production d'énergie.
- Les installations éoliennes peuvent être facilement implantées et démantelées, limitant ainsi leur impact à long terme sur l'environnement.
- Le développement de l'énergie éolienne favorise la création d'emplois et reste compatible avec d'autres activités économiques telles que l'agriculture et l'élevage [9].

I.2.6. Inconvénients de l'énergie éolienne

- L'un des principaux inconvénients de l'énergie éolienne est son caractère intermittent, car la production d'électricité dépend de la disponibilité du vent et nécessite souvent un complément par d'autres sources d'énergie.
- L'imprévisibilité du vent rend la planification de la production énergétique plus complexe, malgré les progrès réalisés grâce aux modèles météorologiques.
- L'énergie éolienne ne peut pas être stockée directement à grande échelle et doit être consommée au moment de sa production, ce qui limite sa capacité à répondre seule à la demande énergétique.
- Le fonctionnement des éoliennes dépend de conditions de vent spécifiques: une vitesse de vent trop faible réduit la production, tandis qu'un vent trop fort peut nécessiter l'arrêt des machines pour éviter des dommages mécaniques.
- Les parcs éoliens sont souvent situés loin des zones de consommation, ce qui nécessite des infrastructures de transport d'énergie et peut entraîner des pertes lors de l'acheminement.
- L'installation de parcs éoliens peut avoir un impact visuel sur le paysage et générer des nuisances sonores, bien que ces effets aient été considérablement réduits grâce aux avancées technologiques [8] [9].

I.2.7. Énergie éolienne en Algérie

En Algérie, le domaine des énergies renouvelables est en cours de développement en particulier l'énergie éolienne. Une étude initiale de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a été établie afin d'obtenir une première identification des régions ventées de l'Algérie (voir la figure 5) [10]. Alors, la représentation des vitesses obtenues sous forme de cartes, a deux objectifs :

- Le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne.
- Le second est de mettre en évidence la variation relative de cette ressource à travers le pays.

La carte représentée sur la Figure I.4 montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar [11].

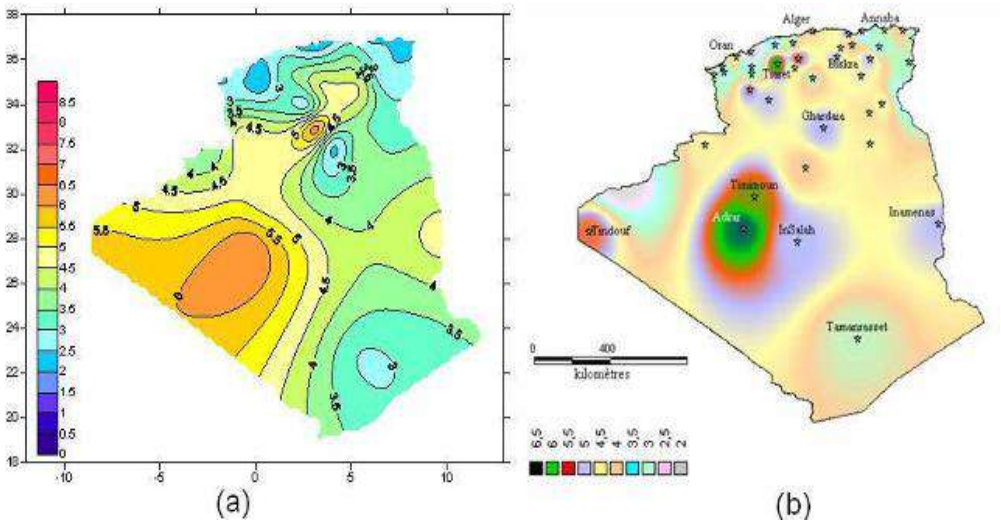


Figure I.4. *Carte du potentiel éolien en Algérie*

Dans la figure. I.5 on montre la première ferme éolienne en Algérie (située à la Wilaya d'Adrar).



Figure I.5. *Première ferme éolienne en Algérie (Adrar)*

I.3. Description et Technologie des Turbines Éoliennes

Ce paragraphe décrit l'architecture globale des aérogénérateurs et les différentes technologies utilisées pour capter l'énergie du vent.

I.3.1. Classification des types des systèmes éoliens

Plusieurs classifications des turbines éoliennes peuvent être considérées

I.3.1.1. Selon la vitesse de rotation

I.3.1.1.1. Turbines éoliennes à vitesse constante (fixe) :

Elles sont les premières éoliennes commercialisées qui ont été développées à base de l'utilisation des machines asynchrones à cage comme le montre la Figure I.6. Qui sont les plus utilisées pour la génération des puissances élevées grâce à leur facilité de conception. Le couplage de ce type de machines asynchrones avec les éoliennes est directement branché sur le réseau électrique. Par conséquent, le fonctionnement réel est à une vitesse de rotation du rotor fixe aux environs de

La vitesse de synchronisation, qui est imposée par la pulsation des courants écoulés entre le stator et le réseau [12] [13] [14]

.

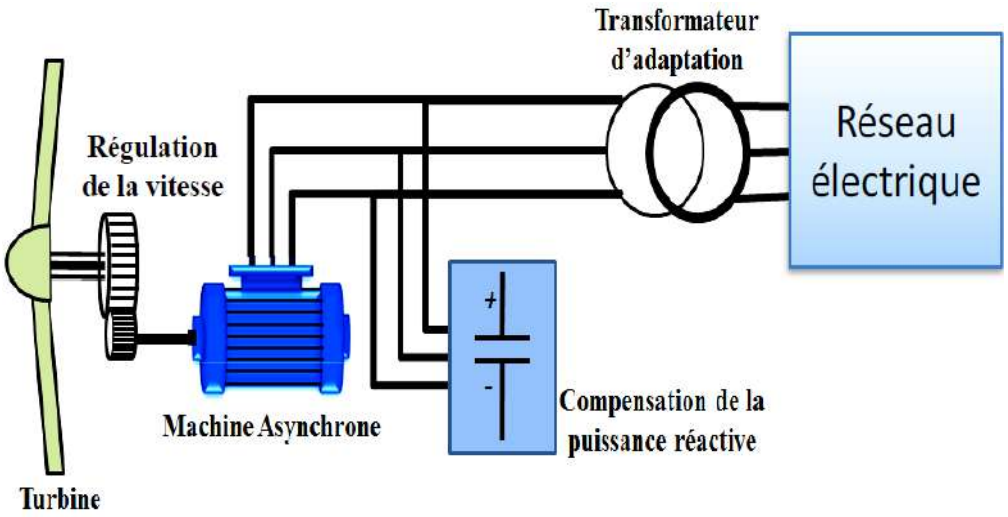


Figure I.6. *Turbine éolienne à vitesse fixe*

I.3.1.1.2. Turbines éoliennes à vitesse variable

Les turbines éoliennes à vitesse variable se sont récemment développées grâce à l'intégration de l'électronique de puissance qui a permis de fonctionner en grande marge de vitesse afin d'améliorer la qualité de l'énergie produite et récupérer plus d'énergie. Aussi, de réduire le bruit et abaisser les coûts du système mécanique [15] [16]. L'utilisation de différents types de génératrices avec des structures d'électronique de puissance

Caractérisent les éoliennes à vitesse variable utilisées à nos jours [17]. Les deux principales structures des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur les figures I.7 et I.8.

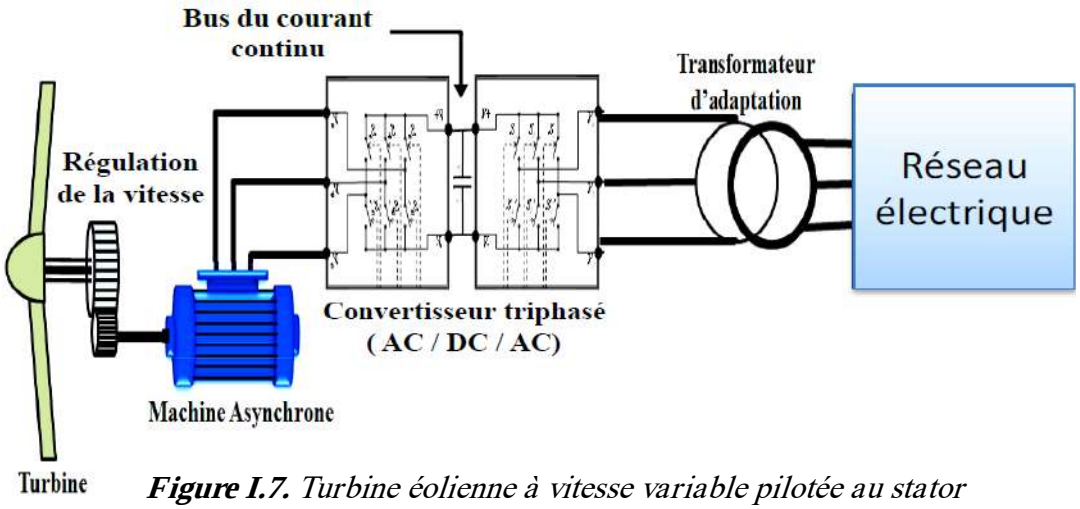


Figure I.7. *Turbine éolienne à vitesse variable pilotée au stator*

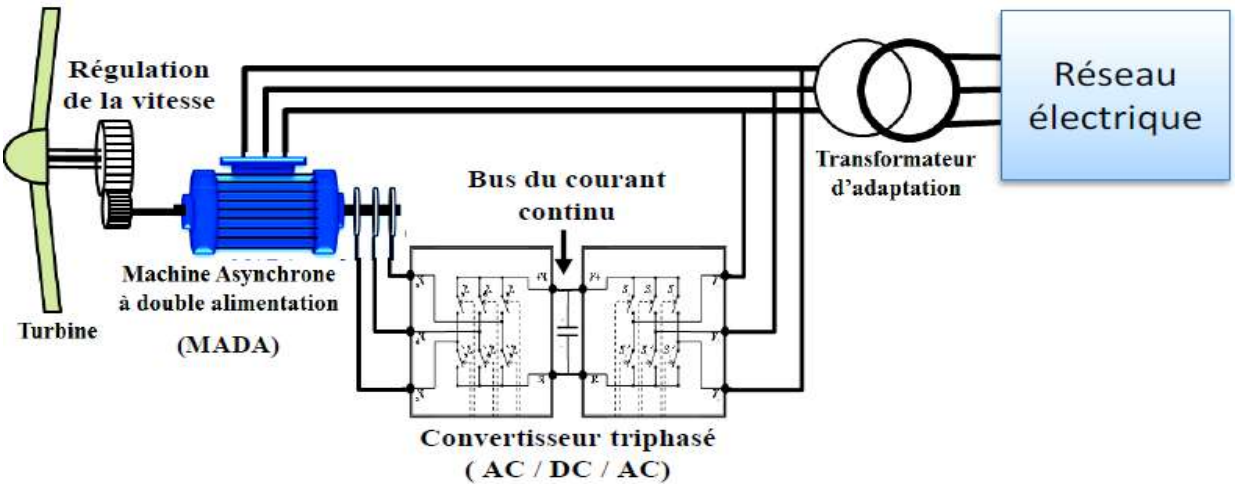


Figure I.8. *Turbine éolienne à vitesse variable pilotée au rotor*

- La première associe une génératrice asynchrone à cage avec un convertisseur (AC/DC/AC) bidirectionnel.
- La deuxième associe une génératrice asynchrone (Rotor Bobiné) à double alimentation (MADA). Qui est alimentée directement au stator et à travers un Convertisseur (AC/DC/AC) bidirectionnel.

I.3.1.2. Selon l'orientation de l'axe de rotation

Le domaine de production d'énergie éolienne basé sur deux principaux types d'éoliennes nommés selon la position de leur rotor (axe de rotation) : la turbine éolienne à axe vertical et celle à axe horizontal [18] [19].

I.3.1.2.1. Turbine éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont le premier type ou modèle de turbines utilisées pour Exploiter l'énergie cinétique du vent afin de produire l'énergie électrique où ces pales tournent autour de son rotor vertical [20] [21] [22] comme présenté dans la Figure I.9.

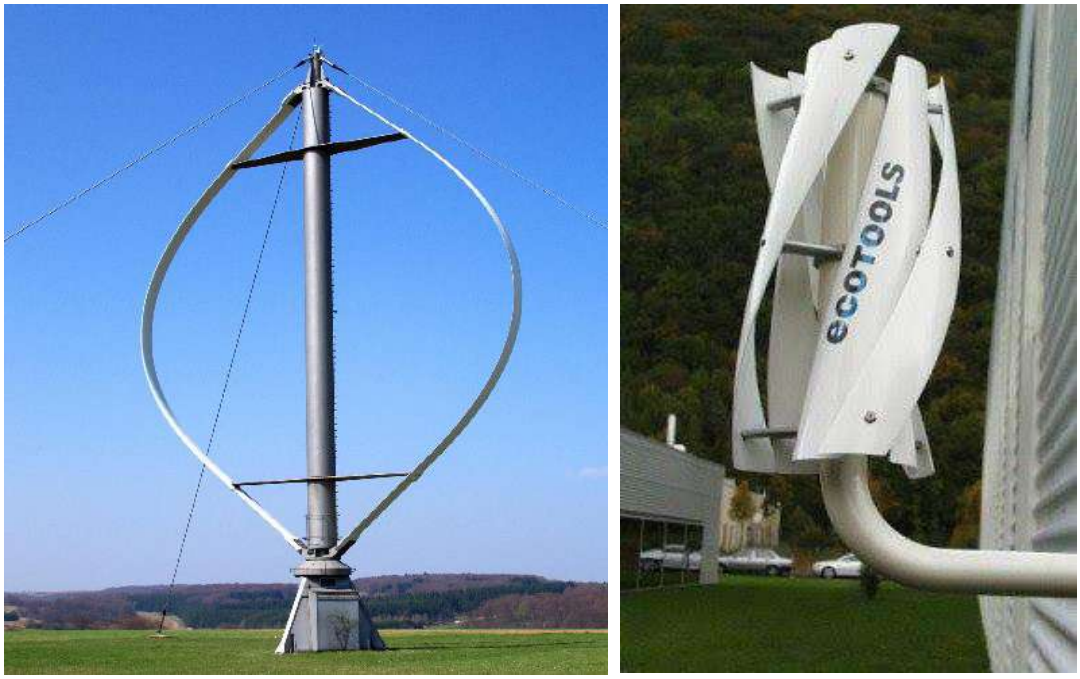


Figure I.9. *Turbines Eoliennes à axe vertical*

I.3.1.2 Turbine éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont constituées d'un rotor installé au sommet d'un mât, orienté de manière à faire face au vent dominant. Les pales de ce type de turbine permettent d'entraîner l'arbre relié à la génératrice afin de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique [10]. On distingue plusieurs configurations d'éoliennes à axe horizontal, notamment les modèles à une pale, à deux pales et à trois pales [22]. Les turbines mono-pale et bipale

Présentent l'avantage d'un coût de fabrication plus faible, mais elles sont généralement plus bruyantes et offrent un rendement énergétique moins élevé. De plus, certaines de ces configurations peuvent poser des problèmes de stabilité dynamique lors du fonctionnement.

En revanche, l'éolienne tripale est la configuration la plus répandue dans les applications industrielles, car elle constitue un compromis optimal entre performance énergétique, stabilité mécanique et coût global [23]. La figure I.10 présente des exemples d'éoliennes à axe horizontal.



Figure I.10. *Turbine éolienne à axe horizontal*

I.3.1.3. Selon la taille

Les chercheurs ont montré que, pour exploiter au mieux l'énergie du vent, il est nécessaire que l'hélice balaie une zone où la vitesse du vent est maximale, c'est-à-dire à une hauteur élevée par rapport au sol. Cela conduit à la conception d'éoliennes avec des mâts plus élevés et des rotors de grand diamètre [24]. La figure I.11 illustre l'évolution de la taille des turbines éoliennes au cours du temps.

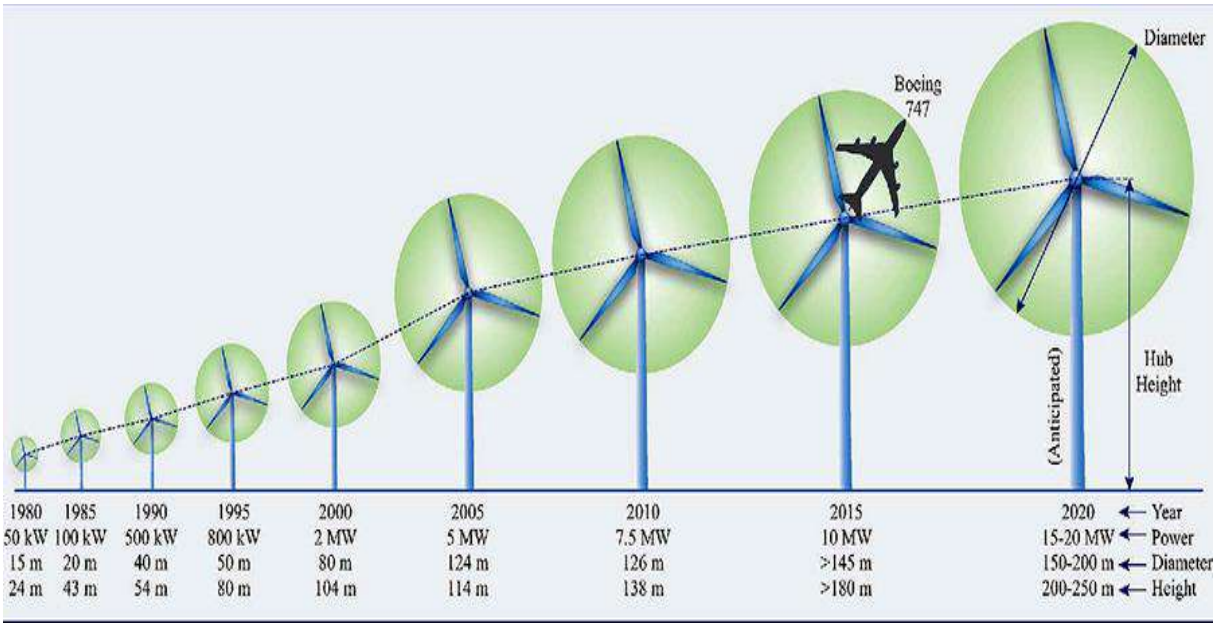


Figure I.11. *Evolution de la taille des éoliennes*

I.3.2. Principaux composants d'une turbine éolienne à axe horizontal

La composition de la turbine est illustrée par la figure I.12, où nous distinguons :

- **Rotor :** Ensemble composé des pales et du moyeu, chargé de capter l'énergie cinétique du vent et de la convertir en énergie mécanique de rotation. Les pales sont conçues selon des profils aérodynamiques afin d'optimiser la portance et le rendement [25].
- **Arbre principal :** Élément mécanique reliant le rotor au multiplicateur, assurant la transmission de la rotation à basse vitesse tout en supportant un couple élevé et des charges variables dues aux conditions de vent [26].

