

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

Université Amar Thelidji- Laghouat



FACULTE: DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Réalisé par

Haouari Khawla

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Système embarqué

Thème

**Étude du comportement d'un système éolien en
présence de défauts multiples pour une
surveillance conditionnelle**

Jury de soutenance :

| Nom et Prénom | Grade | Qualité |
|------------------------|--------------|----------------|
| Mr :DJEKEIDL Rabah | prof | Président |
| Mr : AMEUR Aissa | prof | Examineur |
| Mr : KIOUS Mechri | Prof | Encadreur |
| Mr : SAOUAL Abdellatif | Doctorant | Co-encadreur |

Promotion : 2021/2022

Remerciement

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience

Tout au long de ma carrière universitaire et en atteignant cet endroit.

On tient à remercier nos encadreurs *Mr: KIOUS Mechri et Mr:*

SAOUAL Abdellatif de l'université d'Amar Thelidji de Laghouat

d'avoir accepté de diriger ce mémoire et pour les efforts qui n'ont jamais

cessé à nous offrir à organiser ce mémoire de fin d'étude.

Je tiens à remercier le président de jury, Mr: Djekidel Rabah, professeur à l'université de Laghouat qui a bien voulu me faire l'honneur de présider ce jury. Il trouve ici l'expression de ma plus grande reconnaissance et mon profond respect.

Je tiens également à exprimer ma toute gratitude et mes respectueux remerciements au membre du jury, Mr : Ameer Aissa, professeur à l'université de Laghouat, de m'avoir fait l'honneur de juger ce modeste travail en qualité d'examineur. Merci énormément.

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants de notre département d'électronique et collègues de la promotion 2022 qui ont assisté ma formation.

Dédicace

A ma mère, mon amour, à ton âme pure, je suis là grâce à toi, mon ange

A mon cher papa, tu as toujours été pour moi un soutien et un encouragement

À mes sœurs bien-aimées Rachda et Yousra

A mes frères Madani et Abdel Fattah et Abdel Alim

**Merci à tous, il n'y a pas de mots pour décrire mon amour
pour vous. Je vous aime tous.**

khawla

SOMMAIRE

Page

Remerciement

dédicace

Introduction générale 01

Chapitre I

Généralité sur le système éolienne

1-Introduction 03

2. Capacité mondiale des éoliennes 04

3-Capacité des éoliennes en Algérie 04

4-généralité sur les éoliennes 06

4-1-Définition de l'énergie éolienne 06

4-2-Le principe de fonctionnement d'éolienne 06

4.3. Types des éoliennes 07

4.4. Principaux composants d'une éolienne 08

Conclusion 10

Chapitre II

Les différents défauts dans le système éolien

1. Introduction 12

2. Les défauts des pales..... 13

3. L'aérodynamique des éoliennes 14

4.Défauts de la boîte à vitesse(Multiplicateur) 15

5.Les défauts dans le système d'orientation 16

6. Les défauts dans le contrôle électrique 16

7. Les défauts du réseau 17

8. Défauts capteurs 17

9. Défauts dans les génératrices électriques 17

10. Cause des défauts 18

11. Défauts affectant le stator 19

12. Défauts affectant le rotor 20

13. Rotor à cage d'écureuil 20

14. Défaillance de rupture d'anneau de la cage rotorique 20

15. Défaut de roulements 20

16. Défauts d'excentricités 21

| | |
|-----------------|----|
| Conclusion..... | 22 |
|-----------------|----|

Chapitre III

Modélisation de système éolienne

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 24 |
| 2. Modélisation aérodynamique | 24 |
| 3. Modélisation de la partie mécanique | 29 |
| 4. Modèle du multiplicateur | 29 |
| 5. Modèle de l'arbre mécanique | 30 |
| 6. Modélisation et commande de la GADA (MADA) | 32 |
| 6.1. Structure de la GADA (MADA) | 32 |
| 6.2. Principe de fonctionnement | 35 |
| 6.3. Modes de fonctionnement de la MADA | 36 |
| 6.4. La transformation de Park | 41 |
| Conclusion | 47 |

Chapitre IV

Résultat et simulation du système éolien

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 49 |
| 2. Bloc Turbine | 49 |
| 2.2. Les paramètres initiaux de la turbine | 49 |
| 2.3. Déclaration des sous blocs de fonction de la turbine | 49 |
| 2.4. Sous bloc multiplicateur | 52 |
| 2.5. Sous bloc 'arbre' | 52 |
| 2.6. Bloc général de la turbine | 53 |
| 3. simulation du bloc Génératrice | 54 |
| 4. Comportement du système éolien en présence de défauts | 56 |
| 4.1. Défaut mécanique | 56 |
| Conclusion | 59 |
| Conclusion générale | 61 |
| Référence | 63 |

LISTE FIGURES

Page

Chapitre I : Généralité sur le système éolienne

| | |
|--|----|
| Figure 1.1: Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes..... | 04 |
| Figure 1.2: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)..... | 05 |
| Figure 1.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent..... | 06 |
| Figure 1.4 : Éolienne à axe horizontal..... | 07 |
| Figure 1.5 : Eoliennes à axe vertical..... | 08 |
| Figure 1.6 : Eléments constituant une éolienne..... | 08 |
| Figure 1.7 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne..... | 09 |
| Figure 1.8 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine..... | 10 |

Chapitre II : Les différents défauts dans le système éolien

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Taux de défaillance des composants des éoliennes..... | 12 |
| Figure 2.2: Nombre de défaillances en fonction de l'année d'opération..... | 13 |
| Figure 2.3: Une pale sévèrement endommagée au parc éolien à Plouarzel..... | 14 |
| Figure 2.4 : Vitesses exercées sur le profil d'une éolienne..... | 15 |
| Figure 2.5 : Structure de contrôle d'une machine asynchrone avec capteur..... | 17 |
| Figure 2.6 : La distribution des défauts dans les machines électriques..... | 18 |
| Figure 2.7: Système éolien à vitesse variable structure à base d'une machine asynchrone double alimentation..... | 19 |
| Figure 2.8 : Représentation des différents défauts statoriques possibles..... | 19 |
| Figure 2.9: Différents types d'excentricités | 21 |

Chapitre III : Modélisation de système éolienne

| | |
|--|----|
| Figure 3.1 : Schéma de la turbine éolienne..... | 24 |
| Figure 3.3 : Les courbes des coefficients de puissance selon le type de machine et selon leur coefficient de vitesse spécifique λ | 26 |
| Figure 3.4 : Les courbes des coefficients de puissance selon l'angle de calage des pales β et selon le facteur de vitesse spécifique λ | 26 |
| Figure 3.5 : Schéma bloc de la partie aérodynamique..... | 29 |
| Figure 3.6 : Modèle du multiplicateur..... | 30 |
| Figure 3.7 : Schéma bloc du multiplicateur..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Figure3. 8 : Modèle de la partie mécanique de l'éolienne..... | 31 |
| Figure3. 9 : Schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne..... | 32 |
| Figure3. 10 : Schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne..... | 32 |
| Figure3. 11 : Schéma descriptif d'une génératrice..... | 33 |
| Figure3. 12 : Structure scherbius avec convertisseur MLI | 34 |
| Figure3. 13 : Les quartes modes de fonctionnement de la MADA..... | 37 |
| Figure 3.14 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [Caron 1995]..... | 38 |
| Figure3. 15 : Passage du système triphasé au biphasé (abc vers uv)..... | 42 |
| Figure3. 16 : Le modèle généralisé de la GADA selon les axes (u, v)..... | 43 |
| Figure3. 17 : Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé..... | 44 |

Chapitre IV : Résultat et simulation du système éolien

| | |
|--|----|
| Figure 4.1 : Bloc pour le profil du vent variable..... | 49 |
| Figure 4.2 : l'angle de calage β | 50 |
| Figure .4.3: Paramètre de rapidité (la vitesse spécifique) λ | 50 |
| Figure 4.4: Coefficient de puissance (coefficient de performance) C_p | 50 |
| Figure4.5 : ce model Simulink de C_p est présenté par varie la valeur de β ;2.5.10. | 51 |
| Figure 4.6: Résultat de simulation de variation la C_p en fonction de beta..... | 51 |
| Figure 4.7 : Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne C_t | 52 |
| Figure. 4.8 : couple issu multiplicateur..... | 52 |
| Figure 4.9 : bloc des perturbations..... | 52 |
| Figure 4.10 : bloc général de la turbine..... | 53 |
| Figure 4.11: Bloc de la génératrice | 54 |
| Figure4.12 : bloc générale de la Génératrice..... | 55 |
| Figure 4.13: Bloc de commande..... | 55 |
| Figure 4.14: Schéma Global du système éolien | 56 |
| Figure 4.15: évolution de la puissance en présence de défauts aux pales (β)..... | 57 |
| Figure 4.16 : évolution de la puissance en présence de défauts au multiplicateur (G)..... | 58 |
| Figure 4.17 : évolution de la puissance en présence de défauts au roulement (frottement f)..... | 59 |

LISTE TABLEAUX

Page

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Différentes formules numériques du coefficient C_p | 28 |
|--|----|

Les Symboles :

AC : Courant alternative

DC : Courant Continue

CV : Commande Vectorielle

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

GADA : Générateur asynchrone à double alimentation

P : Constante de Laplace

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain integral

[X]_{sabc} : Grandeurs statorique

[X]_{rabc} : Grandeurs rotorique

[X]_{dq} : Grandeurs dans le repère Park

$[\psi_{ds} \ \psi_{qs} \ \psi_{dr} \ \psi_{qr}]$: flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park.