- **Réducteur :** Système mécanique permettant d'augmenter la vitesse de rotation et de réduire le couple afin d'adapter le fonctionnement aux exigences du générateur électrique, souvent composé de plusieurs étages d'engrenages [26] [27].
- **Freins mécaniques :** Dispositifs de sécurité installés dans la nacelle, utilisés pour arrêter la turbine en cas d'urgence, de survitesse ou de conditions climatiques extrêmes afin de protéger l'ensemble du système.
- **Nacelle :** Structure placée au sommet du mât, contenant les principaux équipements mécaniques et électriques tels que le multiplicateur, le générateur et les systèmes de contrôle, tout en assurant leur protection contre les conditions environnementales [28].
- **Commandes de pas et de lacet :** Systèmes de contrôle permettant l'orientation de la turbine face au vent (lacet) et l'ajustement de l'angle des pales (pitch) afin de réguler la puissance extraite et d'optimiser la production énergétique.
- **Équipement de mesure du vent :** Ensemble de capteurs, tels que l'anémomètre et la girouette, permettant de mesurer en continu la vitesse et la direction du vent afin d'assurer un contrôle précis et adaptatif de la turbine.

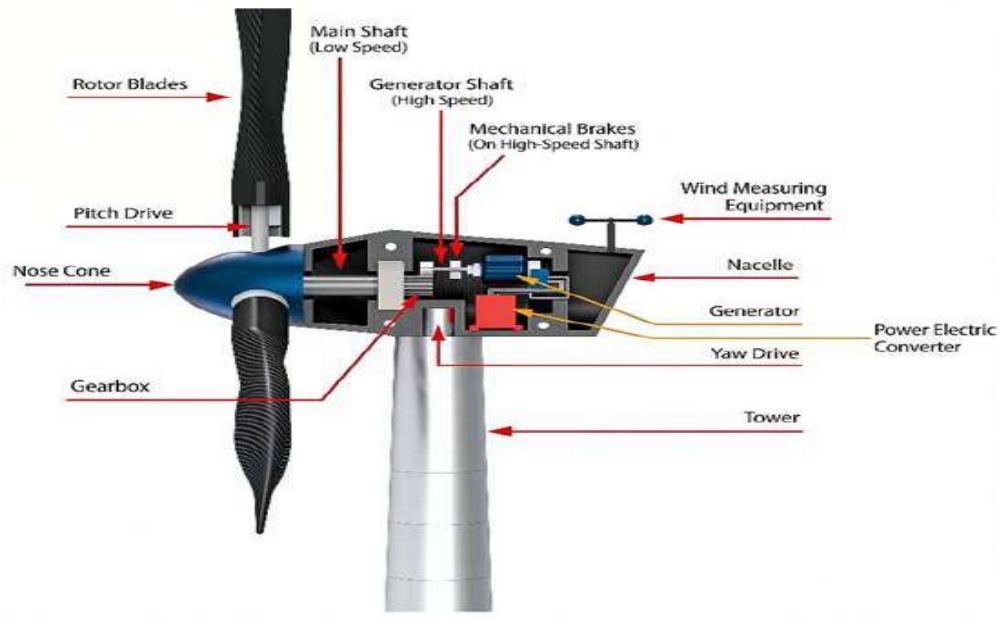


Figure I.12. Les éléments d'une éolienne

I.4. Généralités sur le diagnostic de défauts

I.4.1. Concepts de Base

Dans le contexte de la surveillance et du diagnostic des systèmes de l'énergie éolienne, plusieurs notions fondamentales doivent être clairement distinguées : anomalie, défaut, défaillance et panne [18] [29].

1). Anomalie

Une particularité non conforme au comportement normal. Elle constitue généralement une observation initiale sans identification précise de la cause [30].

2). Défaut

Un défaut est une anomalie de comportement d'un système, caractérisée par un écart entre une grandeur observée et une valeur de référence. Un défaut n'entraîne pas nécessairement une perte de fonction : le système peut continuer à fonctionner correctement si ce défaut n'affecte pas sa mission principale [29]. Les défauts sont classés en fonction de leur localisation en trois types : défaut actionneur, défaut capteur et défaut système :

•Défauts Actionneurs

Défauts affectant les éléments d'exécution, entraînant une dégradation ou une perte partielle ou totale de leurs fonctions, ce qui altère le signal d'entrée du système [31].

•Défauts Procédé

Défauts provenant du système lui-même, dus à une modification ou une détérioration de ses composants, entraînant un changement de ses caractéristiques et une réduction de ses performances [31].

•Défauts Capteurs

Défauts affectant la représentation de l'état physique du système, pouvant être partiels (mesure imprécise) ou totaux (mesure sans relation avec la grandeur réelle) [32].

3). Défaillance

Une défaillance correspond à la perte partielle ou totale de l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise. Elle représente une transition d'un état de fonctionnement normal vers un état dégradé [33].

4). Panne

Une panne est l'état résultant d'une défaillance, dans lequel le système devient incapable d'assurer la fonction demandée. Contrairement à la défaillance (qui est un événement ou une transition), la panne est un état stable du système [31].

5). Résidu

Un indicateur de défaut basé sur la différence entre les mesures et les calculs basés sur un modèle [21].

6). Détection

La détermination de la présence de défauts et de l'instant de leurs occurrences.

7). Identification

La détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut.

8). Diagnostic

La détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.

I.4.2. Diagnostic d'un système

I.4.2.1. Définition du diagnostic

Le diagnostic d'un système consiste à identifier son mode de fonctionnement à partir de ses manifestations extérieures [34] [35]. Il permet de déterminer les causes probables des défaillances ou des dégradations en s'appuyant sur un raisonnement logique et un ensemble d'informations. Il contribue également à valider ou ajuster les hypothèses sur l'origine des défauts afin de définir les actions appropriées.

I.4.2.2. Procédure de diagnostic

La procédure de diagnostic repose principalement sur la détection, la localisation et parfois l'identification des défauts. Lorsqu'un défaut apparaît, le système détecte l'anomalie puis analyse ses causes pour l'isoler. Les étapes principales sont les suivantes [34]:

- Extraction des informations nécessaires
- Élaboration des signatures des défauts
- Application de la méthode de diagnostic
- Détection des dysfonctionnements
- Interprétation des données
- Prise de décision selon l'importance des défauts

I.4.2.3. Approches de diagnostic

Il existe deux grandes familles :

- Méthodes avec modèle : basées sur un modèle mathématique du système.
- Méthodes sans modèle : basées sur l'exploitation des données sans connaissance préalable du modèle

Chaque famille peut être abordée selon :

- Une approche qualitative
- Ou quantitative

I.4.2.4. Diagnostic à base de modèles

Fondé sur les relations entre les variables du système [36].

- Approche qualitative : basée sur des relations causales et des techniques d'intelligence artificielle [37].
- Approche quantitative : basée sur des modèles mathématiques issus des lois physiques ou des relations entrée-sortie [37].

I.4.2.5. Diagnostic sans modèle à priori

Basé sur l'analyse des données pour distinguer le fonctionnement normal et défaillant [38].

- Approche qualitative : basée sur l'analyse des données et l'identification des tendances.

- Approche quantitative : basée sur l'expérience et l'analyse fonctionnelle pour identifier les causes des défaillances sans modèle mathématique.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une vue générale sur les éoliennes, en abordant leur évolution historique, leurs différentes configurations ainsi que leurs principes de fonctionnement. Une attention particulière a été portée aux deux principales catégories d'éoliennes, à savoir les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical, tout en mettant en évidence leurs caractéristiques, avantages et domaines d'application.

L'étude comparative réalisée montre que chaque type d'éolienne possède des propriétés spécifiques adaptées à certaines conditions d'exploitation. Cependant, dans le cadre de ce travail, le choix s'est porté sur les éoliennes à axe horizontal en raison de leur large utilisation dans les systèmes modernes de production d'énergie éolienne, de leur rendement élevé et de leur capacité à fonctionner efficacement dans différentes conditions de vent.

Cette étude introductive constitue une base importante pour la compréhension du système étudié dans les chapitres suivants, notamment le système d'orientation des pales et son comportement en présence de défauts.

Chapitre II : Modélisation et Simulation d'une Turbine Éolienne

II.1. Introduction

Le domaine de l'énergie renouvelable a connu un développement rapide grâce à l'intégration de machines de haute technologie associées à des convertisseurs de puissance performants. Dans ce cadre, plusieurs systèmes de turbines éoliennes ont été développés et largement déployés pour la production d'électricité à travers le monde.

Les turbines à axe horizontal restent les plus utilisées. Toutefois, lors d'une exploitation à long terme, les turbines éoliennes sont fortement exposées à des conditions environnementales sévères, ce qui peut affecter leurs composants essentiels, notamment les capteurs et les actionneurs. Ces systèmes fonctionnent souvent dans des conditions extrêmes, augmentant ainsi le risque de défaillances et de dégradation des performances [39] [40]. Dans des conditions normales de fonctionnement, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des stratégies de commande efficaces, accompagnées de systèmes fiables de diagnostic et de détection des défauts, afin d'assurer le bon fonctionnement et la continuité de service du système de conversion [41] [42].

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle de simulation d'une turbine éolienne sous forme de benchmark. Ce modèle permet de représenter le comportement du système en conditions normales (sans défauts) ainsi qu'en présence de défauts, à travers différents scénarios. Les résultats de simulation permettront d'analyser les performances du système et d'évaluer l'efficacité des méthodes de détection mises en œuvre.

II.2. Étude et modélisation du système de la turbine éolienne

Dans cette section, on va présenter les différentes composantes de la turbine éolienne utilisée et simulée. Le comportement représentatif du système étudié est défini par des modèles mathématiques développés dont le but est de permettre d'appliquer les commandes tolérantes aux défauts et les approches de diagnostic à des turbines éoliennes.

II.2.1. Présentation générale du modèle de la turbine éolienne

Le modèle de référence simule une éolienne à axe horizontal de 4,8 MW à trois pales. Il repose sur quatre systèmes : l'aérodynamique (incluant un système de contrôle de l'angle d'inclinaison des pales), le système de propulsion, le système de conversion de puissance électrique et le système de contrôle général [38] [43] [44].

Nous nous concentrerons ici sur le système de contrôle de l'angle d'inclinaison des pales. **La figure II.1** illustre le modèle de cette éolienne et ses composants.

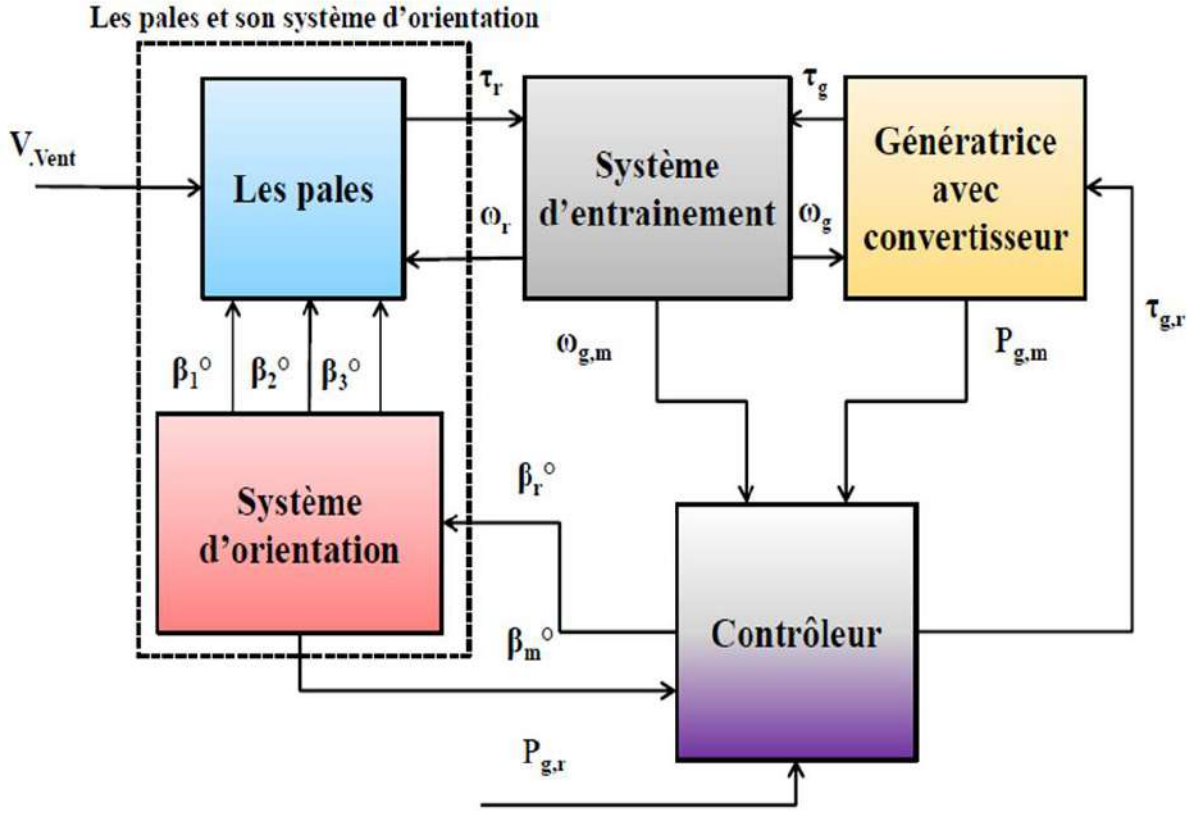


Figure II.1. *Le schéma d'un modèle d'une turbine éolienne*

Le schéma fonctionnel du modèle décrit de manière globale l'interaction entre les différents sous-systèmes constituant l'éolienne [45] [38]. Il met en évidence le rôle central du signal de référence de l'angle des pales (β_r), qui permet de réguler la puissance captée à partir du vent à travers le système d'orientation des pales (pitch system). Ce dernier s'appuie sur des mesures redondantes de l'angle des pales, obtenues à l'aide de six capteurs ($\beta_{1.m1}, \beta_{1.m2}, \beta_{2.m1}, \beta_{2.m2}, \beta_{3.m1}, \beta_{3.m2}$), afin d'améliorer la fiabilité et la robustesse du système. Le tableau II.I donne les valeurs numériques des paramètres du modèle choisi. Tandis que le tableau II-2 nous trouvons les valeurs des paramètres de défauts testé.

Table II-1. *Paramètres de la turbine éolienne [46]*

Système d'orientation des pales		**Générateur-Convertisseur**	
$\boldsymbol{\xi}$	ω_n	α_{gc}	η_{gc}
0.6	$11.11 rad/s$	$50 rad/s$	0.98
Aérateur (rotor)			
$\boldsymbol{R}$	P		k_{opt}
57.5	1.225		1.2171
Système d'entrainement			
$\boldsymbol{B_{dt}}$	B_r	B_g	K_{dt}
775.49 $\boldsymbol{Nms/rad}$	7.11 Nms/rad	45.6 Nms/rad	$2{,}7.10^9$ Nms/rad
$\boldsymbol{J_g}$	J_r	N_g	η_{dt}
390 kg.m²	55.10^6 kg.m²	95	0.97

Table II-2. *Paramètres du troisième scénario des défauts*

Les défauts testés dans le modèle de turbine éolienne					
β_{1-m1}	4°	β_{2-m2}	Facteur=1.8	β_{3-m1}	12°
ξ_2	0.45	ω_{n2}	$5.73 rad/s$	ξ_3	0.9
ω_{n3}	$3.42 rad/s$	$\tau_{g.c}$	700 Nm	η_{dt2}	0.3

II.2.2. Modélisation aérodynamique de la turbine éolienne

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

Les principes aérodynamiques de base exploités par les turbines éoliennes sont décrits et un modèle décrivant le transfert de l'énergie éolienne au mouvement de rotation du rotor est présenté [38]. La puissance disponible du vent traversant toute la zone balayée par le rotor peut être exprimée par

$$P_w(t) = \frac{1}{2}\,\rho\pi R^2 V_w^3(t) \qquad \textbf{(II.1)}$$

P_w : La puissance disponible du vent.

ρ : la densité de l'air, qui est supposée constante.

πR^2 : la surface du cercle balaie par le rotor.

R : La longueur des pales

V_w : la vitesse du vent

A partir de la puissance disponible dans le vent, la puissance du rotor est donnée en fonction du coefficient de puissance, qui dépend de $\lambda(t)$ qui est un rapport entre la vitesse du rotor et la vitesse du vent et de l'angle de tangage $\beta(t)$. La puissance captée par le rotor est exprimée par l'équation :

$$P_a(t) = P_w(t).\,C_p\big(\lambda(t), \beta(t)\big) \qquad \textbf{(II.2)}$$

P_w : La puissance captée par le rotor

C_p : Le coefficient de puissance

$\lambda(t)$: le rapport de vitesse (ratio)

$$\lambda(t) = \frac{\omega_r(t).R}{V_w(t)} \quad \textbf{(II.3)}$$

ω_r : La vitesse du rotor.

Le couple aérodynamique appliqué au rotor peut être exprimé comme :

$$\tau_r(t) = \frac{P_a(t)}{\omega_r(t)} \quad \textbf{(II.4)}$$

En substituant l'équation (II.1) dans (II.2), puis les équations (II.3) et (II.4), dans (II.5) le couple appliqué au rotor est exprimé comme :

$$\tau_r(t) = \frac{\rho\pi R^2 V_w^3.C_p(\lambda,\beta)}{2\omega_r(t)} \quad \textbf{(II.5)}$$

$\tau_r(t)$: Le couple aérodynamique appliqué au rotor.

II.2.3. Système à angle de tangage (orientation des pales)

Le système de pilotage des pales d'une éolienne repose sur un ensemble d'actionneurs hydrauliques assurant le réglage de l'angle des pales afin de contrôler le fonctionnement de la turbine.

La majorité des éoliennes à axe horizontal sont équipées de trois pales, chacune disposant de son propre actionneur, permettant ainsi un contrôle indépendant et précis de leur orientation. Ce système joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la puissance

Produite et dans la protection de l'éolienne contre les variations excessives de la vitesse du vent. [45] [34] [47]. La figure II.3 illustre la structure générale du système, qui comprend la pompe, le réservoir, le distributeur électrohydraulique et le vérin hydraulique.

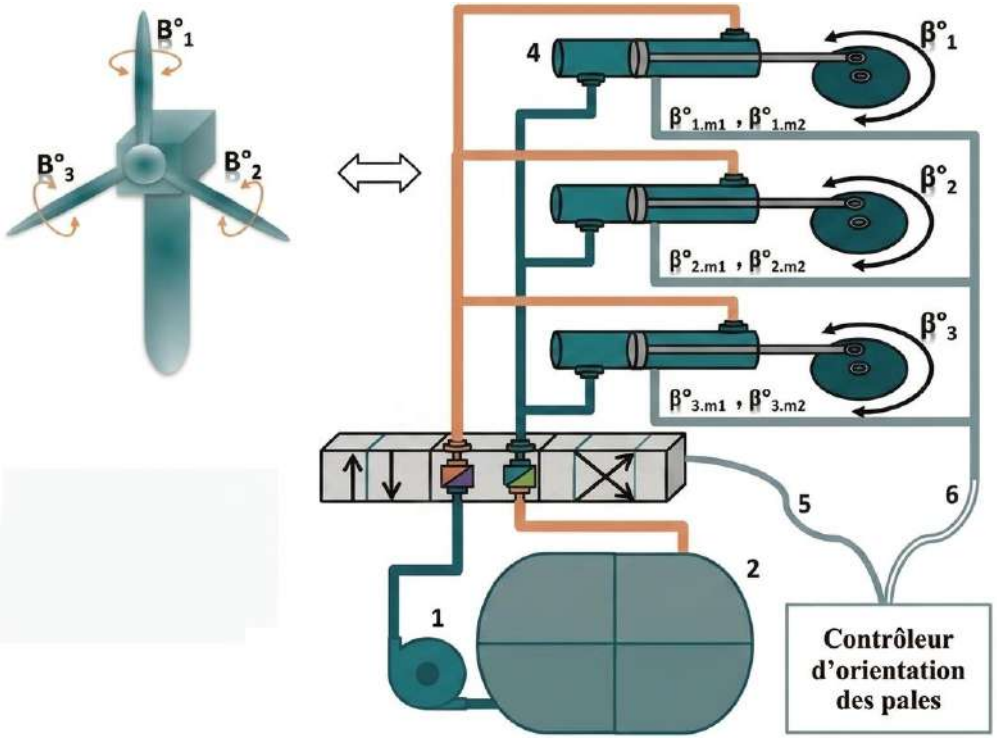


Figure II.2. *Système hydraulique d'orientation de trois pales*

Ce système est modélisé à l'aide de fonctions de transformation du second ordre en boucle fermée, reliant l'angle de référence (β_r) à l'angle de pale mesuré (β_m). β_r est défini par le contrôleur général, tandis que $\beta_m$sert à optimiser la régulation interne.

Les paramètres nominaux du système sont définis par $\boldsymbol{\xi}$ = 0,6 et $\boldsymbol{\omega_n}$= 11,11 rad/s.

$$\frac{\beta_m s}{\beta_r s} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

La figure II.3 illustre une architecture composée de trois actionneurs indépendants, chacun étant associé à deux capteurs. Cette configuration permet d'améliorer la précision des mesures et d'assurer une meilleure fiabilité des signaux acquis.

La redondance des capteurs joue également un rôle important dans la surveillance du système, en facilitant la détection d'éventuelles anomalies ou défaillances pouvant affecter le fonctionnement du système d'orientation des pales.

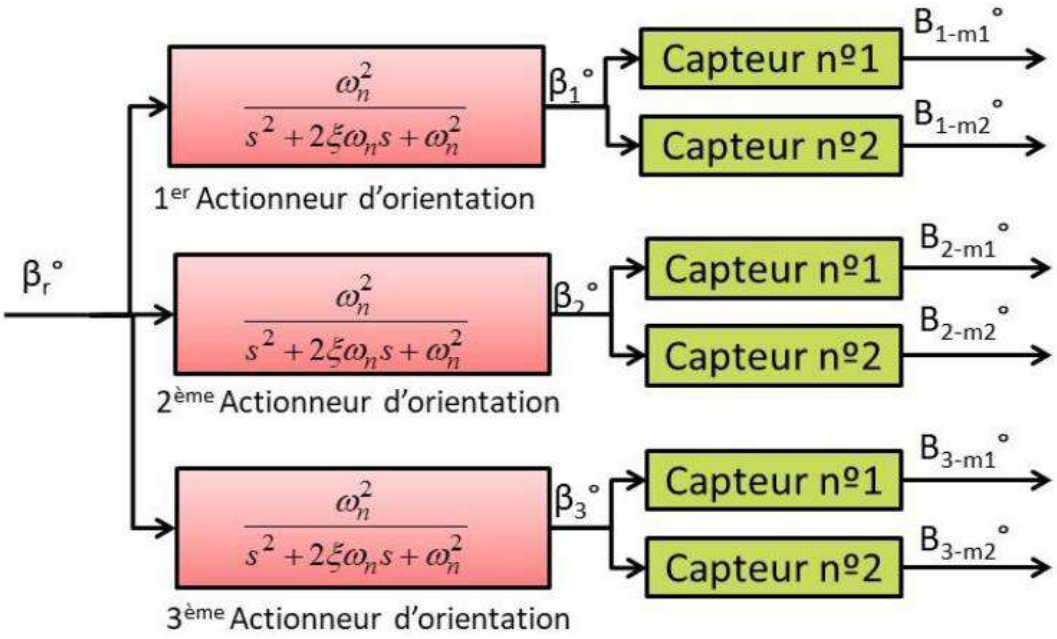


Figure II.3. *Schéma bloc du système utilisé pour l'orientation des pales*

Le modèle de benchmark des défauts utilisé [45] [38] [47] repose sur la modification des paramètres du système

- Une diminution de la pression (**B3**) réduit $\boldsymbol{\xi}$ et $\boldsymbol{\omega_n}$, tandis qu'une augmentation de la pression d'air (**B4**) les modifie différemment, influençant ainsi la réponse du système.

- Les dysfonctionnements des capteurs incluent un écart constant (**A1**), indiquant un défaut mécanique, et une variation de gain **(A2**), indiquant un défaut électrique.

Ces dysfonctionnements peuvent affecter n'importe quel capteur au sein de n'importe quel actionneur.

II.3. Simulation de la turbine éolienne (Système d'orientation des pales) avec et sans défauts

Dans cette section, la simulation est consacrée au système d'orientation des pales afin d'analyser l'évolution des différentes grandeurs qui décrivent son comportement dynamique. Ce système est étudié dans deux conditions de fonctionnement : sans défaut et avec défaut.

Le simulateur du benchmark fournit plusieurs signaux mesurés relatifs au système d'orientation des pales, notamment les positions angulaires des pales. Afin d'assurer la fiabilité des mesures, le système repose sur une redondance physique basée sur l'utilisation de deux capteurs identiques, permettant de vérifier la cohérence des valeurs acquises pour chaque variable.

Le modèle de référence utilisé pour le système d'orientation des pales comprend un scénario temporel intégrant cinq défauts typiques susceptibles d'apparaître dans le système d'orientation des pales, ainsi qu'un scénario de fonctionnement normal sans défaut. Cette configuration permet d'analyser l'influence de ces anomalies sur le comportement du système et de faciliter leur détection et diagnostic.

- Défaut (1) : Valeur fixe comme un blocage dans le capteur $\beta_{1.m1}$ égale à 4° dans le temps d'intervalle de [100s : 200s]

- Défaut (2) : Facteur de Gain (défaut multiplicatif) égale à (1.8*$\beta_{2.m2}$) dans le capteur β2.m2 pendant le temps d'intervalle de [2500s :2600s]

- Défaut (3) : Un défaut de valeur fixe dans le capteur $\beta_{3.m1}$égale à 12° pendant le temps d'intervalle de [900s : 1000s]

- Défaut (4) : Une chute de la pression hydraulique dans le 2ème actionneur (β_2) produit dans un temps d'intervalle [3200s : 3300s]

- Défaut (5) : Une augmentation du contenu d'air dans le 3ème actionneur (β_3) dans le temps d'intervalle [3400s : 3500s]

II.3.1 signaux de mesure dans le système d'orientation des pales avec et sans défauts

- Les angles d'orientation des pales sont présentés à travers les courbes des signaux recueillis par les capteurs $\beta_{1.m1}, \beta_{1.m2}, \beta_{2.m1}, \beta_{2.m2}, \beta_{3.m1}, \beta_{3.m2}$, comme l'illustrent respectivement les figures (II.4 jusqu'à II.11).
- Le premier capteur de position angulaire $\beta_{1.m1}$, intégré au sous-système d'orientation de la première pale, a présenté un dysfonctionnement (Défaut (1)) pendant l'intervalle [100 s : 200 s], comme le montre la Figure (II.4).

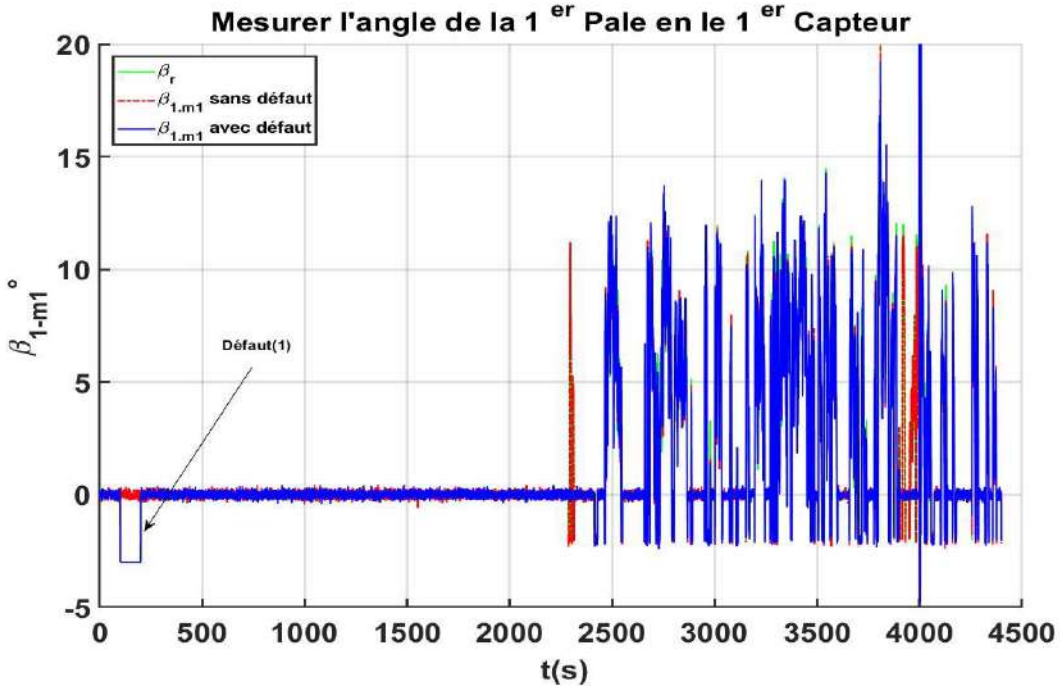


Figure II.4. *Mesure $\beta_{1.m1}$ dans le 1^{er} Actionneur du système d'orientation des pales.*

Cette figure met en évidence un écart entre les valeurs relevées en régime nominal (scénario sans erreur) et celles enregistrées lorsque le capteur est affecté par une anomalie (scénario avec erreur).

Durant toute la période du défaut, la sortie du capteur défaillant est restée constante à (-4°). En revanche, la figure (II.5) indique que les valeurs fournies par le second capteur $\beta_{1.m2}$ demeurent à (0°) sur la même durée, aussi bien dans le scénario avec erreurs que dans le scénario sans erreurs. Ce capteur contribue également à la surveillance de la position angulaire de la même pale.

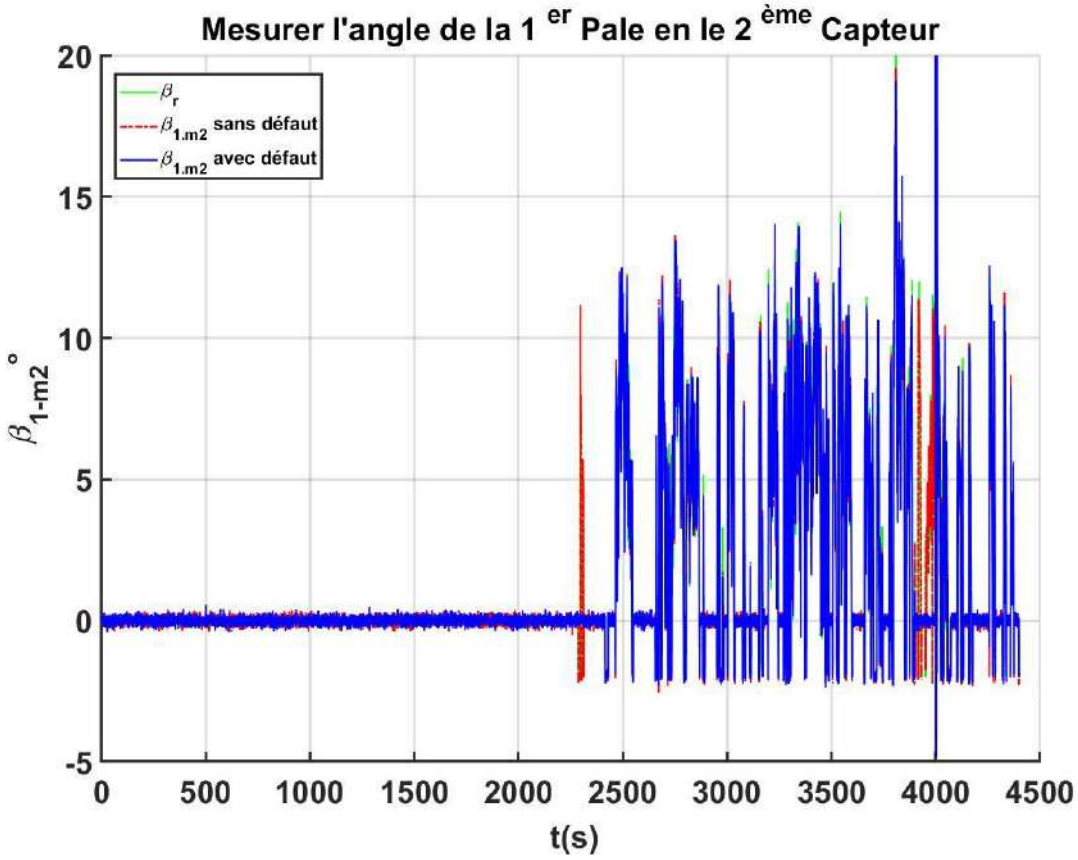


Figure II.5. *Mesure $\beta_{1.m2}$ dans le 1^{er} actionneur du système d'orientation des pales.*

❖ La figure (II.6) met en évidence l'apparition d'une anomalie électrique au niveau du second capteur de déplacement du sous-système d'orientation de la deuxième pale (Défaut (2)), durant l'intervalle [2500 : 2550]. Cette perturbation provoque une élévation des valeurs mesurées par rapport à celles obtenues avec le même capteur en fonctionnement normal (scénario sans erreur). En parallèle, la figure (II.6) montre que les valeurs relevées restent pratiquement identiques dans les deux cas (scénario avec erreurs et sans erreurs).

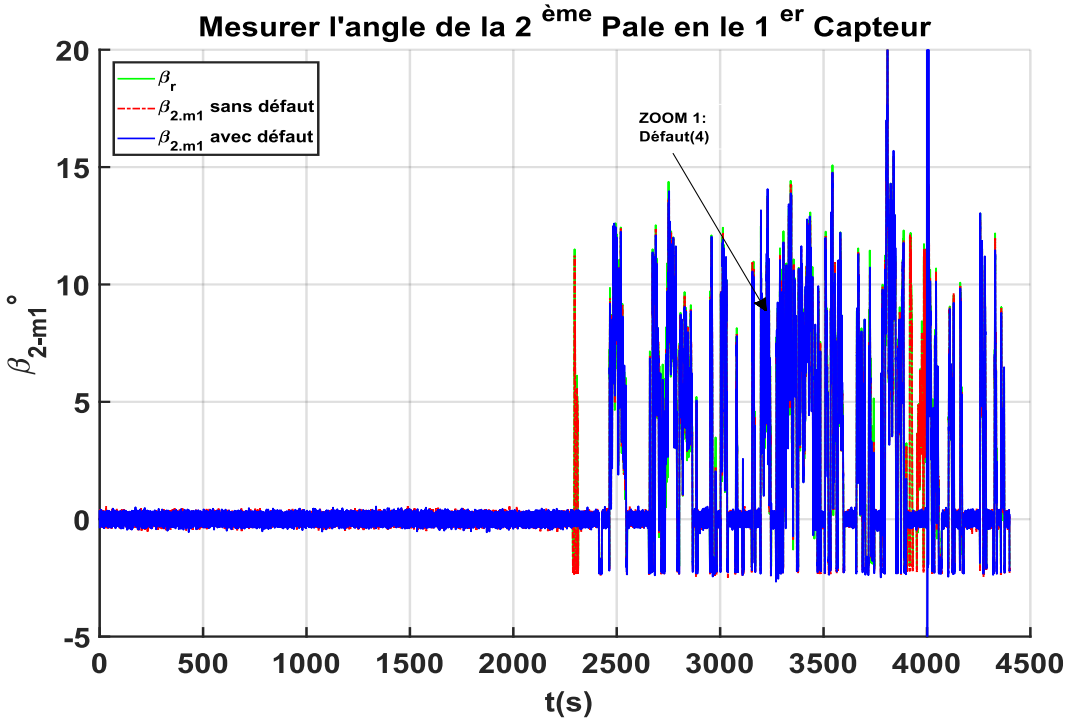


Figure II.6. *Mesure $\beta_{2.m1}$ dans le $2^{éme}$ actionneur du système d'orientation des pales.*

❖ Entre 3200 s et 3300 s, la pression à l'intérieur du sous-système d'orientation de la deuxième pale a diminué progressivement pendant 100 secondes (Défaut (4)). La figure (II.8) présente des agrandissements de trois secondes, extraits respectivement des figures (II.6) et (II.7).