$[i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]$: Courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park

$[v_{ds} \ v_{qs} \ v_{dr} \ v_{qr}]$: tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park

$[\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]$: flux statoriques dans le repère triphasé

$[\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}]$: flux rotoriques dans le repère triphasé

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]$: Courants statoriques dans le repère triphasé

$[i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]$: Courants rotoriques dans le repère triphasé

T_s : Constante de temps statorique

R_s : Résistance d'un phase statorique

R_r : Résistance d'un phase rotorique

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

M_{sr} : La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique

$L_{s\ \text{cyclique}}$: Inductance cyclique statorique

$L_{r\ \text{cyclique}}$: Inductance cyclique rotorique

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celle du rotor

L_{os} : Inductance homopolaire statorique

L_{or} : Inductance homopolaire rotorique
 G : Glissement
 P : nombre de paires de pôles
 ω_s : Pulsation statorique
 ω_r : Pulsation rotorique
 ω_m : Pulsation mécanique
 θ_s : Angle de stator
 θ_r : Angle de rotor
 C_e : Couple électromagnétique
 C_r : Couple résistant
 J : Moment d'inertie
 F : Coefficient de frottement
 T_r : Constant de temps rotorique
 P_s : Puissance active statorique
 C_p : Le coefficient de puissance
 β : L'angle de calage des pâles
 R : Le rayon des pales
 P : Nombre des pâles
 λ : La vitesse spécifique de l'éolienne ou ratio de vitesse

ملخص

الملخص:

تعتبر الرياح مصدر نظيف يستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية ، يتم استخلاص طاقة الرياح هذه من الطاقة الحركية للرياح باستخدام توربينات الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية ، وهي تستخدم على نطاق واسع كبديل للوقود الأحفوري ، وهي مجدية في المناطق الريفية بسبب لمساحات كبيرة وقلّة المباني. تتيح مراقبة تشغيل محطة طاقة الرياح الإبلاغ عن الأعطال مبكرًا والتدخل فورًا قبل حدوث أي أعطال تهدد استقرار نظام طاقة الرياح. الهدف من هذا العمل هو الدراسة عن طريق محاكاة أعطال مولد توربين الرياح ، بناءً على نمذجة خطأ غريب الأطوار في مولد غير متزامن مزدوج التغذية تحت بيئة ماتلاب MatLab Simulink.

Abstract

Wind is a clean source that is used to generate electrical energy, this wind energy is extracted from the kinetic energy of wind using wind turbines to generate electrical energy, it is widely used as an alternative to fossil fuels, it is feasible in rural areas due to large areas and lack of buildings. Monitoring the operation of a wind power plant makes it possible to report malfunctions early and to intervene immediately before any failures threatening the stability of the wind power system occur.

The objective of this work is the study by simulation of the faults of the generator of a wind turbine, based on a modeling of an eccentricity fault in a double-fed asynchronous generator under the MatLab Simulink environment.

Résumé

Le vent est une source propre qui est utilisée pour produire de l'énergie électrique, cette énergie éolienne est extraite de l'énergie cinétique du vent en utilisant des éoliennes pour produire de l'énergie électrique, elle est largement utilisée comme alternative aux combustibles fossiles, elle est faisable dans les zones rurales en raison des grandes surfaces et du manque de bâtiments. Le suivi de fonctionnement d'une installation éolienne permet de signaler les dysfonctionnements d'une manière précoce et d'intervenir immédiatement avant qu'ils ne surviennent pas des défaillances menaçant la stabilité du système éolien.

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation des défauts de la génératrice d'une chaîne éolienne, en basant sur une modélisation d'un défaut d'excentricité dans une génératrice asynchrone à double alimentation sous l'environnement MatLab Simulink.

Introduction générale

Introduction générale :

Face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21ème siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables. L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies. Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus, par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements climatiques, L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Sur le fleuve du Nil, cette énergie a été utilisée pour faire avancer les bateaux à voile, en Chine comme au Moyen-Orient pour le pompage d'eau et l'irrigation, en Iran et en Afghanistan dans le broyage des céréales , Les aérogénérateurs sont des sources de production non polluantes, c'est un alternatif des sources fossiles qui sont forcément nocives à notre environnement. Plusieurs pays produisent une grande partie de l'énergie électrique à travers les éoliennes. Actuellement l'énergie éolienne est devenue la plus grande énergie développante en terme de production dans le monde entier pour une production qui dépasse 120GW [1]. Dans une ferme éolienne la surveillance de ces grands dispositifs est obligatoirement relative à leurs complexités ainsi que le cout de maintenance élevé, le diagnostic des défauts et l'un des outils qui (garantie) et évite les pannes des éoliennes. Outre la plupart des dysfonctionnement qui mène à un arrêt complet ou détérioration atteint beaucoup plus le système des pales

J'essaie jusqu'à la fin du projet d'étude d'étudier l'effet des défauts sur les performances des éoliennes, y compris les défauts mécaniques. Cette thèse est organisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente les généralités des éoliennes.

Le deuxième chapitre présente un cas de l'art des pannes dans les éoliennes.

On essaye dans le troisième chapitre de modéliser tous les blocs du système éolien en mettant l'accent sur les paramètres indicateurs de défauts ou dysfonctionnement.

Dans le dernier chapitre on exploite les performances de MATLAB-SIMULINK à mettre en évidence l'influence de défauts sur le rendement du système éolien.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

Chapitre I

Généralité sur le système éolien

I-1 Introduction :

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir. Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres sans danger.

Face à la flambée des prix pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21^{ème} siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables.

L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies.

Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements.

I-2 Capacité mondiale des éoliennes :

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde. Voir tableau 1.1 qui représente l'évolution de la capacité mondiale de production d'énergie éolienne de 1997 ~2015. C'est le secteur électrique dynamisé qui enregistre la croissance la plus forte augmentation en termes de capacité. Des installations record d'énergie éolienne dans le monde ont été effectuées en 2015. Bien devant les installations photovoltaïques et les centrales à charbon les installations d'énergie éolienne constituent près de 44,2% du total des nouvelles capacités électriques installées dans l'Union électrique. Fin 2015, l'énergie éolienne installée constitue près de 432.4 GW plus de 63.0 GW par rapport à l'année 2014. Avec en tête la Chine 33.6%, États-Unis 17,2% et 10,4% en Allemagne. En 2019 (voir figure 1.1), le parc éolien mondial a produit 1 390 TWh selon le GWEC (Global Wind Energy Council). La part de la filière dans la production mondiale d'électricité aurait atteint 5,3% en 2019 d'après les dernières données du BP (Statistical Review of World Energy).

Près de 60,4 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées dans le monde en 2019 (soit 19% de plus qu'en 2018), portant la puissance installée du parc éolien mondial à 651 GW à fin 2019. Les facteurs de charge moyens des parcs éoliens au niveau mondial sont estimés par le GWEC à 23% pour les installations terrestres et à 40% pour celles implantées en mer. [4]

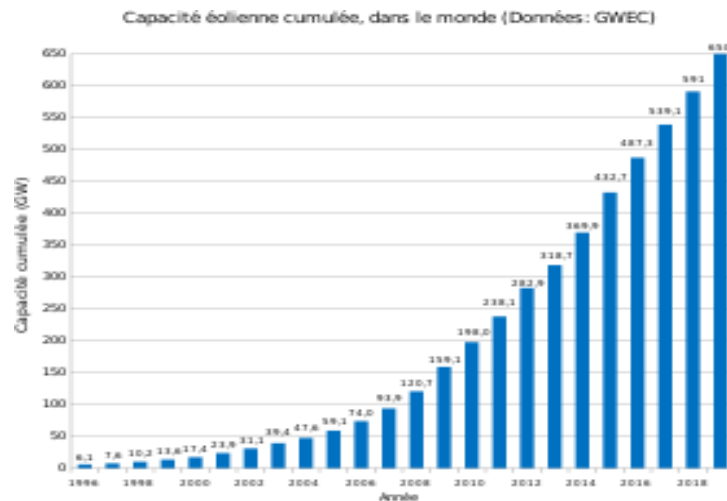


Figure 1.1: Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.

I-3-Capacité des éoliennes en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur français Andreau. Ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Electricité et Gaz d'Algérie. La deuxième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fut en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 mètres avec une hauteur du mât de 55 m [5]. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables.

Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée 5010 MW pour la période 2015- 2020, il est programmé de réaliser 1GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux fermes éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre de 20MW à Khenchela.

Le nouvel Atlas éolien de l'ONM (l'office national de météorologie) a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar,

Les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un important potentiel.

Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia [6] qui a réactualisé la carte des vents à 10m (voir figure 1.2)

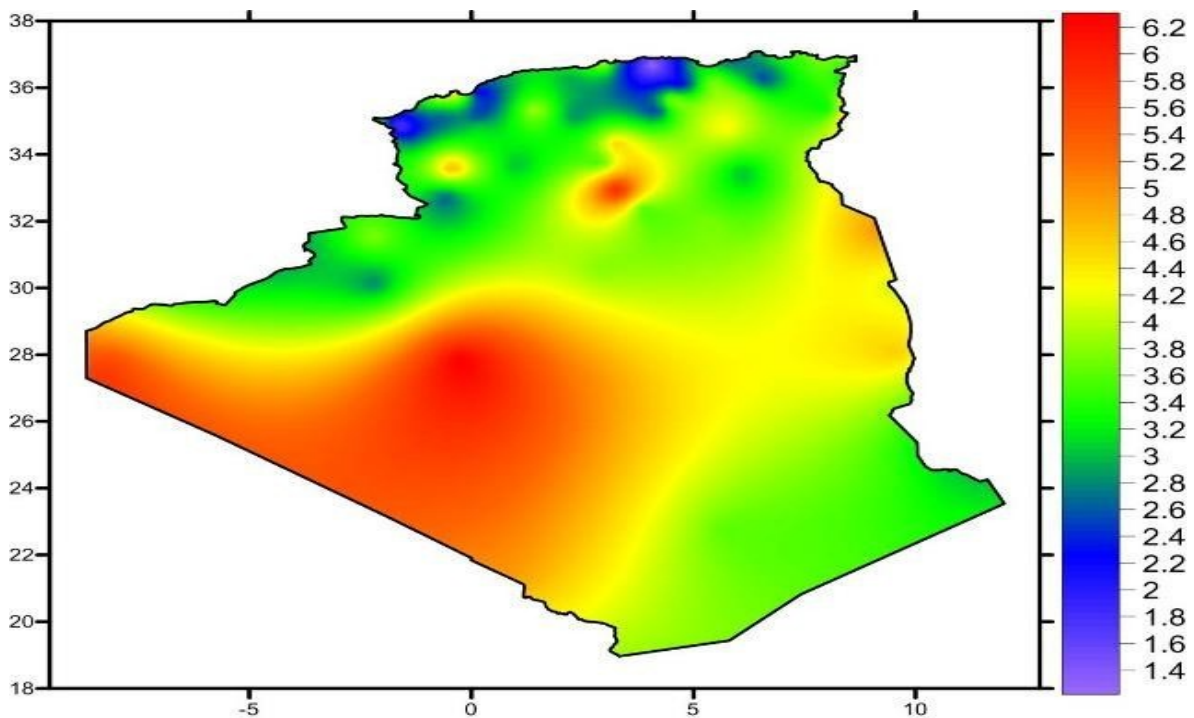


Figure 1.2: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

I-4-Généralité sur les éoliennes :

I-4-1-Définition de l'énergie éolienne :

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. Conversion de l'énergie cinétique du vent [7]

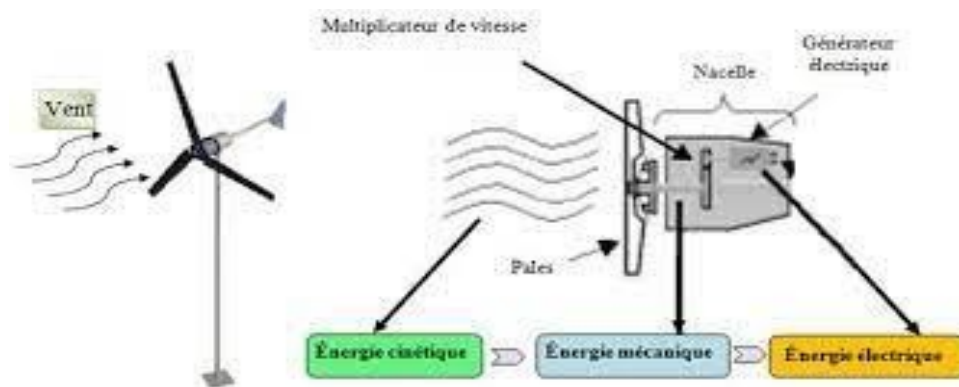


Figure 1.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences

I-4-2-Le principe de fonctionnement d'éolienne :

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique, le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. À son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique

I-4.3. Types des éoliennes :

On distingue deux grands types d'éoliennes :

- ✓ Les éoliennes à axe vertical.
- ✓ Les éoliennes à axe horizontal.

I-4.3.1. L'éolienne horizontale :

L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, est situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important. [8]

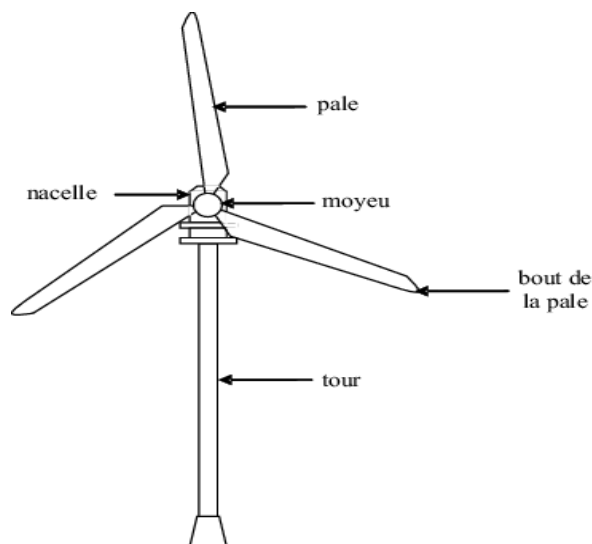


Figure 1.4 : Éolienne à axe horizontal.

I-4.3.2. L'éolienne verticale :

Les pales de l'éolienne verticale tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments. Elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale. [9]



Figure 1.5 : Eoliennes à axe vertical.

I-4.4. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est constituée de trois parties principales.

- Le rotor avec les pales, c'est la zone qui captera l'énergie cinétique du vent et la transformera en énergie mécanique.
- La nacelle, c'est la partie où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Il y a aussi dans la nacelle des systèmes de contrôle et de frein dans le cas où le vent serait trop fort.
- Le mât et les fondations, qui supportent la nacelle et le rotor, ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes qu'il peut y avoir. Le mât est plus ou moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent qui cherche à être récupérée). [10]

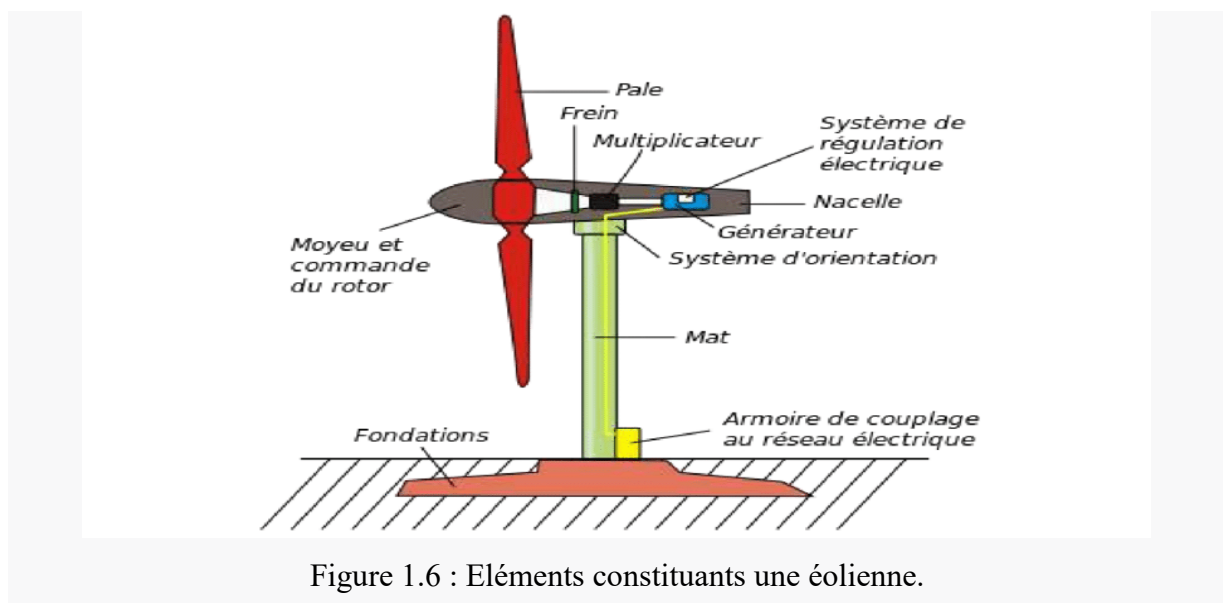


Figure 1.6 : Eléments constituant une éolienne.

I-4.4.1. Conversion de l'énergie éolienne:

.Loi de betz :

La **limite de betz** est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 (environ 60 %) de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. [11]

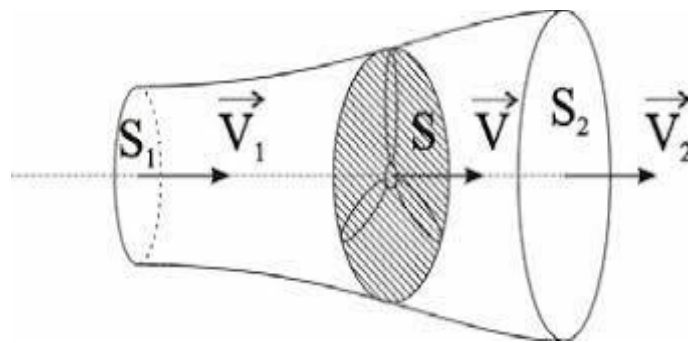


Figure 1.7 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Dans la Figure (1.7) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \tag{I.1}$$

Énergie cinétique :

l'énergie cinétique c'est une énergie de la masse d'air en déplacement :

$$E_c = 1/2 \cdot m \cdot V^2 \tag{I.2}$$

m : la masse d'air

ρ : masse volumique de l'air en Kg.m⁻³

$$m = \rho \cdot V \tag{I.3}$$

La puissance absorbé :

A partir de l'énergie cinétique nous pouvons écrire :

$$E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad \text{ou} \quad m = \rho \cdot V = \rho \cdot L \cdot S \quad \text{ou} \quad L = v \cdot t \tag{I.4}$$

$$E_c = 1/2 \cdot \rho \cdot v \cdot t \cdot S \cdot v^2 \tag{I.5}$$

la puissance est donnée par :

$$p_v = E_c / t \tag{I.6}$$

$$p_v = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (I.7)$$

Le coefficient de puissance C_p :

Cette puissance disponible P n'est pas entièrement récupérée par l'éolienne. Si on appelle P_v cette puissance incidente, et P_e la puissance extraite par l'éolienne alors on définit le coefficient de puissance C_p par :

$$C_p = p_e / p_v \quad (I.8)$$

$$P_e = C_p \cdot p_v = C_p \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (I.9)$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter l'énergie éolienne. Ce coefficient a une valeur maximale appelée limite de Betz

On démontre la valeur limite maximale de C_p , appelée la limite de Betz est $C_{pmax} = 0,59$ soit 59%. Ce coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse spécifique λ où λ est le rapport entre la vitesse linéaire périphérique en bout de pale d'hélice $R \cdot \Omega$ et la vitesse du vent v :

$$\lambda = R \cdot \Omega / v \quad (I.10)$$

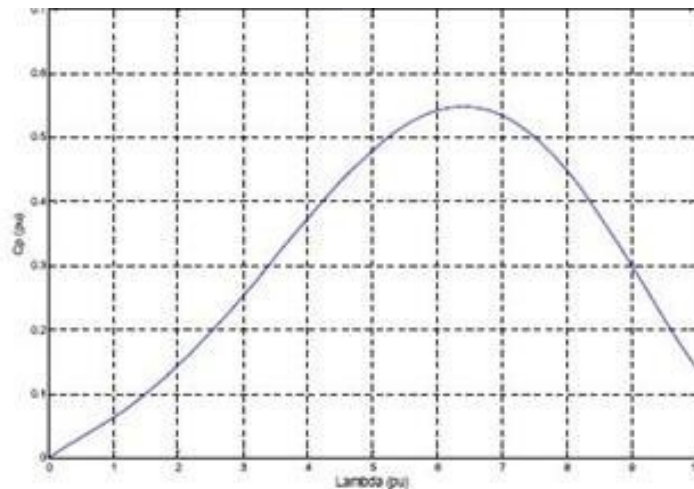


Figure 1.8: Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une notion générale sur l'énergie éolienne et les différents types d'éoliennes, le principe de fonctionnement et de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, également ce chapitre a décrit les différents types et de composants d'un système éolien, les deux grandes familles et les différentes parties d'une éolienne. Pour le chapitre suivant on va s'intéresser à l'étude des défauts du système éolien.

Chapitre II

Les différents défauts dans le système éolien

II-1 Introduction :

Les conditions de travail des éoliennes varient considérablement, Dans certains cas, diverses parties du système éolien peuvent être poussées à la limite. En conséquence, les défauts susceptibles d'affecter la turbine sont comptés Lors de l'étude des éoliennes, deux critères doivent être pris en compte, à savoir la fréquence et Le temps d'arrêt causé afin de déduire que la panne doit être traité en première Comptabilité en maintenance prédictive. Cependant, l'accès à ces statistiques Il est compréhensible que cela ne soit pas toujours autorisé par le fabricant. L'analyse des données de défaillance réelles des éoliennes montre que Les principaux composants du système éolien impliqués dans l'analyse des défaillances.

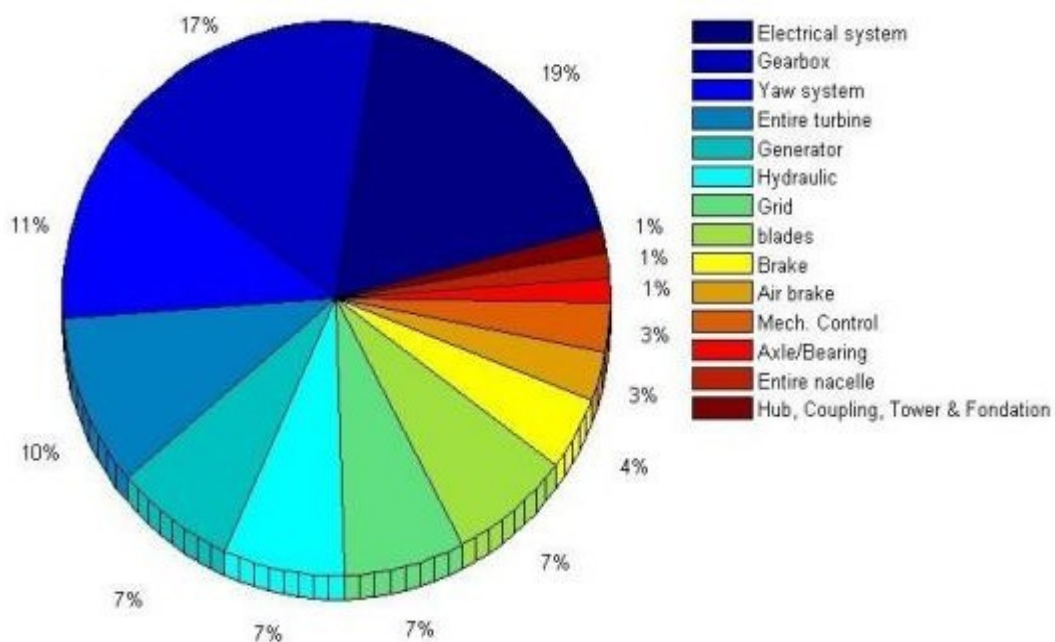


Figure 2.1 : Taux de défaillance des composants des éoliennes

Un autre facteur très important dans les statistiques des pannes d'éoliennes est le nombre de pannes en fonctionnement par an. Figure (2.2) montre le nombre d'éoliennes en service en fonction de leur durée de vie respective et du nombre de pannes enregistrées pendant 20 ans de fonctionnement. Le nombre de pannes au début du fonctionnement du système est bien inférieur au nombre de pannes après deux ans. Cela signifie que depuis la huitième année d'exploitation, le taux d'échec est resté quasiment inchangé et est tombé à 11 ans.

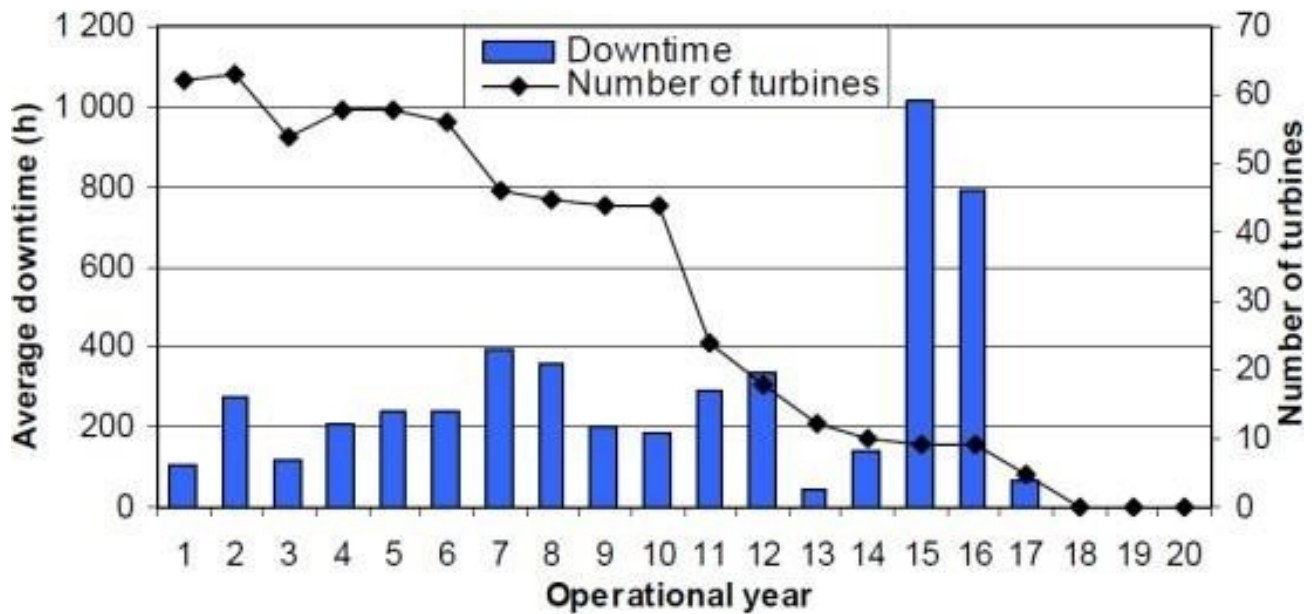


Figure 2.2: Nombre de défaillances en fonction de l'année d'opération.

II-2 Les défauts des pales:

La pale est le composant principal du rotor d'une éolienne, convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre d'entraînement. D'une part, ils sont constitués de matériaux composites. Ces matériaux composites peuvent généralement masquer des défauts subtils ou des dysfonctionnements difficiles à détecter par les méthodes traditionnelles. D'autre part, ils sont souvent exposés à des phénomènes naturels extrêmes, comme les turbulences éoliennes. Et la foudre. Celles-ci peuvent être les raisons de la défaillance du matériau de la pale d'éolienne, comme le système de sécurité par vent fort (la survitesse de la machine entraînera rapidement une contrainte excessive dans la pale et la connexion de la pale au moyeu), ce qui peut conduire à une défaillance catastrophique (détérioration, fissures, flexion), tout ou partie de la lame est perdue, Mettre en danger la vie humaine et réduire la confiance du public, ce qui peut entraver leur production. Selon les rapports, une lame cassée a été retirée de la tour sur plus de 1,3 km. [12]



Figure 2.3: Une pale sévèrement endommagée au parc éolien à Plouarzel

La plupart des éoliennes modernes sont équipées d'un système de protection contre la foudre, qui est connecté au système de contrôle et de surveillance de l'éolienne. Cependant, pour le protéger complètement des dommages Ceci n'est pas faisable. Par conséquent dans un procédé pour localiser et classer les impacts de la foudre et surveiller les lames à l'aide d'un réseau de capteurs de courant à fibre optique est proposé.