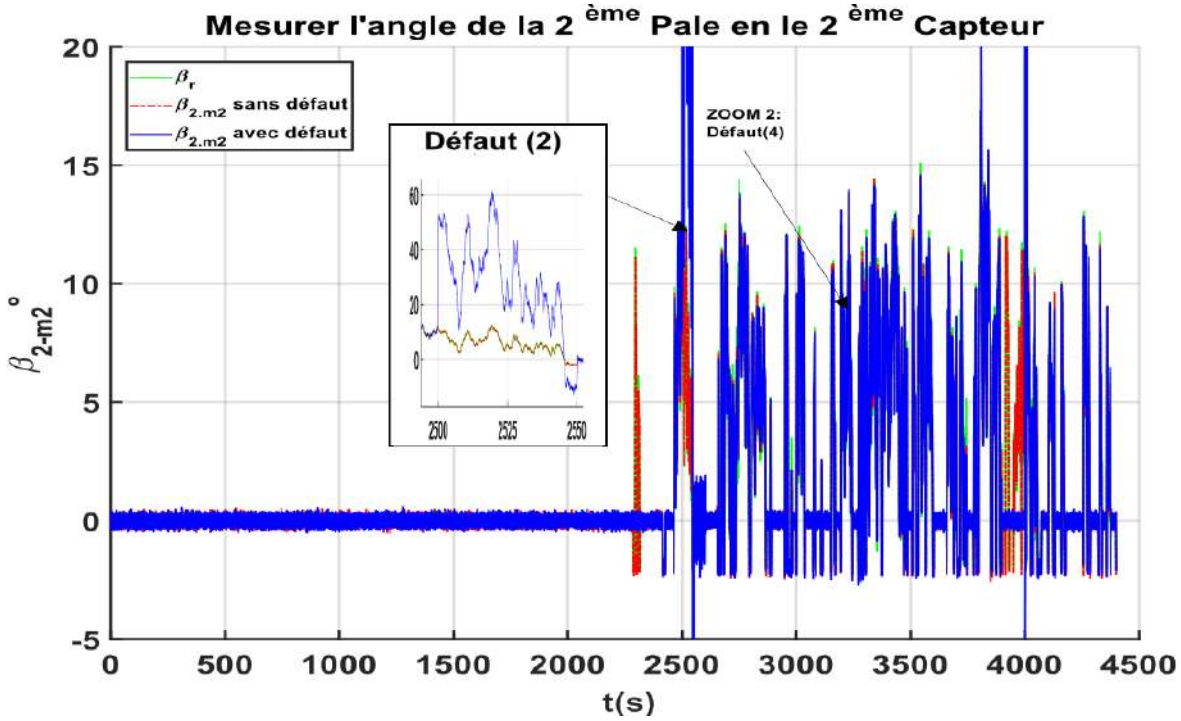


Figure II.7. *Mesure* $\beta_{2.m2}$ *dans le* $2^{éme}$ *actionneur du système d'orientation des pales.*

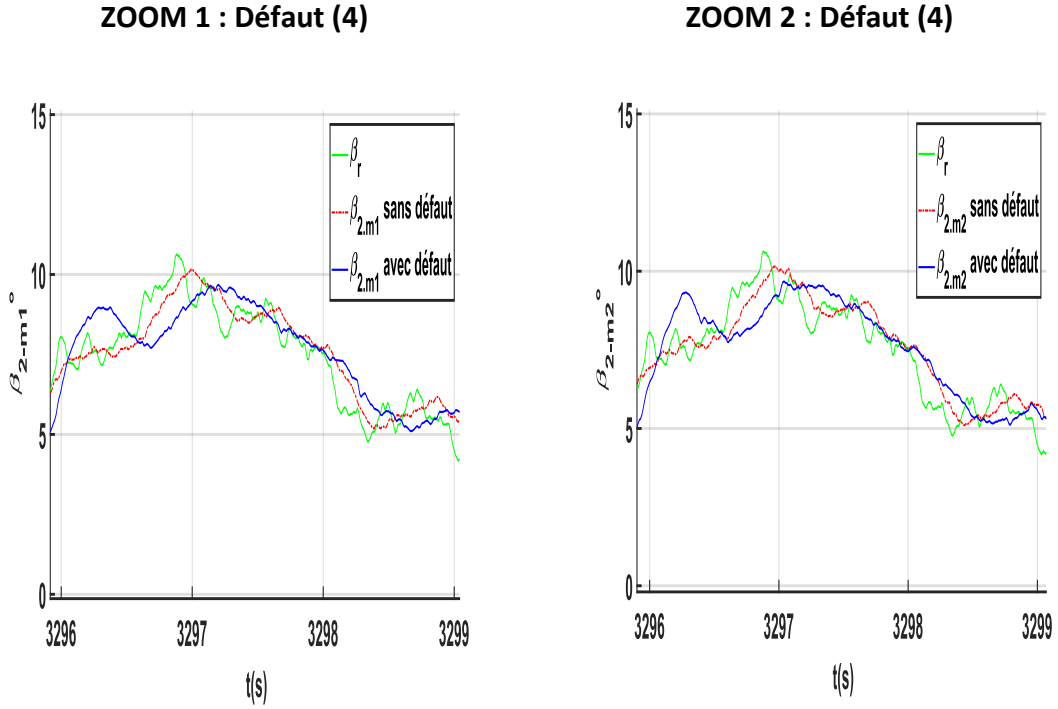


Figure II.8. *Zoom 1 et Zoom 2 dans les figures II.6 et II.7 respectivement.*

Ces zooms montrent que les signaux issus des deux capteurs restent proches dans le scénario avec défauts, mais qu'ils deviennent différents lorsqu'ils sont comparés au scénario sans défauts, en raison de l'altération du comportement du système étudié

- La figure (II.9) montre que le premier capteur de déplacement $\beta_{3.m1}$, monté dans le sous-système d'orientation de la troisième pale, est devenu défaillant et est resté bloqué à 7° durant l'intervalle [900 s : 1000 s] (Défaut (3)).

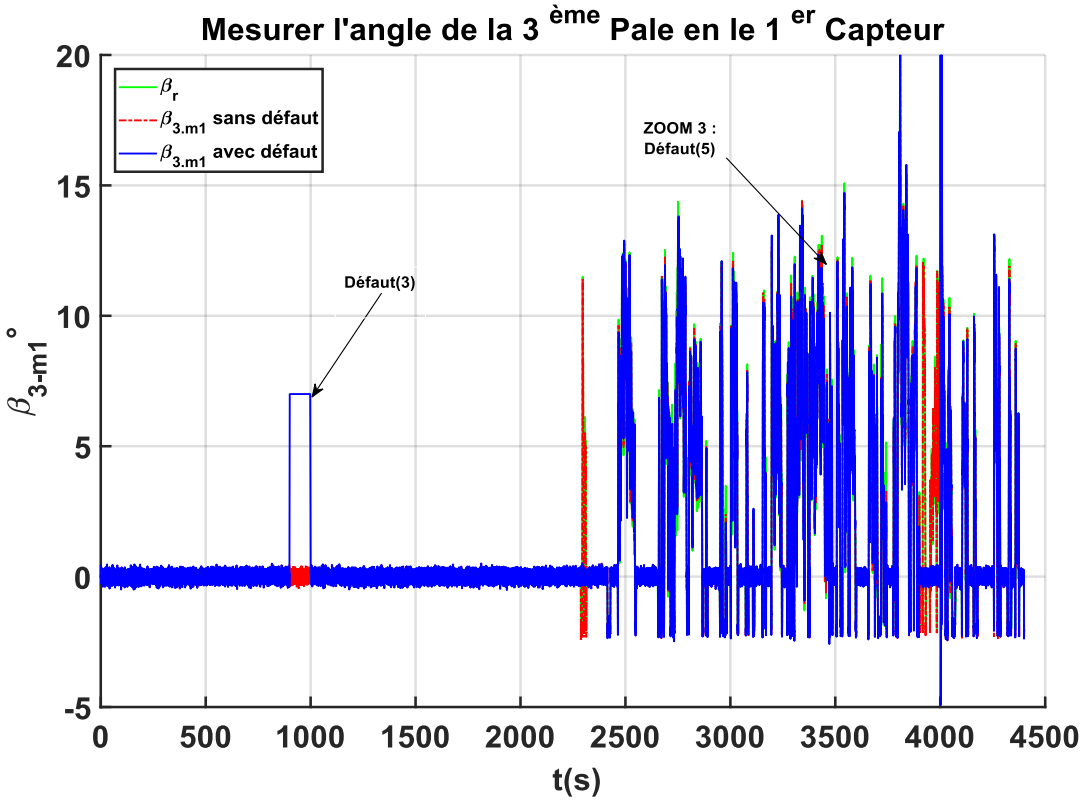


Figure II.9. *Mesure $\beta_{3.m1}$ dans le $3^{éme}$ actionneur du système d'orientation des pales.*

Le second capteur, quant à lui, est resté à 0°, ce qui correspond au signal de référence (Fig. II.10).

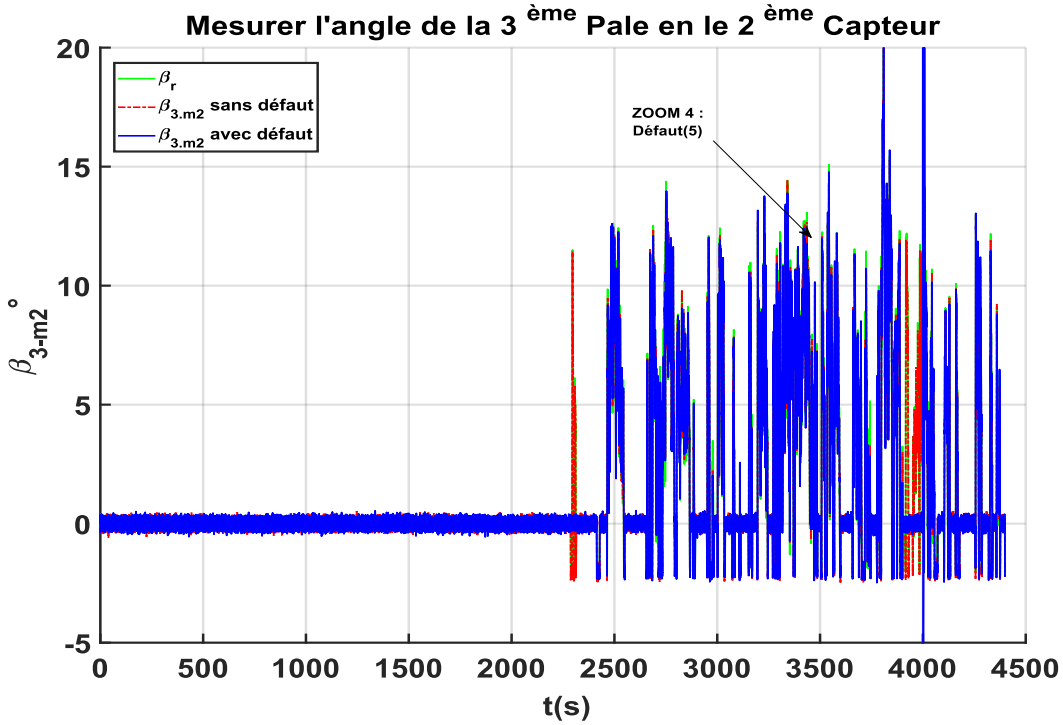


Figure II.10 . *Mesure $\beta_{3.m1}$ dans le $3^{éme}$ actionneur du système d'orientation des pales.*

❖ Les zooms (3) et (4) des figures (II.9) et (II.10) mettent en évidence l'écart entre les valeurs mesurées par les capteurs et le signal de référence, dû à une surpression à l'intérieur du sous-système d'orientation de la troisième pale durant la période [3558 s : 3561 s] (Défaut (5)).

.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivions les modèles mathématiques d'un simulateur d'éolienne à axe horizontal. Ce modèle intègre différents éléments de base dans des conditions normales (sans défaut) et des conditions difficiles (avec défauts) selon différents scénarios. Le modèle de simulation représente fidèlement la dynamique des éoliennes réelles. Différents défauts affectant les trois composants de la turbine peuvent être étudiés dans divers scénarios.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons et analyserons l'architecture de diagnostic proposée pour les éoliennes, ainsi que les résultats de simulation obtenus. Nous construirons un système de diagnostic performant pour identifier les défauts présents dans différentes sections de ce modèle de référence, et nous fournirons également des analyses techniques.

Chapitre III : Diagnostic des défauts du système d'orientation des pales

III.1. Introduction

Le bon fonctionnement d'une turbine éolienne peut être fortement compromis par l'apparition de défauts, en particulier dans le système d'orientation des pales. Si ces anomalies ne sont pas détectées à temps, elles peuvent évoluer progressivement jusqu'à conduire à une panne complète. Il est donc crucial d'identifier le plus tôt possible la transition entre un fonctionnement normal et un fonctionnement dégradé, afin de disposer d'un délai suffisant pour appliquer des actions correctives appropriées. Cette détection précoce permet de réduire les coûts de maintenance, d'augmenter la disponibilité de la turbine et d'optimiser la production d'énergie.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la simulation de défauts au sein du système d'orientation des pales, en nous appuyant sur le modèle de benchmark présenté. Les résultats de simulation sont présentés et analysés afin de mettre en évidence l'impact de ces défauts sur le comportement de la turbine et sur ses performances globales.

Enfin, une structure de diagnostic dédiée au système d'orientation des pales est décrite. Elle détaille les principales étapes de calcul et de traitement des signaux, permettant de distinguer les conditions de fonctionnement normales des situations dégradées liées aux défauts étudiés.

III.2. Étude des défauts du système d'orientation des pales

Dans le modèle d'éolienne utilisé, qui comprend divers défauts dans le système d'orientation des pales, compris des défauts dans les capteurs et les actionneurs, afin de développer une architecture de diagnostic des pannes. [3, 4, 67]. Le temps de détection des défauts (TD) constitue un facteur critique pour évaluer les performances des méthodes développées. Il est défini comme l'intervalle de temps séparant l'apparition d'un défaut de sa détection effective.

Le TD revêt une importance particulière dans le contexte des défauts affectant les capteurs et les actionneurs, car une détection rapide permet de limiter les conséquences négatives sur le fonctionnement global du système. Plus le TD est court, plus le système de diagnostic est capable de réagir efficacement, d'assurer la sécurité de l'installation et de prévenir la propagation des défaillances.

Par ailleurs, le temps de détection dépend à la fois de la gravité de chaque défaut et de l'intervalle d'échantillonnage du modèle d'éolienne, fixé à Ts = 0,01 seconde dans notre étude.

Le tableau III.1 ci-dessous récapitule les différents types de défauts du système d'orientation des pales, en précisant pour chacun leur classe, leur nature et leur temps de détection associé

Table III-1. *Type de défauts de la turbine éolienne*

Système	Défauts	Type	Classe	TD
D'orientation des pales	Défaut des capteurs	Valeur fixe	A1	TD < 10s
		Facteur de gain	A2	
	Défauts d'actionneur	Changement Dynamique	B3	TD < 8s
			B4	TD < 100s

III.3. Structure de détection de défauts proposée

Dans ce travail, la structure de détection des défauts proposée repose sur une approche basée sur la **logique floue** (Fuzzy Logic). Cette approche est particulièrement adaptée pour traiter les incertitudes, le bruit et les variations dynamiques des signaux du système.

L'objectif principal de ce module est d'améliorer la sensibilité, la fiabilité et la robustesse de la détection des anomalies au niveau du **système d'orientation des pales** (Pitch System).

Comme illustré dans la figure ci-dessous (la structure de base d'un système flou), le module proposé est divisé en trois étapes principales Inférence de Fuzzification, Moteur d'Inférence et défuzzifications, interconnectées avec une base de connaissances la figure III.1. [48] [49].

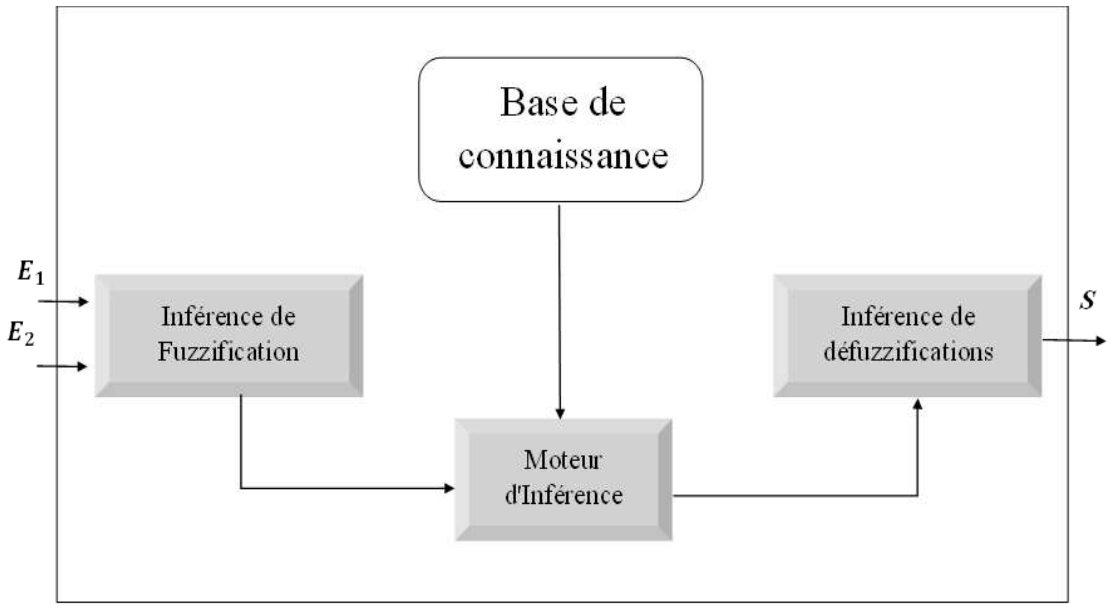


Figure III.1. *Structure de base d'un régulateur flou.*

1) **La Fuzzification** : C'est le processus qui consiste à transformer une grandeur physique réelle (donnée déterministe ou crisp) en une quantité floue. Dans notre étude, pour assurer une meilleure flexibilité et transcrire efficacement les mesures capteurs en concepts linguistiques, trois principales fonctions d'appartenance (Membership Functions) sont introduites et exploitées :

- **La fonction triangulaire (*tri*) :** Définie par trois paramètres (a,b,c) (voir figure III.2),elle est choisie pour sa simplicité algorithmique et sa faible charge de calcul computationnel. Sa formulation mathématique est donnée par :

$$tri\ (x; a, b, c) = \max\left\{\min\left\{\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right\}, 0\right\} \quad \textbf{(III.1)}$$