II-3 L'aérodynamique des éoliennes :

Considérons le profil d'une pale d'éolienne obtenu en "coupant" l'aile à une certaine hauteur r entre le moyeu et l'extrémité de la pale. où la grosse flèche noire indique le sens de rotation. Si la vitesse de l'éolienne est n , alors à la hauteur du profil, la vitesse tangentielle de la pale provoquée par la rotation U . [13]

$$U = n \cdot 2 \pi \cdot r \quad (\text{II.1})$$

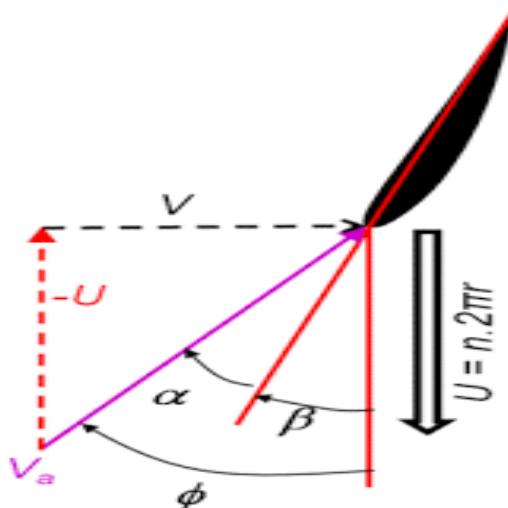


Figure 2.4 : Vitesses exercées sur le profil d'une éolienne.

Nous avons mis le repère de vitesse sur le profil de l'aile. Il faut alors combiner la vitesse de rotation de l'éolienne U à cette hauteur avec la vitesse du vent $2/3 V$ pour obtenir la vitesse relative du vent V_a rencontrée par le profil de l'éolienne. Afin de pouvoir estimer la force qui sera appliquée au profil de la pale, la vitesse doit être connue. En effet, on connaît maintenant la vitesse du courant du vent (la norme du vecteur V_a) et son incidence. Comme mentionné ci-dessus, il ne suffit pas de connaître la vitesse du vent V . La vitesse tangentielle U provoquée par la rotation affecte de manière significative le flux que recevra le contour.

II-4. Défauts de la boîte à vitesse (Multiplicateur) :

Les éoliennes fonctionnent généralement dans des conditions environnementales extrêmes, notamment la poussière, l'humidité, la température, la pression atmosphérique et les charges imprévisibles causées par des vents violents.

En conséquence, les boîtes de vitesses des éoliennes sont sensibles aux conditions de frottement sévères (telles que l'usure, la fatigue et la corrosion), ce qui entraîne des dommages aux composants et une augmentation des pannes de la machine. Selon des enquêtes sur de nombreux parcs éoliens en Europe et aux États-Unis, la boîte de vitesses est le sous-système le plus fiable responsable de l'arrêt du moteur et des coûts de maintenance. La boîte de vitesses est une pièce qui souffre de nombreuses usures dans le mécanisme de production d'énergie éolienne, telles que l'usure, les piqûres, les rayures, la corrosion, les fissures, la casse, etc.

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

frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

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

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

II-5. Les défauts dans le système d'orientation :

Le système d'orientation peut contrôler la rotation de la nacelle face au vent. Selon les rapports, des fissures dans l'arbre d'entraînement de pivotement, des dents d'engrenage cassées, des piqûres dans la bague de roulement du moyeu et une défaillance des vis de fixation du roulement sont toutes classées comme des défaillances du système de guidage. Les problèmes de gel dans des conditions météorologiques extrêmes et des niveaux de vibrations élevés en cas de surcharge sont les principales causes de pannes.

II-6. Les défauts dans le contrôle électrique :

Les pertes aux enroulements, aux transformateurs et au câblage du générateur, ainsi que les court-circuits et les surtensions des composants électroniques sont des défauts de

commande électrique courants. Ces pannes peuvent être causées par l'un des problèmes suivants: la foudre, une mauvaise installation électrique, des pannes techniques et une résonance dans le circuit résistance-capacité (RC).

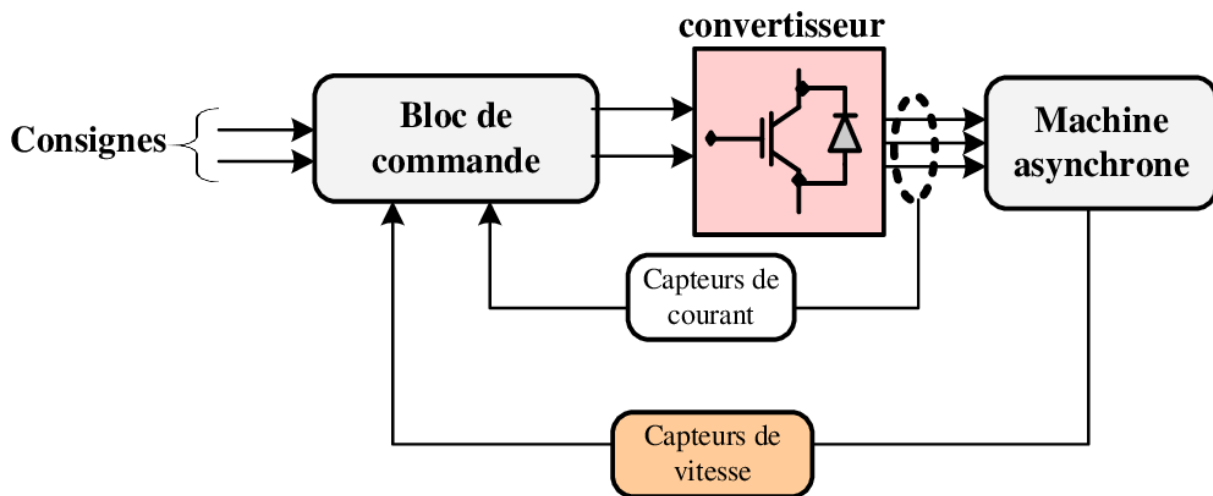


Figure 2.5 : Structure de contrôle d'une machine asynchrone avec capteur.

II-7 Les défauts du réseau :

Les changements ou la variation de la direction et de l'intensité du vent ne peuvent être prédits avec précision. Sans stockage d'énergie de secours ou autres systèmes de production d'électricité, des pannes de réseau peuvent survenir dans des conditions de forte consommation d'énergie et de faible production d'énergie éolienne. [14]

II-8 Défauts capteurs :

Un capteur est un instrument qui convertit une grandeur physique en un signal électrique qui peut être traité par un ordinateur. Le capteur est essentiellement l'interface de sortie du système Et l'environnement extérieur. Ils permettent d'échanger des informations pertinentes L'état et le comportement interne du processus. Par conséquent, un défaut de capteur caractérise une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Pour les systèmes en boucle fermée, mesurer Les signaux de ces capteurs sont utilisés pour générer des signaux de commande. et donc, La présence de pannes de capteur donnera des signaux de commande incorrects et invalides. [15]

II-9 Défauts dans les génératrices électriques :

Les progrès de l'ingénierie et de la science des matériaux ont conduit le développement des machines Il devient plus léger et a une durée de vie assez longue. Cependant, malgré les améliorations apportées à la technologie de conception, des défauts peuvent toujours survenir. Les défauts les plus courants rencontrés dans les moteurs de faible

et moyenne puissance sont les défauts statiques, et les défauts causés par des contraintes mécaniques représentent la plus grande proportion, pour les grandes machines. [16]

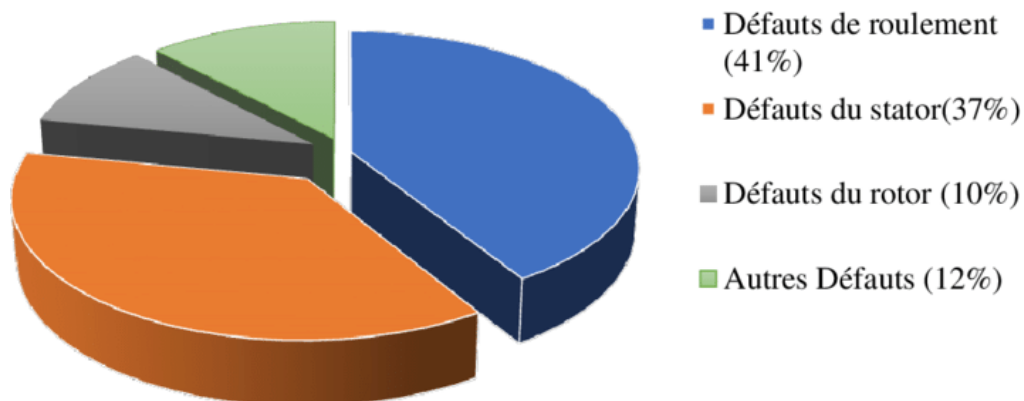


Figure 2.6 : La distribution des défauts dans les machines électriques.

II-10 Cause des défauts :

Il y a de nombreuses raisons à cette anomalie. Ils peuvent être divisés en trois groupes:

■ **Générateur de défaut ou initiateur de défaut** : surchauffe moteur, défaut électrique (court-circuit), défaut mécanique, endommagement des fixations, défaut d'isolement, surtension électrique...

■ **Défaut amplificateur** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, interférence de puissance (instabilité de tension ou de fréquence), échauffement permanent, mauvaise lubrification, vieillissement...

■ **Défauts de fabrication et erreurs humaines** : défauts de fabrication, défauts Composants, mesures de protection inappropriées, taille de machine incorrecte, etc.