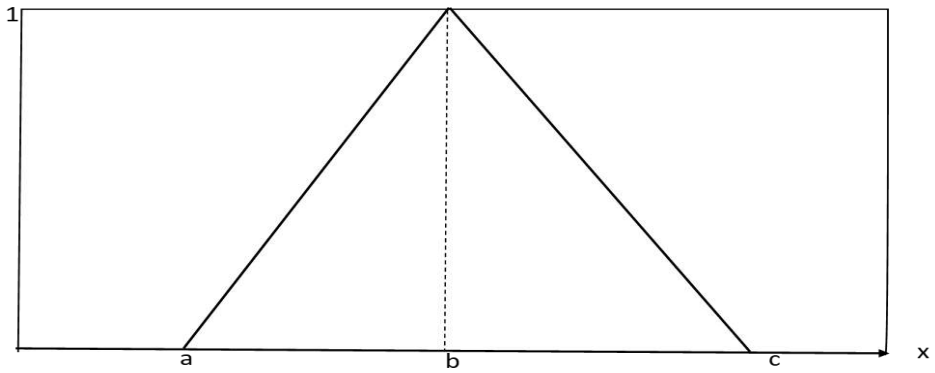


Figure III.2. *Représentation de la fonction triangulaire.*

- **La fonction trapézoïdale (*trap*) :**

Définie par quatre paramètres (a,b,c,d) (voir figure III.3), elle est utilisée pour modéliser des plages de valeurs où le degré d'appartenance reste maximal (1) et stable. Elle est exprimée par :

$$trap\ (x; a, b, c, d) = max\left\{\min\left\{\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right\}, 0\right\} \quad \textbf{(III.2)}$$

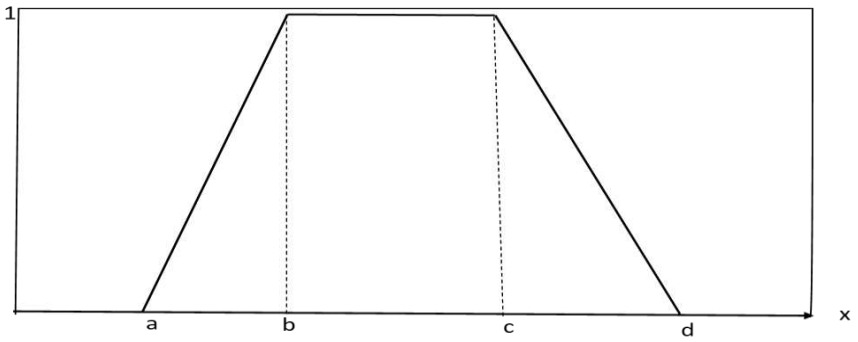


Figure III.3. *Représentation de la fonction trapézoïdale.*

- **La fonction gaussienne (*gauss*) :**

Comme le montre la figure III.4, elle est définie par son centre (***c***) et son écart-type, elle est privilégiée pour sa continuité et sa transition fluide ($smooth$). Elle permet de capturer avec précision les variations subtiles des signaux grâce à l'équation suivante :

$$gauss\ (x; c, \sigma) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right] \quad \textbf{(III.3)}$$

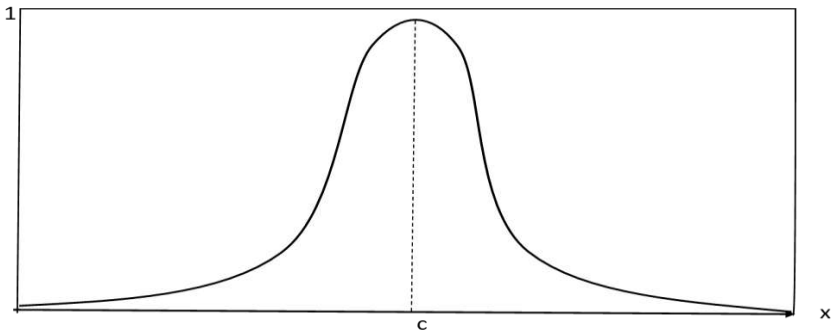


Figure III.4. *Représentation de la fonction gaussienne.*

2) Le Moteur d'Inférence (Inference Engine) :

Il constitue le cœur du raisonnement flou. Son rôle est d'évaluer l'ensemble des règles de type (**IF – THEN**) définies par les experts dans la base de connaissances. En utilisant des méthodes d'agrégation (méthodes **MAX – MIN** et **Sugeno**), il combine les prédicats pour déterminer la valeur de vérité des conclusions, permettant ainsi de diagnostiquer l'état du système à partir de données imprécises ou bruitées Cela se fait en utilisant **:**

- **La méthode d'inférence Max-Min (Mamdani)**

Elle se déroule en deux étapes principales :

Dans la première étape, on calcule le degré d'activation de chaque règle en utilisant l'opérateur MIN pour la condition « ET », c'est-à-dire que l'on prend la plus petite valeur d'appartenance des entrées.

Dans la deuxième étape, on combine les résultats de toutes les règles en utilisant l'opérateur MAX pour la condition « OU », afin d'obtenir une sortie finale unique.

Ainsi, cette méthode est appelée Max-Min car elle utilise le minimum pour l'activation des règles et le maximum pour la combinaison des résultats [48].

- **La méthode de Sugeno** :

Elle repose sur une structure différente de celle de Mamdani :

Dans cette méthode, l'opérateur « ET » est généralement réalisé par le minimum, afin de déterminer le degré d'activation de chaque règle. Cependant, la conclusion des règles n'est pas une fonction floue, mais une fonction mathématique (souvent polynomiale). La sortie finale du système est obtenue en calculant une moyenne pondérée des sorties de toutes les règles, en tenant compte de leur degré d'activation.

3) La Défuzzification : Cette dernière étape convertit la sortie floue globale du moteur d'inférence en une valeur nette (crisp output), exploitable directement par l'opérateur ou le système de commande pour signaler la présence ou l'absence d'un défaut (ex : calcul du centre de gravité $\boldsymbol{COG}$, moyenne des maxima ($\boldsymbol{MM}$)) [50].

En convertissant les données incertaines du **système d'orientation des pales** en décisions de diagnostic fiables, cette structure proposée permet de minimiser les fausses alarmes et de renforcer l'efficacité globale du système de surveillance.

III.3.1. Principe de la structure de détection de défauts proposée

Dans ce travail, une méthode de détection basée sur la logique floue est appliquée en deux étapes afin d'identifier et d'isoler les défauts simulés dans le système d'orientation des pales d'une turbine éolienne, conformément au modèle de benchmark présenté précédemment. Le fonctionnement de cette structure

repose principalement sur deux étapes de traitement : la génération des résidus puis l'identification des défauts à partir de l'analyse des écarts observés [47] [51].

III.3.1. 1.Explication de la structure

Elle comprend 6 entrées identiques (a, b, c, d, e, f) et 9 sorties identiques (FB11, FB12, FB21, FB22, FB31, FB32, FB1, FB2, FB3) (voir Figure III.5).

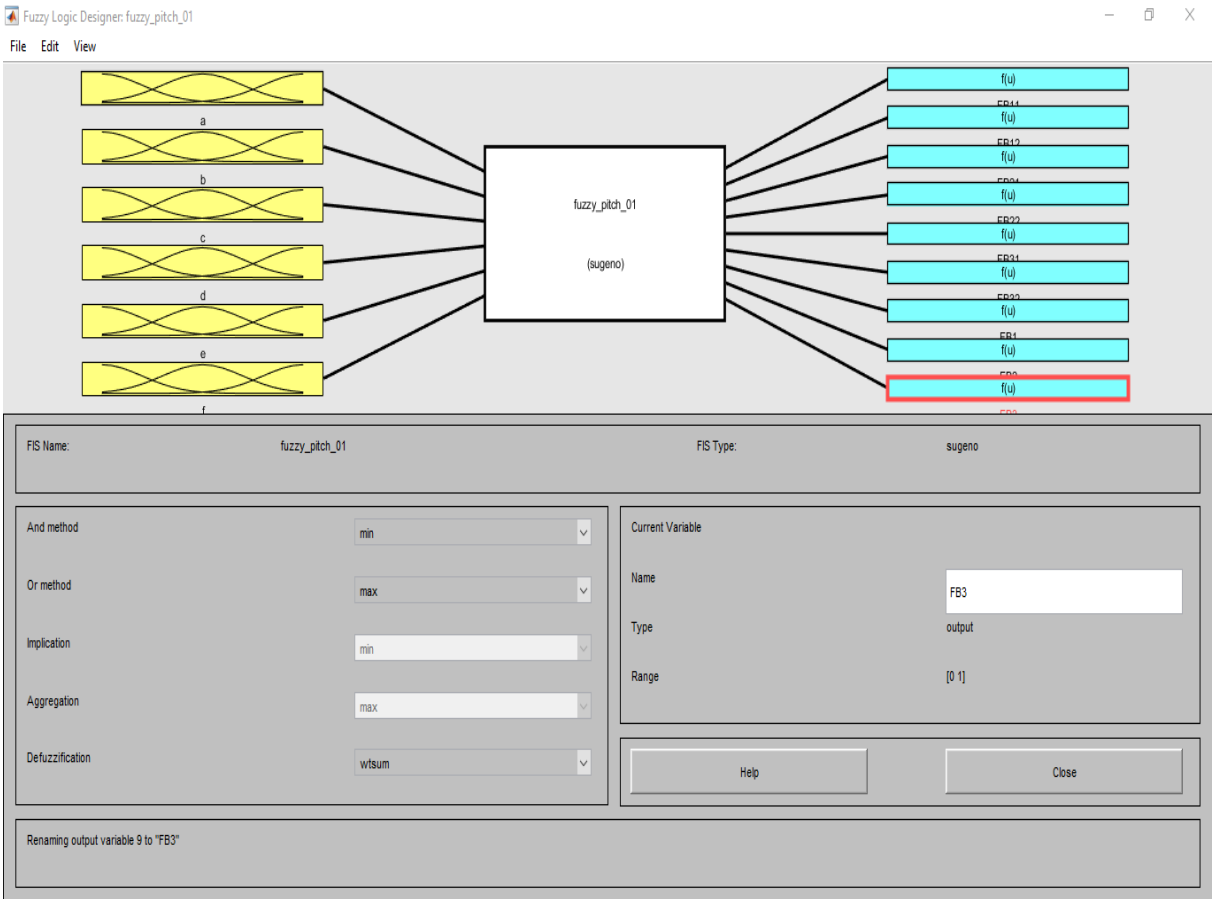


Figure III.5. *Structure de logique floue.*

1. Les Entrées

La Figure III.6 et III.7 présente les fonctions d'appartenance de la variable floue A. Deux ensembles flous, « GOOD » et « NOT_GOOD », ont été utilisés avec des fonctions trapézoïdales TrapMF.

L'ensemble « Good » correspond aux états de fonctionnement corrects du système. Ses paramètres (a = 0, b = 0, c = 0,6, d = 0,8) signifient :

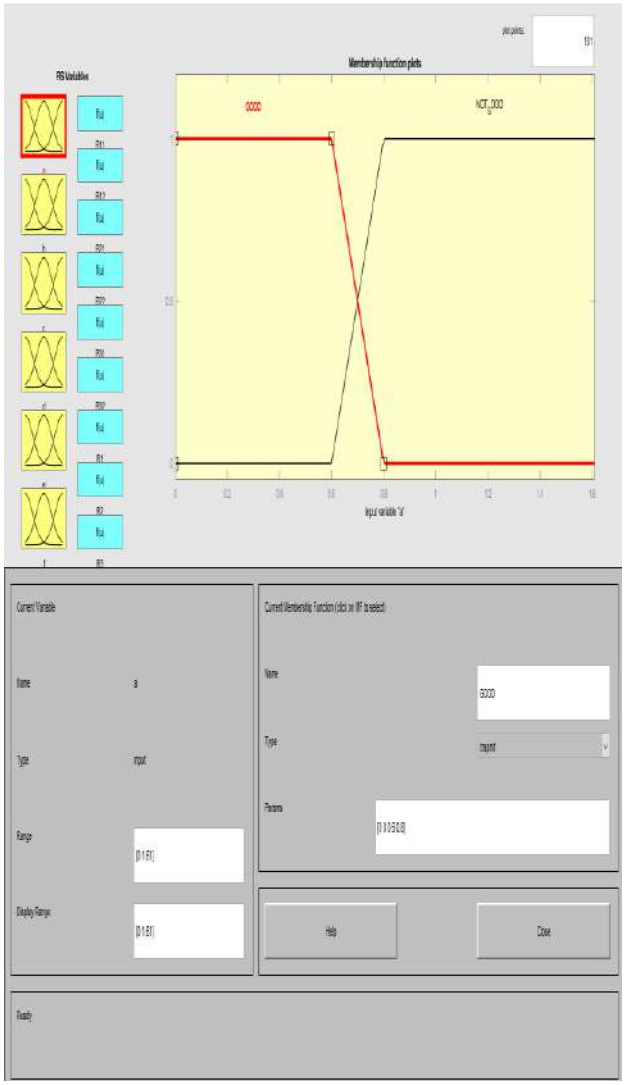


Figure III.6. *La fonction d'appartenance (GOOD)*

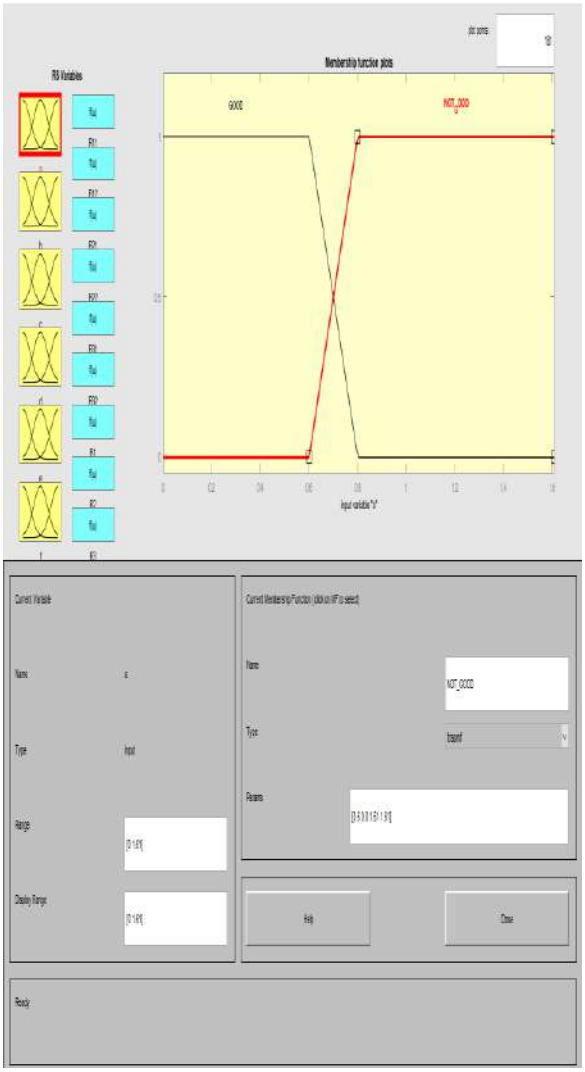


Figure III.7. *La fonction d'appartenance (NOT_GOOD)*

- Lorsque la valeur de A est comprise entre 0 et 0,6, le score d'appartenance est de 1, ce qui signifie que l'état est parfaitement bon.
- Entre 0,6 et 0,8, le degré d'appartenance diminue progressivement de 1 à 0.
- Au-delà de 0,8, le degré d'appartenance devient nul.

Par conséquent, de faibles valeurs de la variable a indiquent un fonctionnement normal.

L'ensemble flou NOT_GOOD représente l'état anormal du système, où ses coefficients (a = 0,6, b = 0,8, c = 1,61, d = 1,61) signifient :

- Le degré d'appartenance est de 0 lorsque $A < 0,6$.
- Il augmente progressivement entre 0,6 et 0,8.
- Il atteint la valeur 1 lorsque $A \geq 0,8$.

Cela signifie que des valeurs élevées de la variable A indiquent un dysfonctionnement ou un comportement anormal possible du système.

La zone de chevauchement entre 0,6 et 0,8 permet également de représenter les incertitudes, ce qui contribue à améliorer la précision du système de diagnostic flou et à réduire la probabilité de décisions erronées dues à de faibles variations des signaux mesurés.

2. Les Sorties

Les figures III.8 et III.9 (page suivante) représentent l'une des sorties du système d'inférence floue Sugeno FIS. La représentation des sorties dans Sugeno diffère de celle de Mamdani, car elle n'utilise pas de fonctions d'appartenance géométriques (triangulaires ou trapézoïdales) mais utilise des valeurs fixes.

- Lorsque le résultat est égal à 1, la règle associée à cette sortie est respectée, indiquant un défaut (figure III.8).

- Lorsque le résultat est égal à 0, la règle associée à cette sortie est respectée, indiquant l'absence de défaut (figure III.9).