Le moteur asynchrone a une partie fixe appelée le stator, qui se compose d'un Des enroulements triphasés sont placés dans les fentes du circuit magnétique et des pièces mobiles Il s'appelle un rotor et se compose d'une cage ou d'enroulements de court-circuit placés dans des fentes. [17]

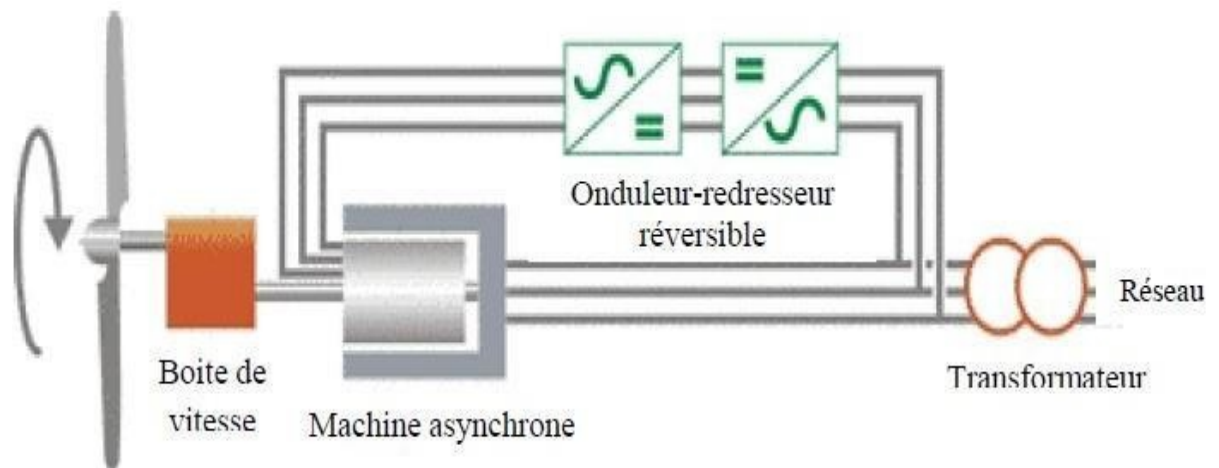


Figure 2.7 : Système éolien à vitesse variable structure à base d'une machine asynchrone double alimentation.

On remarque deux types de défauts dans la machine asynchrone:

- Défauts affectant le stator.
- Défauts affectant le rotor.

II-11 Défauts affectant le stator :

Ces défaillances sont couramment liées à la turpitude de l'isolation électrique. Elles sont généralement connues défaut de court-circuit entre une phase ou diverses phases Et / ou terre.

N'oubliez pas que les défauts statoriques peuvent participer : des court-circuits entre spires des enroulements de la semblable phase, ou de phases différentes, des court-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, provoquant intégraux une dissymétrie au plan du stator.

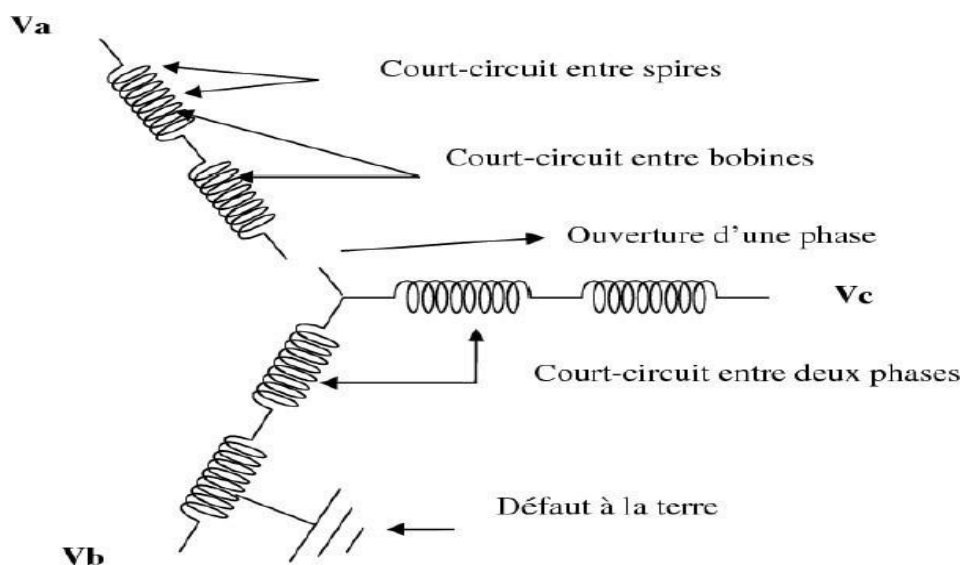


Figure 2.8 : Représentation des différents défauts statoriques possibles.

En définitive, ces défauts destructeurs de la couche de peinture protectrice sinueuse, Provoquer un déséquilibre de la machine et modifier son niveau d'isolation. De nombreuses raisons expliquent la diminution des performances d'isolation :

- Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique.
- Déconnexion des attaches des enroulements.
- Contamination due à l'humidité et à la saleté.
- Court-circuits ou contraintes de démarrage.
- Décharges électriques.

II-12 Défauts affectant le rotor :

Nous avons défini deux types de rotors: type bobiné ou type cage d'écureuil :

II-13 Rotor à cage d'écureuil :

Les défaillances qui affectent ce type peuvent être :

II-14 Défaillance de rupture d'anneau de la cage rotorique :

La détection de ce type de défaillances est souvent difficile vu le fait que la machine Continue de fonctionner en présence de ces défaillances. Ces derniers ont par ailleurs un effet d'accumulation. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres Adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui pipe à leurs breaks, et ainsi de suite jusqu'à la break d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt De la Machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et modifient la valeur du Couple électromagnétique, qui va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques. [18]

II-15 Défaut de roulements :

Ce type de défaut et sa détection sont rarement mentionnés dans la littérature des électriciens. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une bague extérieure, entre lesquelles se trouve un groupe de billes ou de rouleaux rotatifs. En fonctionnement normal, la défaillance par fatigue commence par de petites fissures sous la surface du chemin de roulement et des éléments roulants, et s'étend progressivement à toute la surface. Tout changement dans l'uniformité du roulement générera des vibrations détectables et augmentera le niveau de bruit. [19]

II-16 Défauts d'excentricités :

L'excentricité de la machine est le résultat de l'uniformité de l'entrefer. De tels défauts peuvent être causés par une flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, voire une précision insuffisante de la structure de la machine. Il existe trois types d'excentricité :

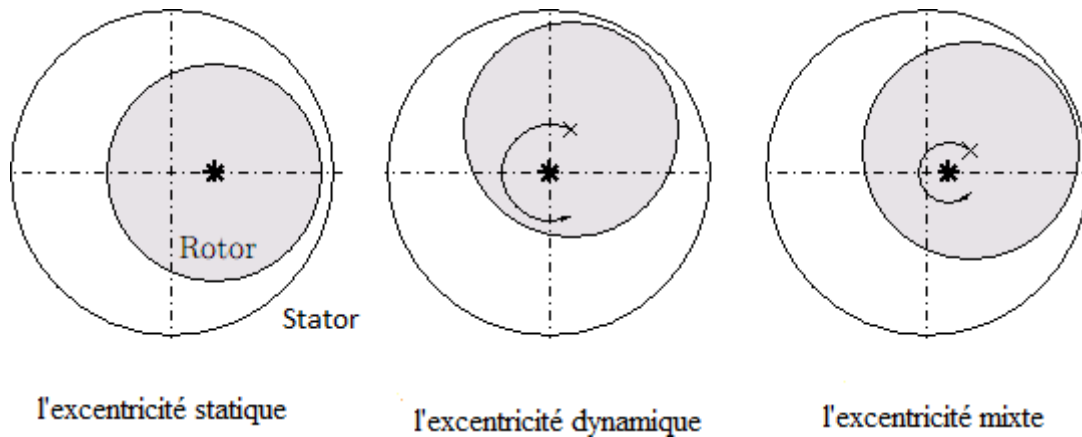


Figure 2.9: Différents types d'excentricités .

➤ **L'excentricité statique :**

Dans cette excentricité, la position de la plus petite épaisseur de l'entrefer est fixée dans l'espace. Cela peut être dû à l'ellipse à l'intérieur du stator ou au mauvais positionnement du rotor ou du stator pendant la phase de construction. Cependant, si l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne changera pas.

➤ **L'excentricité dynamique :**

En termes d'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas à son centre de rotation, donc la position d'épaisseur minimale de l'entrefer tourne avec le rotor. La raison de cette excentricité est la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le désalignement des roulements et la résonance mécanique à des vitesses critiques. [19]

➤ **L'excentricité Mixte :**

En présence d'excentricité statique et dynamique, c'est-à-dire d'excentricité mixte, il y aura des harmoniques de basse fréquence (f_m) et la fréquence fondamentale donnée par la relation suivante :

$$f_m = |f_1 \pm kfr| \tag{II.2}$$

Les signaux de vibrations, peuvent être aussi utilisés pour détecter les défauts liés à l'excentricité. Dans le cas d'excentricité mixte, les composantes de basses fréquences de vibrations du stator sont données par :

$$f = 2 f_1 \pm f_r \quad (\text{II.3})$$

Conclusion:

Dans ce chapitre en à vue l'étude des défauts du système éolien .On peut dire que le maximum de défauts qui peuvent se présenter dans le système éolien comme les défauts mécaniques et électriques Dans le chapitre suivant s'intéresse à la modélisation de système éolienne.