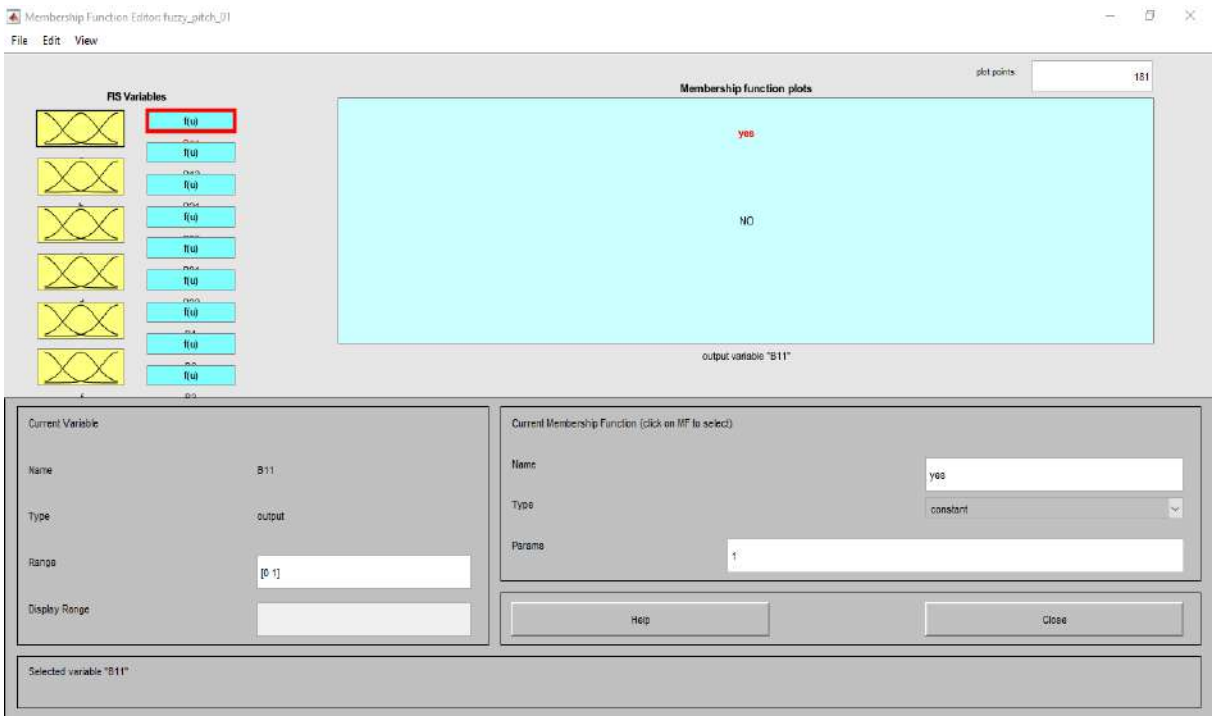


Figure III.8. *la Sortie constant (yes)*

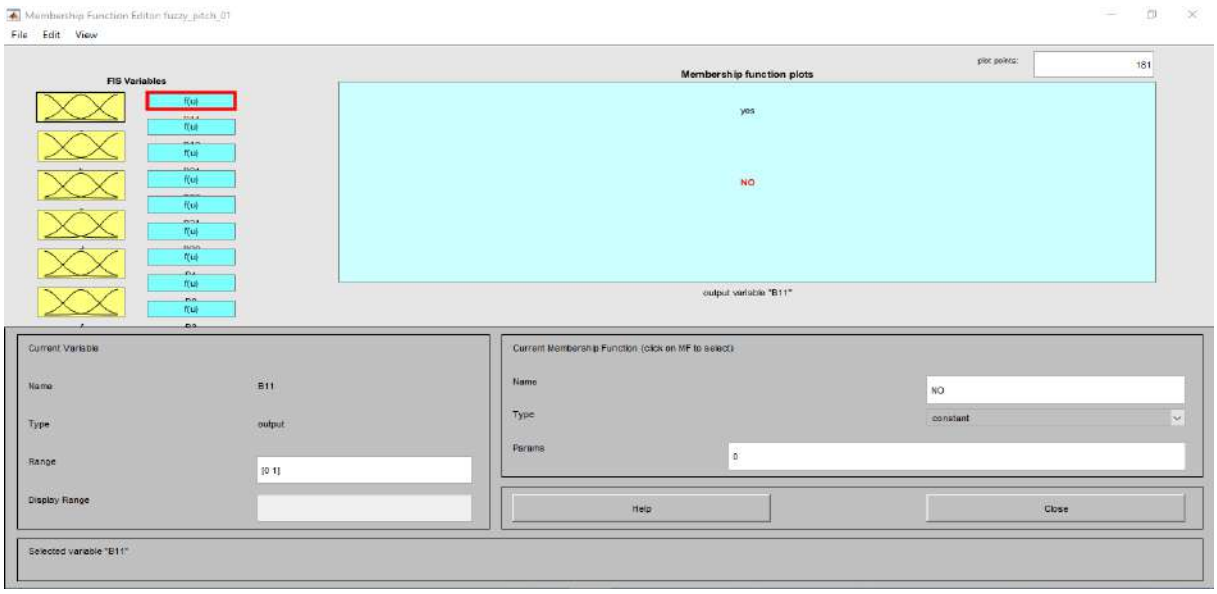


Figure III.9. *la Sortie constant(NO)*

3. Les Règles

Les règles floues constituent la base de connaissances d'un système flou. Elles permettent de relier les variables d'entrée aux variables de sortie selon un ensemble de règles (**IF-THEN**)

Ces règles s'appuient sur la connaissance préalable du comportement du système afin d'interpréter ses différents états de fonctionnement et de prendre les décisions appropriées. Dans le cadre de nos travaux, nous avons conçu un ensemble de règles floues, fondées sur les résidus d'un modèle d'éolienne, pour détecter, isoler et identifier les types de défauts (figure III.10).

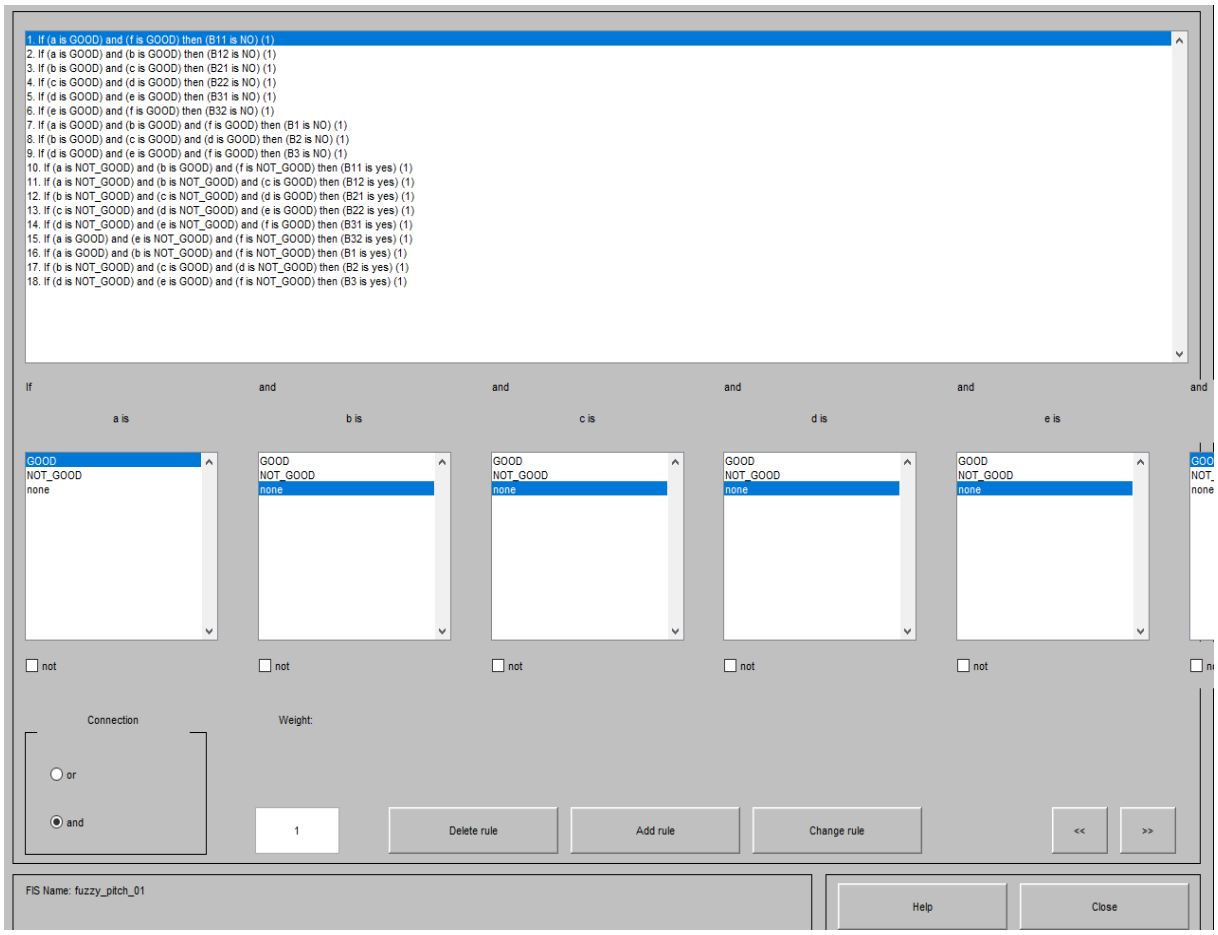


Figure III.10. *Les règles floues*

Example1:

- La règle 1 = If (**a** is **GOOD**) and (**f** is **GOOD**) then (**B11** is **NO**)

Sa signification : Si la valeur de a est Good et que la valeur f est Good, alors la sortie **B11** = **NON**) (Aucun défaut)

Example 2:

- La régle 10 = If (**a** is **NOT_GOOD**) and (**b** is **GOOD**) and (**f** is **NOT_GOOD**) then **(B11** is **yes**)

Sa signification : Si la valeur de **a** est **Not Good** et la valeur **b** est **Good** et la valeur **f** est **Not Good**, alors la sortie **B11** = **oui**) (Il y a un défaut)

III.3.1. 2.Génération de résidus

Afin de réduire l'effet du bruit et des perturbations présents dans les signaux de mesure des capteurs du système d'orientation des pales, des filtres passe-bas du premier ordre (Low Pass Filter) sont appliqués avant l'étape de génération des résidus.

L'unité de génération des résidus repose sur une procédure de comparaison permettant de déterminer les résidus instantanés entre les valeurs mesurées par les six capteurs installés dans le système d'orientation des pales, comme illustré à la figure III.11.

Le système comporte trois actionneurs, chaque pale étant équipée de deux capteurs mesurant le même angle de pale. La différence entre les mesures de ces deux capteurs permet d'obtenir les résidus internes (a, b et c). En revanche, les résidus externes (d, e, f) sont obtenus à partir des différences entre les mesures des capteurs appartenant à des pales différentes.

Ces deux types de résidus sont calculés successivement à l'aide des équations présentées dans (III.1).

$$\textbf{\textit{Résidus Internes}} \begin{cases} a = \beta_{1.m1} - \beta_{1.m2} \\ b = \beta_{2.m1} - \beta_{2.m2} \\ c = \beta_{3.m1} - \beta_{3.m2} \end{cases} \qquad \textbf{\textit{Résidus Externes}} \begin{cases} d = \beta_{1.m2} - \beta_{2.m1} \\ e = \beta_{2.m2} - \beta_{3.m1} \\ f = \beta_{3.m2} - \beta_{1.m1} \end{cases} \qquad \textbf{(III.1)}$$

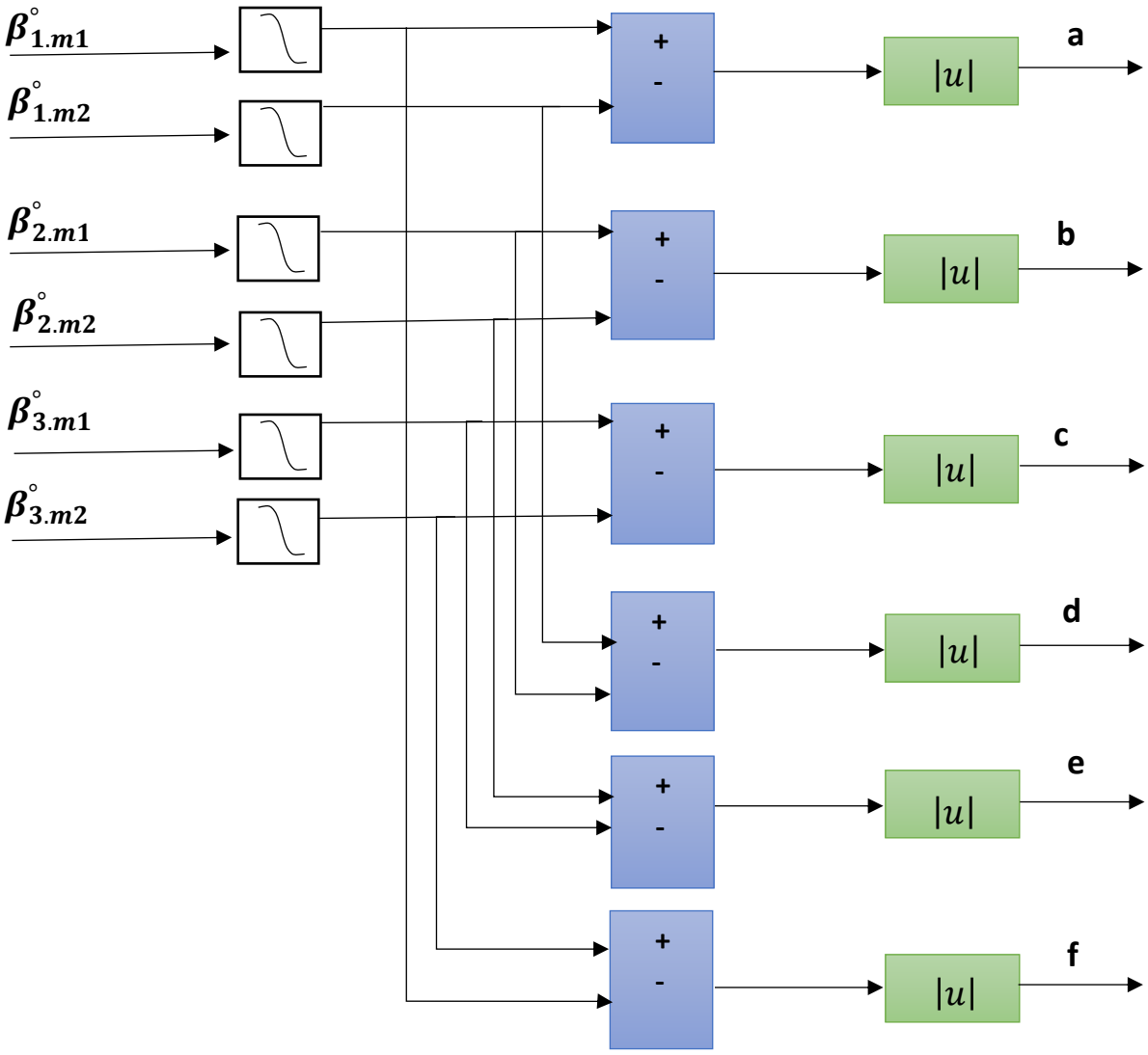


Figure III.11. *Schéma synoptique de générateur des résidus pour les pales*

III.3.1. 3. Détection Défauts du système d'orientation des pales

Dans le but d'étudier l'éfficacité de la méthode développée, nous avons créé le modèle de simulation de la turbine dans l'environnement Matlab. Les différents défauts du système d'orientation des pales proposés pour l'étude sont regroupés dans le tableau III-2.

Table III-1. *Défauts du système d'orientation des pales*

Défauts	Classe	Lieu	Types	Période d'application
f ($\beta_{1.m1}$)	A1	$\beta_{1.m1}$	Valeur fixe	[100s: 200s]
f ($\beta_{2.m2}$)	A2	$\beta_{2.m2}$	Facteur de gain	[2500s: 2600s]
f ($\beta_{3.m1}$)	A1	$\beta_{3.m1}$	Valeur fixe	[900s: 1000s]
f (β_2)	B3	β_2	Changement dynamique	[3200s: 3300s]
f(β_3)	B4	β_3	Changement dynamique	[3400s: 3500s]

Les résultats de simulation sont illustrés par les figures III.12 jusqu'à la figure III.23.

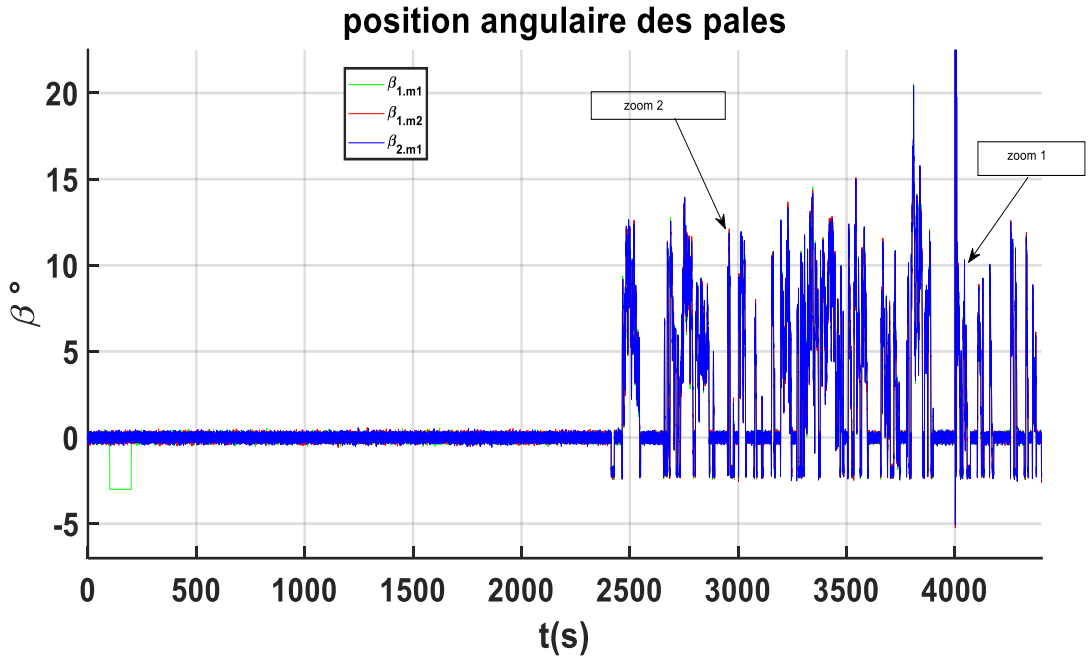


Figure III.12. *Signaux de mesure β1.m1, β1.m2 du premier actionneur et β2.m1 du deuxième actionneur*

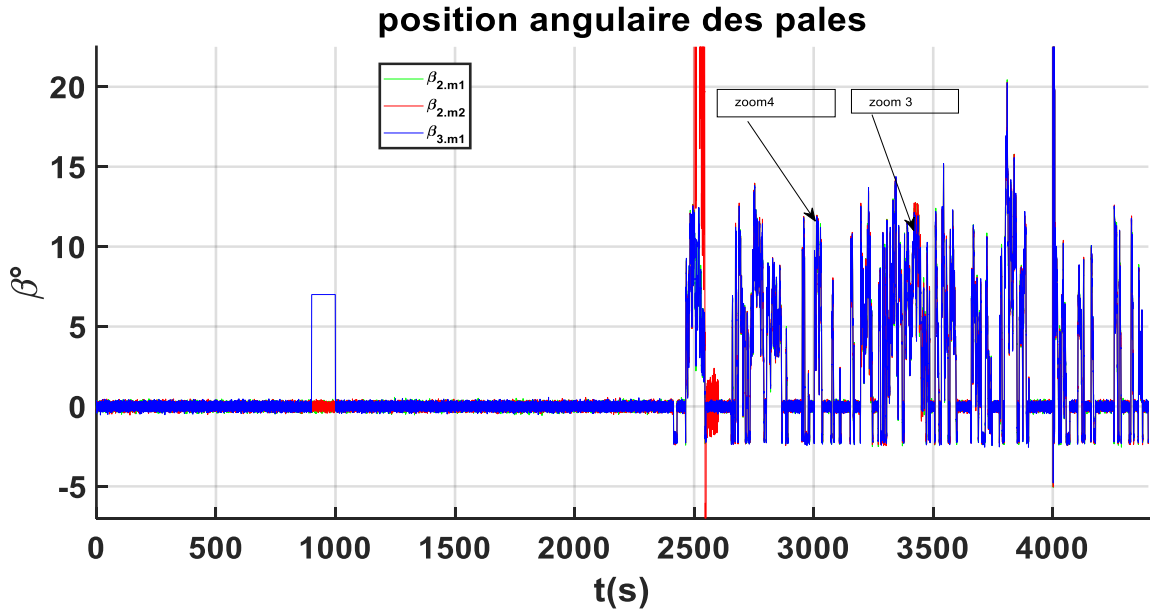


Figure III.13. *Signaux β2.m1, β2.m2 du 2ème actionneur et β3.m1 du 3ème actionneur*