Chapitre III

Modélisation du système éolien

III-1 Introduction :

Considérons une Turbine éolienne équipée de trois Pales de longueur R , montées sur un arbre tournant à la vitesse lente de la Turbo et entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation. Pour limiter la puissance produite par la génératrice à sa valeur nominée, la quasi-totalité des éoliennes utilisent deux types de contrôle aérodynamique: un système d'orientation des Pales, destiné aux éoliennes pour lever les Pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance constante. L'autre système, est un système à décrochage aérodynamique, conçu pour les éoliennes de petites puissances à vitesse fixe, il consiste à concevoir la forme des Pales de manière engendrer les pertes de portière. Le système d'orientation des pales permet de limiter la puissance produite. À l'aide de ce système, la pale est orientée par un dispositif de commande appelé en anglais «Pitch control ». Généralement, l'angle de calage β peut-être fixe ou variable. Dans cette étude, nous avons choisi que l'angle de calage des pâles soit maintenu à une valeur fixe correspondent au point de Conversion Optimisation de l'énergie éolienne et les pâles de la Turbine sont figées dans une même direction face au vent. [20]

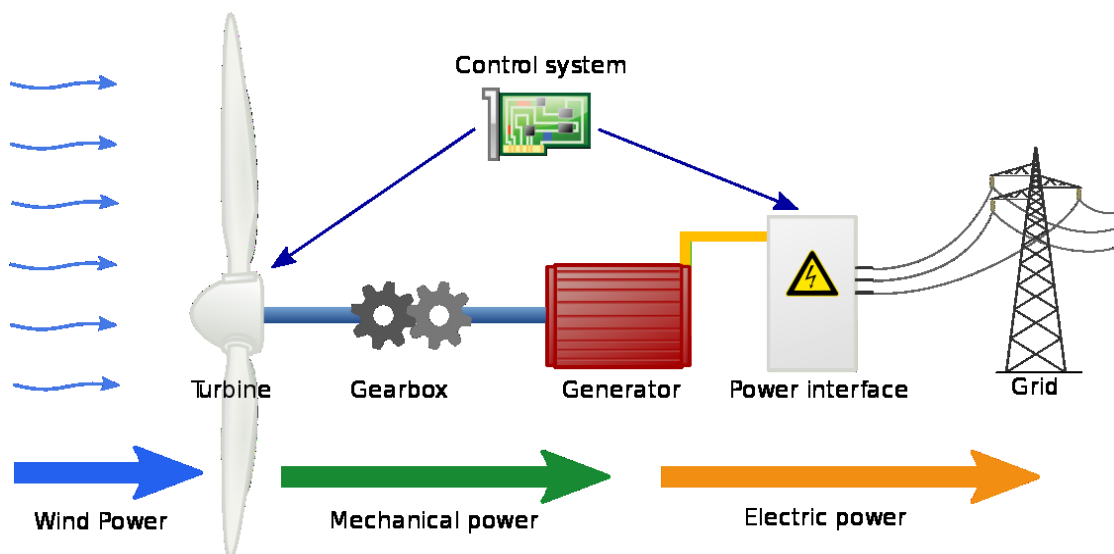


Figure3.1 : Schéma de la turbine éolienne.

III-2 Modélisation aérodynamique :

Une turbine ou une hélice est la partie d'une éolienne qui fait face au vent. Trois pales de longueur R sont montées sur le rotor. La turbine capte l'énergie cinétique Vent et convertit en énergie mécanique récupérée à partir d'un arbre à rotation lente. [21]

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v^3 \quad (\text{III.1})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'exprime comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} = c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v^3 \quad (\text{III.2})$$

Le couple aérodynamique C_{aero} est donné par l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aero}}{\Omega t} = \frac{1}{2} (2 \cdot \Omega t) \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v^3 \quad (\text{III.3})$$

Ωt est la vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s],

ρ est la densité de l'air, $\rho = 1.225$ [kg/m³],

$S = \pi \cdot R^2$ est la surface balayée par les pales d'une éolienne [m²],

R est la longueur de la pale jusqu'au centre du moyeu [m],

v est la vitesse du vent en amont du rotor de l'éolienne [m/s],

λ est le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne, c'est un paramètre de base sans unité, lié à la conception de chaque éolienne. Il représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et celle du vent au niveau de l'axe du rotor. λ est exprimé ainsi:

$$\lambda = \frac{\Omega t \cdot R}{v} \quad (\text{III.4})$$

Ce paramètre dépend du nombre des pales de l'éolienne. En effet, si le nombre des pales est réduit, la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est élevée et un maximum de puissance est extrait du vent. Pour le cas des éoliennes à pales multiples (Western Wind Turbines), le rapport de vitesse est égal à 1 ; pour les éoliennes ayant une seule pale, λ est d'environ 11. Quant aux éoliennes tripales, comme dans notre étude, elles ont un rapport de vitesse de 6 à 7. Pour les éoliennes de type Savonius, leur rapport de vitesse est inférieur à 1 . En vue de déterminer d'autres critères de variation de ce coefficient, des études ont été menées sur plusieurs types d'éoliennes et ont abouti aux résultats montrés sur les schémas suivants :

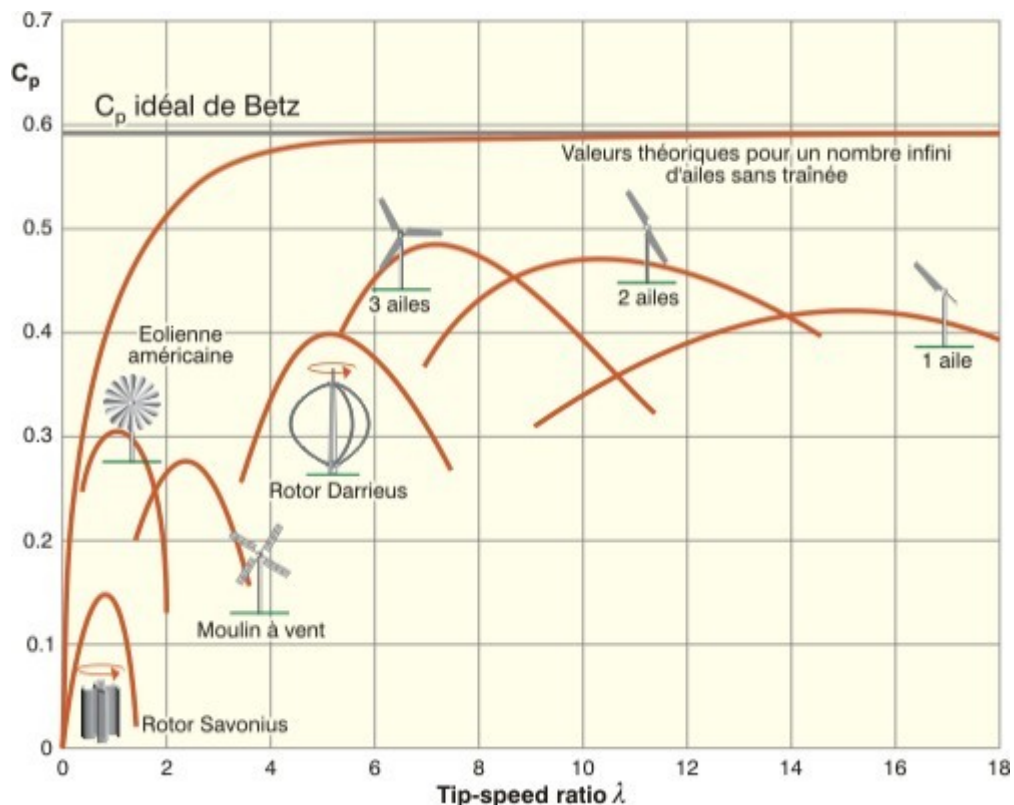


Figure 3.3 : Les courbes des coefficients de puissance selon le type de machine et selon leur coefficient de vitesse spécifique λ .

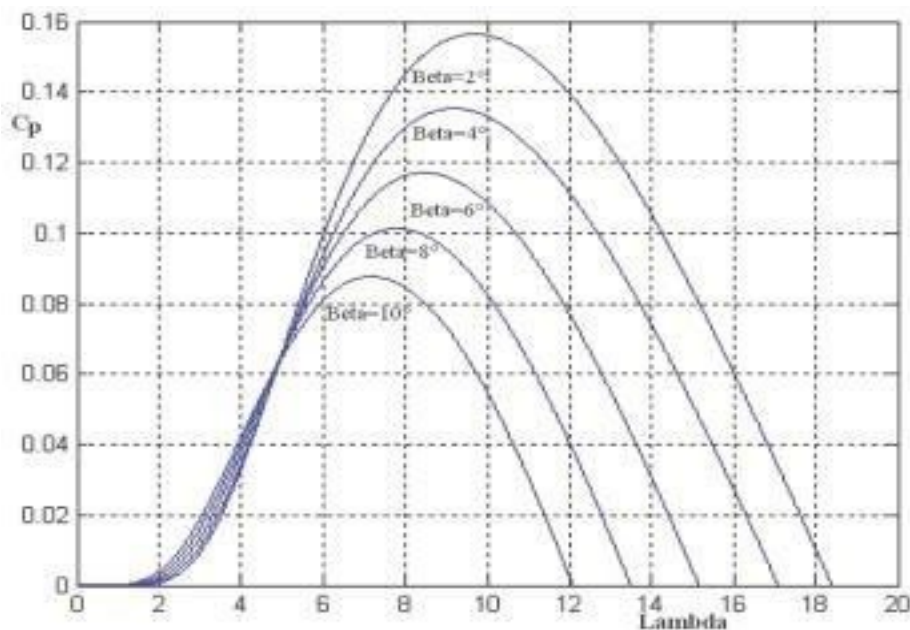


Figure 3.4 : Les courbes des coefficients de puissance selon l'angle de calage des pales β et selon le facteur de vitesse spécifique λ .

La figure 3.3 montre la raison de prédominance actuelle des éoliennes tripales ; ce type d'éoliennes offre un coefficient de puissance C_p meilleur par rapport aux autres types technologiques. La figure 3.4, montre qu'en diminuant l'angle de calage des pales β , nous obtenons un coefficient de puissance important, le plus proche possible de la limite théorique (Limite de Betz) et par conséquent, la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne est élevée. C_p est le coefficient de puissance ou d'efficacité de transfert aérodynamique qui varie avec la vitesse d'entrée. Ce coefficient n'a pas d'unité, il dépend essentiellement de l'aérodynamique des pales, du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation des pales β .