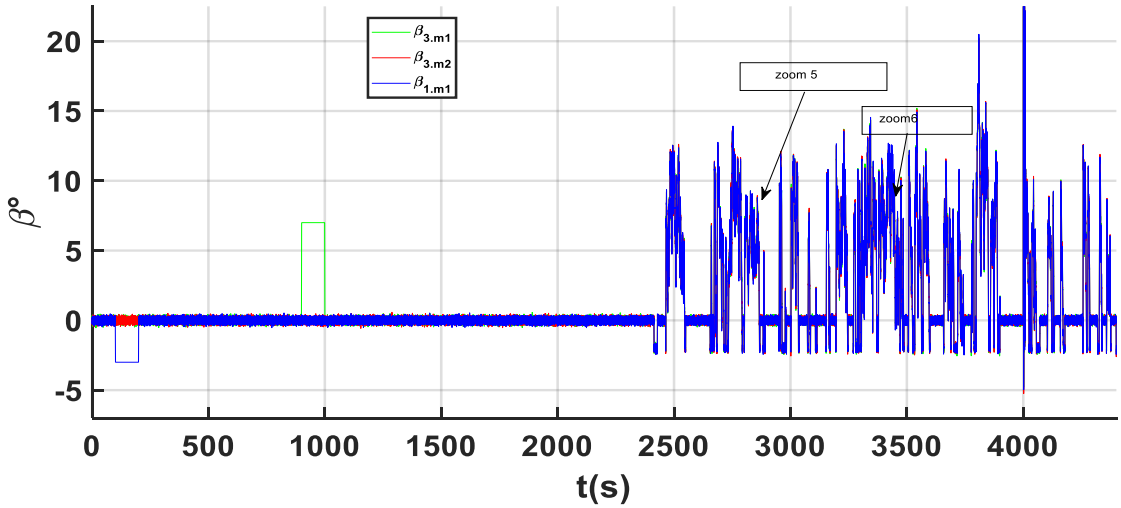


Figure III.14. *Signaux de mesure β3.m1, β3.m2 du 3ème actionneur et β1.m1 du premier actionneur.*

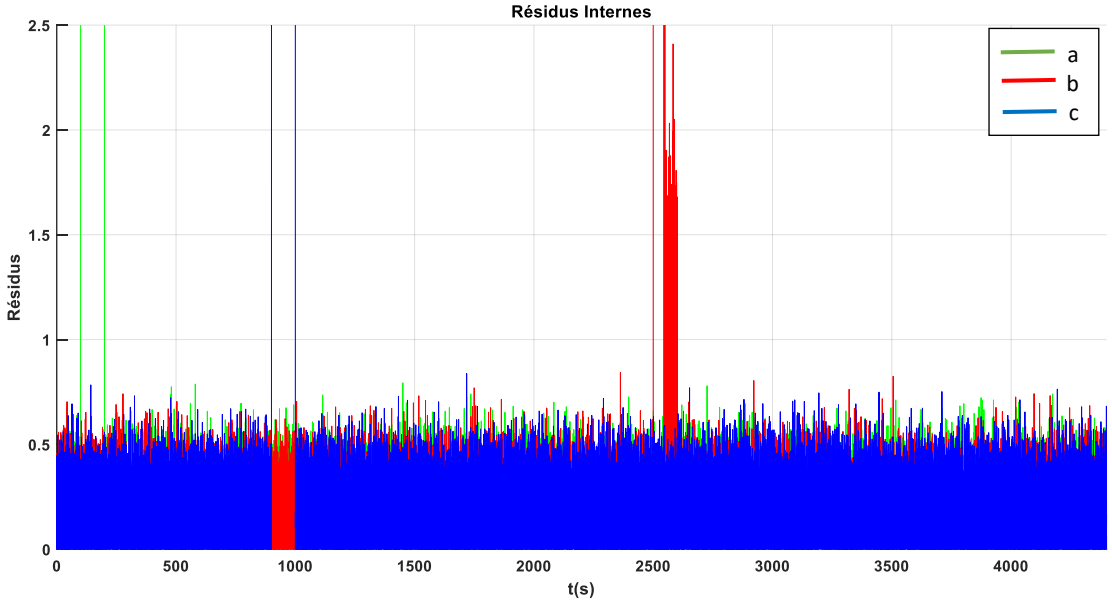


Figure III.15. *Résidus internes {a, b, et c} pour le système d'orientation des pales*



Figure III.16. *Détection de défauts aux capteurs β1.m1, et β1.m2.*

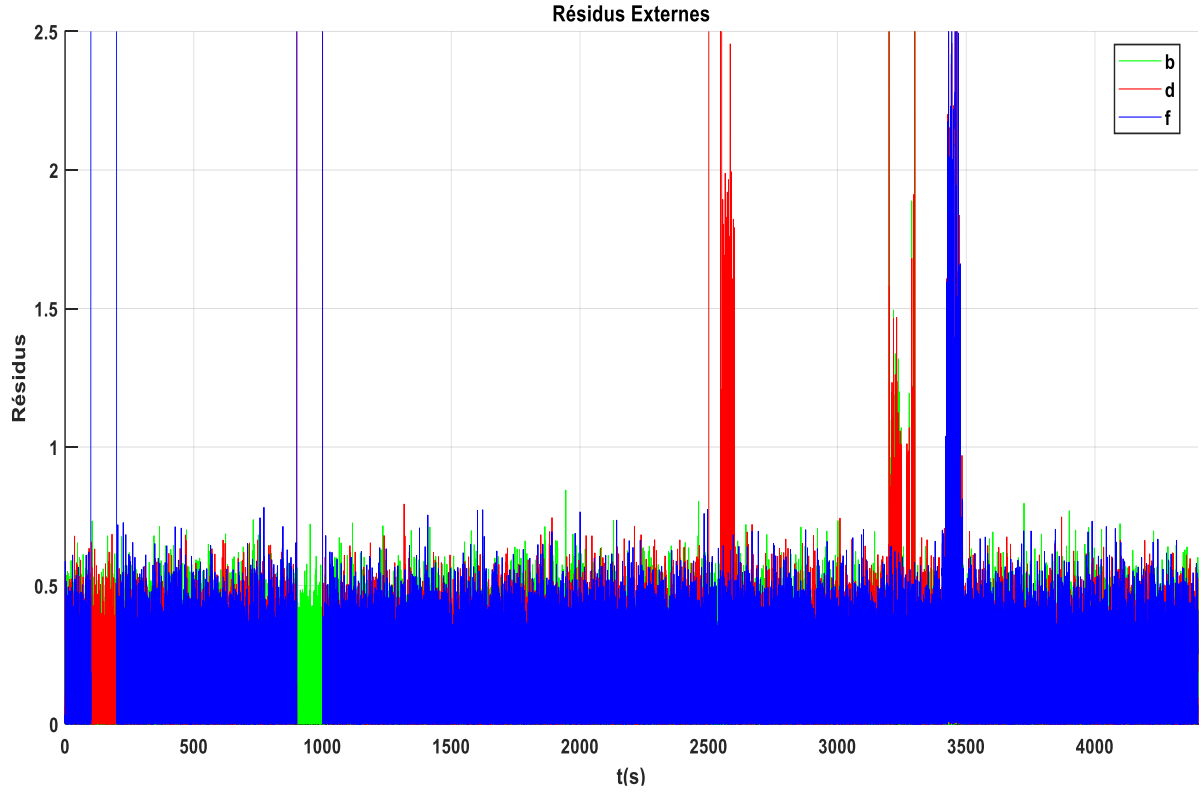


Figure III.17. *Résidus externes {d, e, et f} pour le système d'orientation des pales*

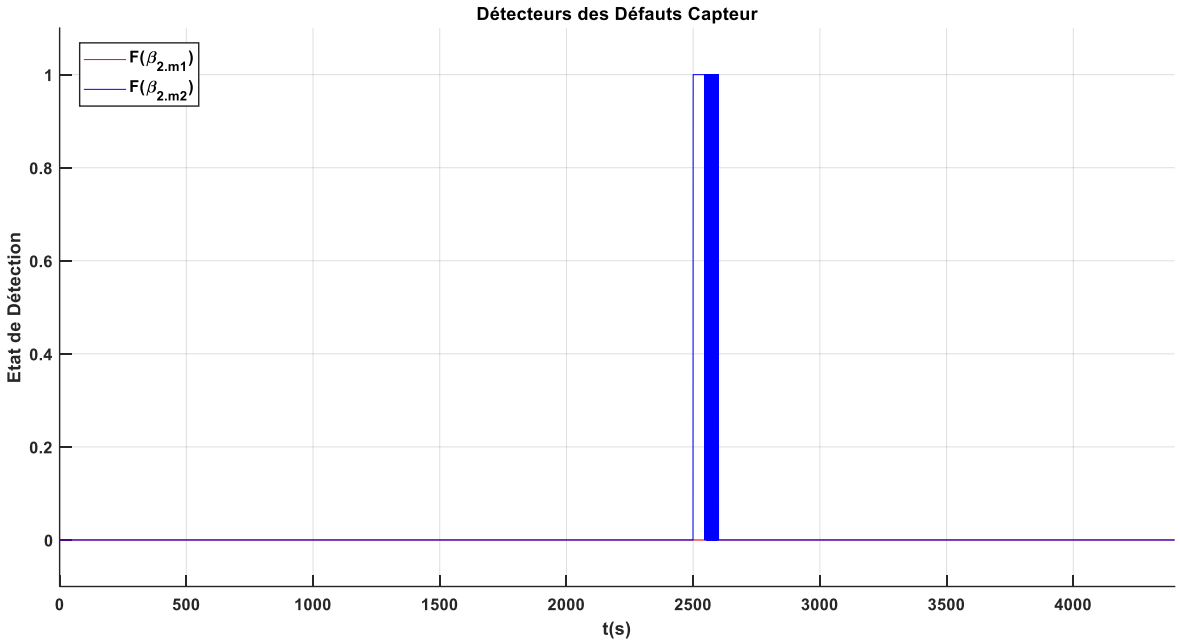


Figure III.18. *Détection de défauts aux capteurs β2.m1, et β2.m2.*

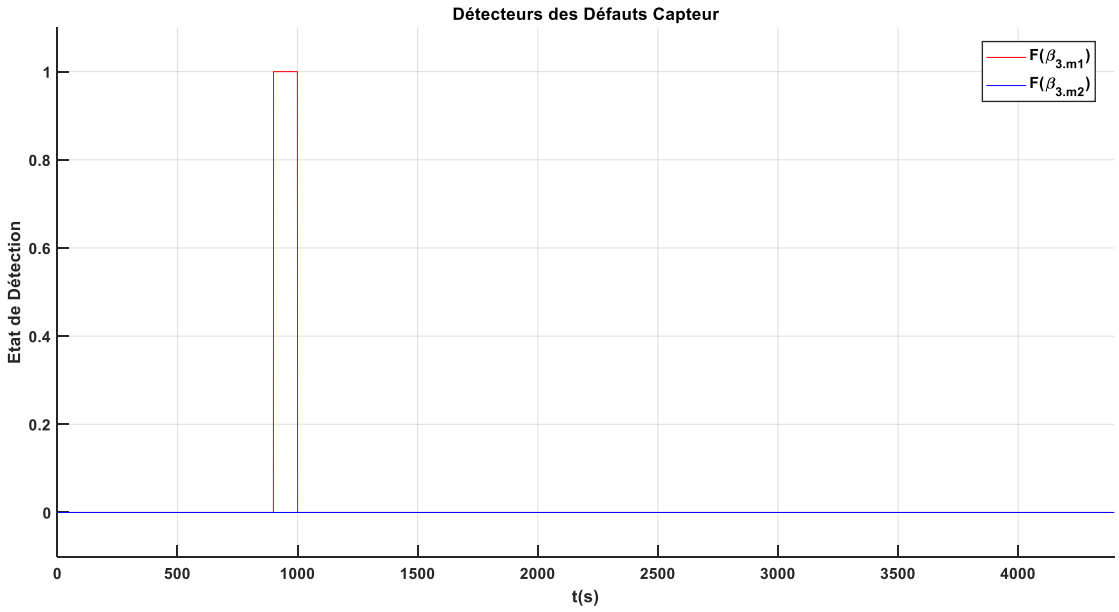


Figure III.19. *Détection de défauts capteur aux β3.m1, et β3.m2.*

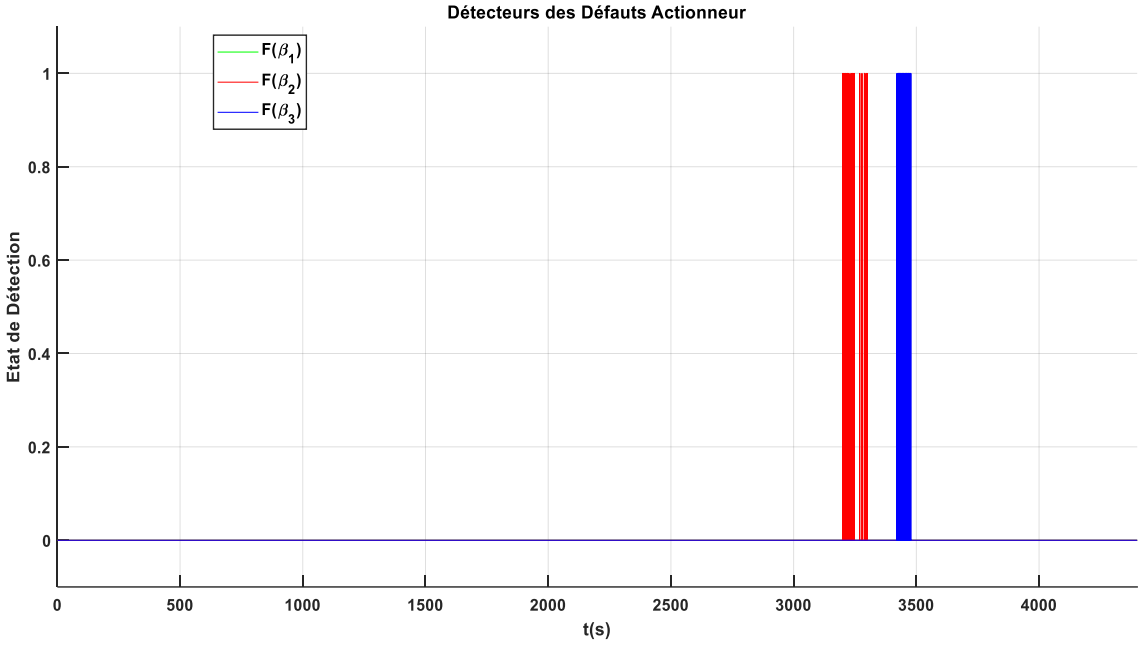


Figure III.20. *Détection de défauts actionneur dans le système d'orientation des pales*

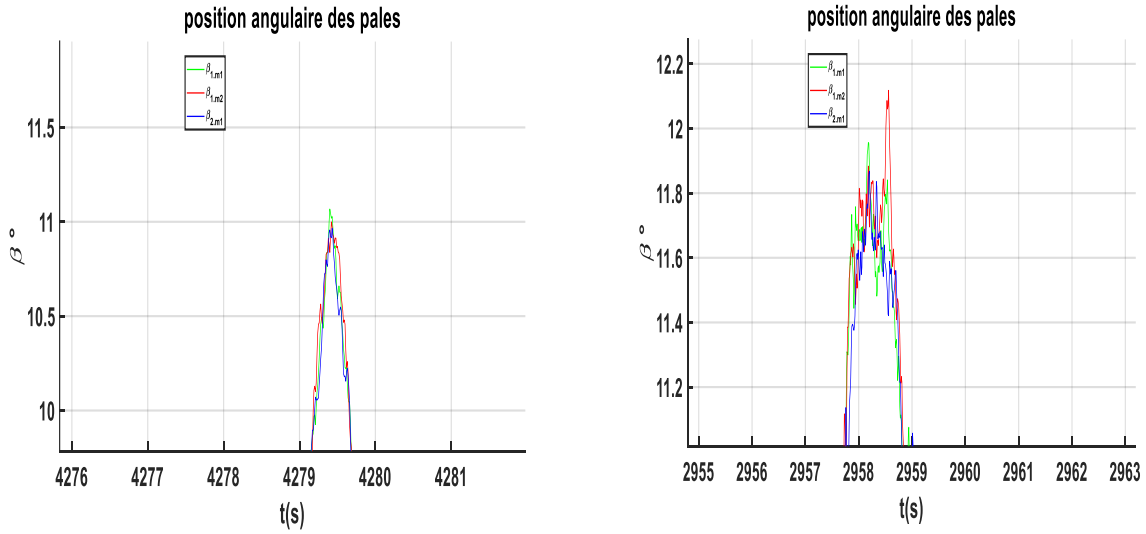


Figure III.21. *Zooms (1,2)*

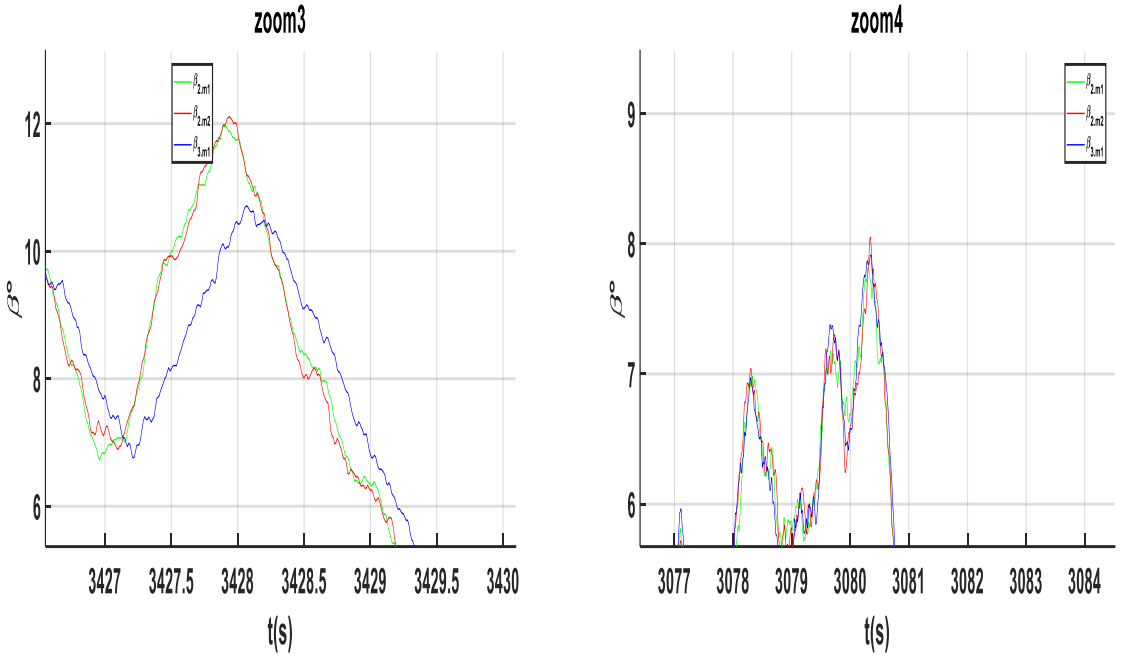


Figure III.22. *Zooms (3,4)*

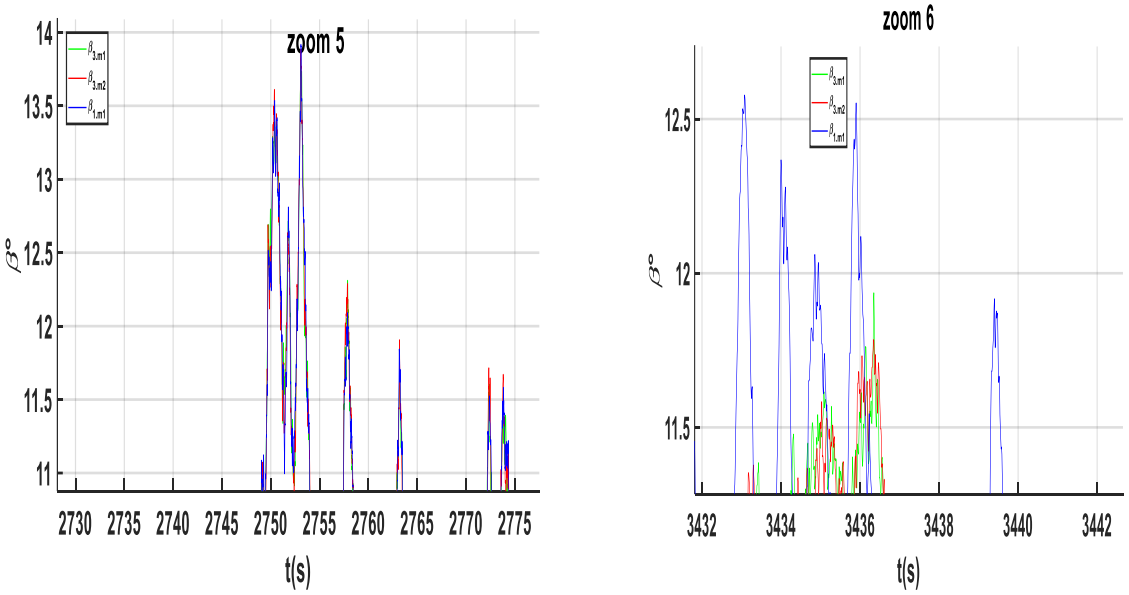


Figure III.23. *Zooms (5,6)*

III.4. Résultats et discussion

Les résultats dans les figures III.15 et III.17 montrent que les défauts survenus dans les capteurs β1.m1, β2.m2 et β3.m1 des actionneurs 1, 2 et 3, respectivement, résultent de différences dans les mesures des signaux résiduels internes et externes durant la simulation.

Ce système de détection, conçu à partir des signaux résiduels internes, détecte précisément ces défauts en générant des signaux résiduels appropriés. Les signaux résiduels externes sont ensuite utilisés pour localiser et classifier les défauts correspondants.

Défauts de capteur au niveau du système d'orientation de la palissade : un défaut de valeur fixe de -3 degrés a été constaté dans le capteur β1.m1 durant l'intervalle de temps [100 s : 200 s] (voir figure III.12). Les figures III.15 et III.17 illustrent l'effet de ce défaut sur le signal résiduel interne « a » et le signal résiduel externe « f », qui dépassent tous deux le seuil de détection, tandis que les signaux « b », « c » et « d » restent inférieurs à ce seuil. Par conséquent, dans ce cas, le critère de défaut f(β1.m1) est satisfait pendant cette période, comme illustré sur la figure III.16.

Le second défaut simulé est de type facteur de gain et survient au niveau du capteur β2.m2 durant l'intervalle de temps [2500 s : 2600 s], comme illustré sur la figure III.13. Les signaux résiduels internes « b » et externe « e » sont affectés durant cette période, dépassant tous deux le seuil imposé. Cependant, les signaux « a », « c » et « d » restent inférieurs au seuil, comme le montrent les figures 15 et 17. Lorsque cet état logique correspond au critère f(β2.m2), une alarme de défaut temporisée (temps de temporisation TD=20ms) est déclenchée après l'apparition du défaut.

Une valeur constante de 7° est enregistrée par le capteur β3.m1 durant l'intervalle de temps [900 s : 1000 s], comme illustré sur la figure III.14.

Les figures III.15 et III.17 montrent que les signaux résiduels internes « c » et externes « e » sont dépassés suite à ce défaut. En revanche, les signaux « a »,

« b » et « f » restent inchangés. Le capteur f (β3.m1) est donc défectueux après TD = 0,02 s, comme illustré sur la figure 18.

Défauts d'action au niveau du système d'orientation des pales

En se référant à la figure III.20, les défauts des deuxièmes et troisièmes actionneurs du système de variation d'angle d'inclinaison des pales {β2, β3} entraînent :

Une chute de pression hydraulique se produit dans le deuxième actionneur (β2) durant l'intervalle de temps [3200 s : 3300 s]. La réponse de l'actionneur résulte de cette variation dynamique. Les valeurs résiduelles externes « d » et « e » peuvent représenter les différences résultantes dépassant le seuil établi. En effet, comme illustré sur la figure III.20, le critère pertinent pour la défaillance de l'opérateur f(β2) a été vérifié par l'état logique résultant et une durée de temporisation de l'ordre de TD = 30ms.

Ces écarts entre les mesures ont été détectés suite à leur propagation par les signaux résiduels externes « e » et « f ». Le système de diagnostic a identifié cette condition selon le critère f(β3).

Conclusion

Dans ce chapitre, une structure de diagnostic appliquée au système d'orientation des pales d'une turbine éolienne a été développée et évaluée à travers plusieurs scénarios de défauts affectant les capteurs et les actionneurs. L'approche proposée repose sur la génération de signaux résiduels internes destinés à la détection des anomalies, ainsi que sur l'utilisation de signaux résiduels externes pour la localisation et la classification des défauts détectés.

Les résultats obtenus montrent que les défauts introduits au niveau des capteurs β1.m1, β2.m2 et β3.m1 ont été correctement détectés grâce aux variations observées dans les signaux résiduels correspondants. Les critères logiques établis ont permis d'identifier avec précision chaque défaut et de déclencher les alarmes appropriées dans des temps de détection très courts. De même, les défauts affectant les actionneurs β2 et β3, simulés respectivement par une chute de pression hydraulique et une augmentation de la teneur en air, ont été efficacement localisés à partir des signaux résiduels externes générés.

L'analyse des différents scénarios confirme que la structure de diagnostic proposée est capable de distinguer les conditions de fonctionnement normales des situations dégradées associées aux défauts étudiés. Les temps de détection obtenus démontrent également la rapidité et l'efficacité de l'approche mise en œuvre pour la surveillance du système d'orientation des pales.

En conclusion, les résultats de simulation valident la pertinence de la méthode proposée et montrent sa capacité à assurer une détection fiable des défauts des capteurs et des actionneurs du système d'orientation des pales. Cette approche constitue ainsi un outil efficace pour améliorer la surveillance, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement des turbines éoliennes**.**

General Conclusion

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et à la détection des défauts dans les turbines éoliennes, avec un intérêt particulier porté au système d'orientation des pales (Pitch System), qui joue un rôle essentiel dans la régulation de la puissance produite et dans la protection de l'éolienne contre les contraintes mécaniques excessives.

Dans un premier temps, nous avons présenté les notions générales relatives aux turbines éoliennes, leurs principaux composants, les différents types de génératrices utilisées ainsi que les concepts fondamentaux liés à la surveillance et au diagnostic des systèmes industriels. Cette étude bibliographique a permis de mieux comprendre les enjeux de la fiabilité et de la maintenance des systèmes éoliens.

Ensuite, un modèle de simulation de référence d'une turbine éolienne a été étudié afin de reproduire le comportement du système aussi bien en fonctionnement normal qu'en présence de défauts. Les différents scénarios simulés ont permis d'analyser l'influence des défauts sur les performances du système et de disposer d'un environnement adapté à l'évaluation des méthodes de diagnostic.

Enfin, une approche de détection des défauts appliquée au système d'orientation des pales a été développée. Les différentes étapes de calcul et de traitement des signaux ont permis de distinguer les situations normales des situations dégradées associées aux défauts étudiés. Les résultats obtenus montrent que la structure proposée est capable de détecter efficacement les anomalies et constitue un outil intéressant pour améliorer la surveillance et la sûreté de fonctionnement des turbines éoliennes.

Malgré les résultats encourageants obtenus, plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour améliorer et poursuivre ce travail :

- Étendre l'étude à d'autres sous-systèmes de la turbine éolienne.
- Développer des méthodes de localisation et d'identification de la gravité des défauts en complément de leur détection.
- Comparer les performances de différentes techniques d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones, les systèmes neuro-flous ou les méthodes d'apprentissage profond.
- Valider l'approche proposée à partir de données expérimentales réelles provenant de turbines éoliennes en exploitation.
- Mettre en œuvre le système de diagnostic en temps réel pour une application industrielle.

En conclusion, ce travail constitue une contribution à l'amélioration de la surveillance des turbines éoliennes et ouvre la voie à de nouvelles recherches visant à renforcer leur fiabilité, leur disponibilité et leur rendement énergétique.

Liste des abréviations

AC / DC	Courant alternatif / courant continu
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
FDI	Détection et isolation de défauts
v_w	La vitesse du vent sur les pales de turbine
P_w	La puissance du vent traversant le cercle balayé par le rotor
P	La densité de l'air
πR	Le cercle balaie par les pales du rotor
β	L'angle des pales
$C_p(\lambda, \beta)$	Le coefficient de puissance
P_a	La puissance captée par le rotor
β_r	Référence de commande d'angle d'orientation des pales
β_x	Position angulaire réelle de la $X^{ème}$ pale
$\beta_{x.my}$	Position angulaire de la $X^{ème}$ pale mesurée par le $Y^{ème}$ capteur
ξ	Facteur d'amortissement de fonction d'un actionneur d'orientation de pale
ω_n	Pulsation propre de fonction d'un actionneur d'orientation d'une pale
TD	Temps de détection
$\{A1, A2\}$	Classes de défaut de capteur
$\{B3, B4\}$	Classes de défaut d'actionneur
$\{a, b, c, d, e, f\}$	Les résidus générés

Références

[1] F. D. Bianchi, Wind Turbine Control Systems, Springer, 2007.

[2] R. Isermann, Fault-Diagnosis Systems, Springer, 2006.

[3] T. Burton, Wind Energy Handbook, Chichester: Wiley, 2011.

[4] E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Berlin: Springer, 2013.

[5] T. J. N. S. D. B. E. Burton, Wind Energy Handbook, Chichester: 2011., Wiley.

[6] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, Chichester: Wiley, 2005.

[7] L. Zhang, Wind Energy Development History and Current Status, The University of Leeds, Leeds, UK: World Scientific Publishing Company, 2021.

[8] F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne),» Alger, 2007.

[9] Schumi6, «TPE Énergies renouvelables,» [En ligne]. Available: http://schumi6.free.fr/TPE_Energie_renouvelables.htm.

[10] S. Bourdim, «Contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens,» Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna, 2015.

[11] A. (. A. d. P. d. l'Investissement), «Secteur des Energies Nouvelles et Energies Renouvelables,» AAPI, 2026. [En ligne]. Available: https://aapi.dz/secteur-des-energies-nouvelles-et-energies-renouvelables/.

[12] J. Blesa, D. Rotondo, V. Puig et F. Nejjari, «FDI and FTC of wind turbines using the interval observer approach and virtual actuators/sensors,» *Control Engineering Practice,* vol. 24, p. 138–155, 2014.

[13] B. Beltran, «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur,» Université de Bretagne occidentale, Brest, 2010.

[14] H. Belghitri, «Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque,» Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2011.

[15] S. Chikha, «Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d'énergie éolienne,» Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2017.

[16] O. Ozdemir, P. Seiler et G. J. Balas, «Wind turbine fault detection using counter-based residual thresholding,» chez *Proceedings of the IFAC World Congress*, 2011.

[17] A. Saci, L. Cherroun, O. Mansour et A. Hafaifa, «Modeling and Control of a Wind Turbine System based on Double Fed Induction Generator Controlled by Rotor Side Converter with an Excitation,» chez *First International Conference on Materials, Environment, Mechanical and Industrial Systems (ICMEMIS'19)*, Djelfa, 2019.

[18] A. Gonzalo, Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications, New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 2013.

[19] N. Nasr et N. Moubayed, «Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical,» *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy,* vol. 7, pp. 145-157, 2011.

[20] H. Abu-Rub, M. Malinowski et K. Al-Haddad, Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, Chichester: Wiley-IEEE Press, 2014.

[21] A. Boyette, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,» Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[22] Z. Gao et X. Liu, «An overview on fault diagnosis, prognosis and resilient control for wind turbine systems,» *Processes,* vol. 9, p. 300, 2021.

[23] T. Ghennam, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation,» École Centrale de Lille, Cité Scientifique, 2011.

[24] O. Özkan, «Wind Turbine Size Growth DrivingNeed,» Athena Mobility Project, 2022. [En ligne]. Available: https://www.athena-mobility.org/media/docs/libraries/grid/session9-2-ozkhan.pdf?sfvrsn=6206dc95_1.

[25] P. J. C. R. J. Schubel, «Wind turbine blade design.,» 2012.

[26] A. R. e. a. Nejad, Drivetrain load effects in a 5-MW bottom-fixed wind turbine under blade-pitch fault condition and emergency shutdown., Bristol: IOP Publishing, 2016.

[27] J. P. e. a. Salameh, Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review., Amsterdam: Elsevier, 2018.

[28] M. C. P. Manolesos, Wind tunnel study of a generic wind turbine nacelle model., New York: ASME, 2017.

[29] S. N. Vukosavic, Grid Side Converters Control and Design, Springer International Publishing, 2018.

[30] B. Nait Slimani, «Synthèse d'observateurs non linéaire : Application au diagnostic de défauts,» Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.

[31] C. Chakour, «Diagnostic et surveillance des procédés industriels et de leur environnement sur la base de l'analyse de données,» Université Badji Mokhtar Annaba, Annaba, 2015.

[32] M. A. Rouidjali et A. Chaimi, «Détection des défauts basés sur l'Analyse en Composantes Principales Application à un Four électrique, à un Groupe électrogène et à une Chaudière,» Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 2017.

[33] N. Bessous, «Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones,» Université Mentouri, Constantine, 2008.

[34] N. Laouti, S. Othman, M. Alamir et N. S. Othman, «Combination of model-based observer and support vector machines for fault detection of wind turbines,» *International Journal of Automation and Computing,* vol. 11, p. 274–287, 2014.

[35] N. Hadroug, «Commande Neuro-Floue Tolérantes aux Défauts D'une Turbine à Gaz Contribution à la Détection De Vibration,» Université de Djelfa, Djelfa, 2016.

[36] S. El Aimani, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,» chez *10th European Conference on Power Electronics and Application*, Toulouse, 2003.

[37] S. el Aimani, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,» Université des Sciences et Technologies, Lille, 2004.

[38] P. F. Odgaard et K. E. Johnson, «Wind turbine fault detection and fault tolerant control: An enhanced benchmark challenge,» chez *Proceedings of the American Control Conference*, Washington, DC, 2013.

[39] H. C. Ben Djoudi, A. Hafaifa, D. Djoudi et M. Guemana, «Fault tolerant control of wind turbine via identified fuzzy models prototypes,» *Diagnostyka,* vol. 21, n° %13, p. 3–13, 2020.

[40] N. Bounar, S. Labdai, A. Boulkroune, M. Farza et M. Msaad, «Adaptive fuzzy control scheme for variable speed wind turbines based on a doubly fed induction generator,» *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering,* vol. 44, n° %15, p. 629–641, 2020.

[41] P. Schubel, R. Crossley, E. Boateng et J. Hutchinson, «Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades,» *Renewable Energy,* vol. 51, p. 113–123, 2013.

[42] U. Giger, P. Kühne et H. Schulte, «Fault tolerant and optimal control of wind turbines with distributed high-speed generators,» *Energies,* vol. 10, n° %12, p. 149, 2017.

[43] Z. (. Civelek, «Optimization of Fuzzy Logic Blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm,» *Engineering Science and Technology, an International Journal,* vol. 23, n° %11, p. 1–9, 2020.

[44] F. J. Ramahaleomiarantsoa, «Diagnostic des systèmes a énergies renouvelables de type éolien,» Université de Corse-Pascal Paoli, Corte, 2013.

[45] P. F. Odgaard et J. Stoustrup, «A benchmark evaluation of fault tolerant wind turbine control concepts,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 23, n° %13, p. 1221–1228, 2015.

[46] P. Odgaard, J. Stoustrup et M. Kinnaert, «Fault-tolerant control of wind turbines: a benchmark model,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 21, n° %14, p. 1168–1182, 2013.

[47] A. Saci, L. Cherroun, A. Hafaifa et O. Mansour, «Effective fault diagnosis method for the pitch system, the drive train, and the generator with converter in a wind turbine system,» *Electrical Engineering,* 2022.

[48] B. Meunier, La logique floue et ses applications, Paris: Addison-Wesley France, 1995.

[49] J.-S. R. Jang et C.-T. Sun, «Neuro-fuzzy modeling and control,» *Proceedings of the IEEE,* vol. 83, n° %13, p. 387–406, 1995.

[50] H. (. Bühler, Le réglage par logique floue, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.

[51] A. Saci, L. Cherroun, O. Mansour et A. Hafaifa, «Effective Fault Diagnosis Method for the Pitch System of a Wind Turbine,» chez *The First International Conference on Renewable Energy Advanced Technologies and Applications (ICREATA'21)*, Adrar, 2021.