La loi de Betz a déterminé une limite théorique maximale du coefficient de puissance $C_{pmax} = 16/27 \sim 0,59$. En tenant compte des pertes, les éoliennes ne fonctionnent jamais à cette limite maximale et les aérogénérateurs les plus performants possèdent un C_p compris entre 0,35 et 0,45. Généralement, C_p est spécifique à chaque éolienne et son expression est donnée par le fabricant de l'éolienne ou à l'aide des formules non-linéaires. Pour calculer le coefficient C_p , différentes approximations numériques ont été proposées dans la littérature. Les expressions de C_p fréquemment rencontrées dans la littérature sont présentées dans le tableau suivant :

| Type du Coefficient de puissance C_p | Expression |
|--|---|
| | $0,22 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}}$ avec $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3+1}$ [Aguglia et al. 2010], [Kendouli 2011] |
| | $0,5 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,068 \cdot \lambda$ [Ackermann 2005], [Mirecki 2005], [Davigny 2007] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3+1}$ |
| | $0,5176 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda$ [Attoui 2015] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3+1}$ |
| | $0,5109 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda$ [Sylla 2013], [Nesmat 2008] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3+1}$ |
| | $0,44 \cdot \left[\frac{125}{\lambda_i} - 6,94 \right] \cdot e^{-\frac{16,5}{\lambda_i}}$ [Tameghe 2012] Avec: $\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0,002}$ |
| Sinusoidale | $0,5 - 0,167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda - 3)}{18,9 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$ [Aimani 2004] |
| | $0,3 - 0,00167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{10 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta$ [Hacil 2012] |
| Polynomiale | $6 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^5 + 10^{-5} \cdot \lambda^4 - 65 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 76 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda + 0,007$ [Krafczyk 2013] |
| | $7,95633 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0,001$ [Poitiers 2003] |
| | $\sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{ij} \cdot \beta^i \cdot \lambda^j$ avec: $2 < \lambda < 13$ |

Tableau 1 : Différentes formules numériques du coefficient Cp

Notre objectif étant de modéliser une éolienne à turbine tripale d’une puissance nominale de 3 kW, nous avons utilisé les paramètres de la turbine éolienne et de la MADA(GADA), présentés dans les travaux de . De ce fait, l’expression du Cp, utilisée dans notre étude, est une équation polynomiale présentant une valeur maximale du coefficient de puissance ($C_{pmax} = 0.35$) et une valeur optimale de vitesse relative ($\lambda = 7$). [21] [22] Le coefficient de puissance Cp est donné par l’équation suivante : $C_p(\lambda) = 6 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^5 + 10^{-5} \cdot \lambda^4 - 65 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 76 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda + 0.007$ Le schéma bloc présentant la partie aérodynamique est le suivant :

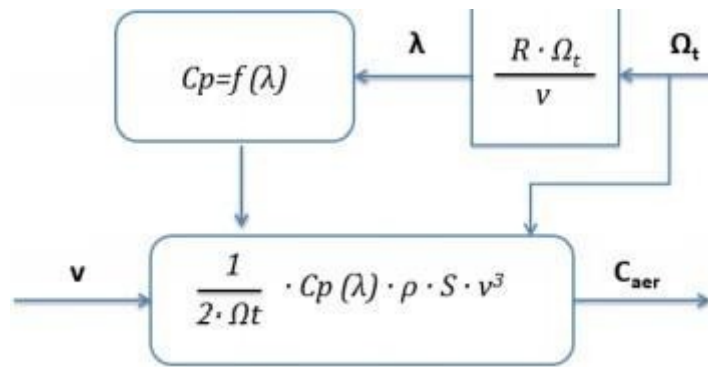


Figure3. 5 : Schéma bloc de la partie aérodynamique.

III-3 Modélisation de la partie mécanique :

La partie mécanique de l'éolienne est constituée de l'arbre principal tournant à vitesse lente de la turbine Ω_t , du multiplicateur de gain G entraînant la génératrice à une vitesse Ω_g par l'intermédiaire d'un arbre d'entraînement secondaire rapide.

III-4 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur ou aussi appelé boîte de vitesses est un dispositif permettant comme son nom l'indique de multiplier la vitesse assez lente de la turbine Ω_t par un simple gain de multiplication G en vue de la faire adapter à la vitesse rapide de rotation de la génératrice Ω_g . Ce multiplicateur est considéré comme étant idéal, en effet, l'élasticité, les frottements et les pertes énergétiques du multiplicateur sont considérés négligeables.

Les deux équations modélisant mathématiquement le fonctionnement de ce dispositif sont données comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_g = \frac{C_{aer}}{G} \\ \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \end{array} \right. \quad (III.5)$$

Où:

C_g : Est le couple récupéré en sortie du multiplicateur et appliqué sur l'arbre de la génératrice [N·m],

C_{aer} : est le couple aérodynamique de la turbine éolienne [N·m], Ω_g : est la vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice [rad·s⁻¹], Ω_t : est la vitesse de rotation de la turbine

[rad·s⁻¹],

G: est le rapport de multiplication (sans unité) : $G=N1/N2$.

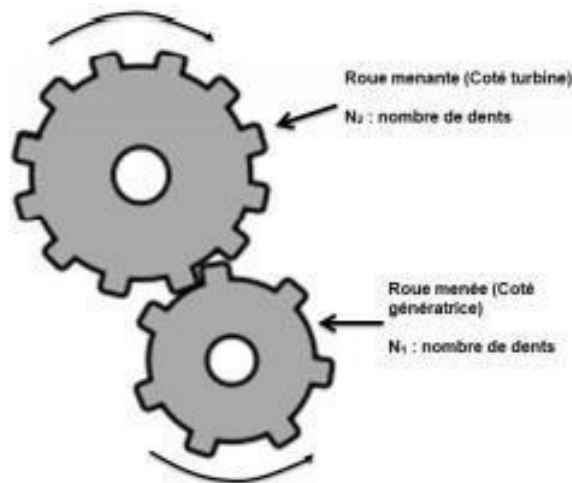


Figure 3.6 : Modèle du multiplicateur.

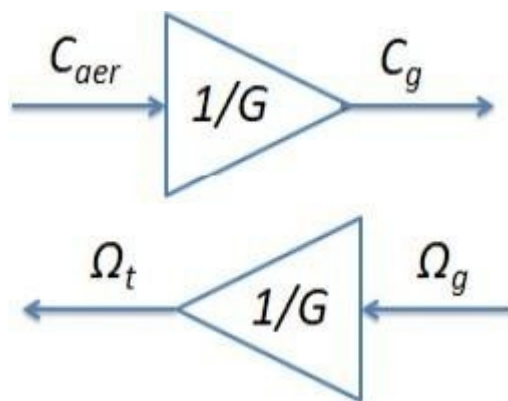


Figure3.7 : Schéma bloc du multiplicateur

La figure 3.6 montre le schéma des engrenages pour la détermination du rapport de multiplication et la figure 7 présente le schéma bloc du multiplicateur de vitesse.

III-5 Modèle de l'arbre mécanique :

Dans ce modèle, nous considérons deux masses : l'une correspondant à l'inertie du rotor de turbine supportant la pale ; elle comprend la masse de la pale et la masse du rotor de turbine. L'inertie de la turbine revient au rotor du générateur et est notée J_t . La deuxième masse représente l'inertie du rotor du générateur et est notée J_g .

L'inertie totale J constituée de l'inertie de l'éolienne (pale et moyeu de l'éolienne) et de l'inertie du rotor du générateur peut s'écrire selon l'équations suivante :

$$J = J_t / G^2 + J_g [13], [10]$$

$$J = J_t \cdot G^2 + J_g [21] [22]$$

$$J = J_t + J_g \sim J_t [11]$$

De même, pour le coefficient de frottement visqueux total f_v , il est composé du coefficient de frottement f_g associé à la génératrice et du coefficient de frottement visqueux f_t de la turbine.

Le coefficient f_v peut être exprimé comme suit:

$$f_v = f_t / G^2 + f_g \tag{III.6}$$

Donc, la partie mécanique peut être modélisée selon le schéma montré sur la figure suivante :

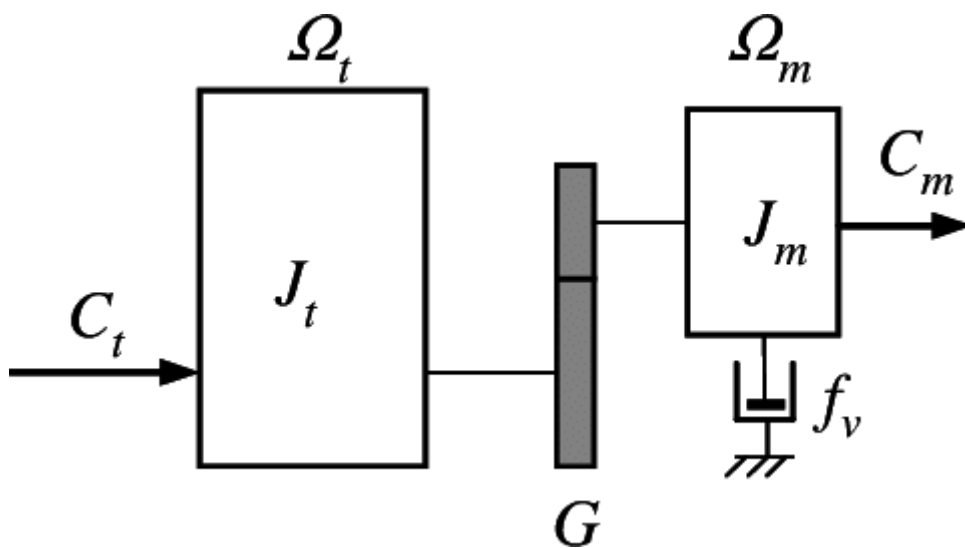


Figure 3. 8 : Modèle de la partie mécanique de l'éolienne.

La vitesse mécanique Ω_g du générateur dépend du couple mécanique appliqué au rotor du générateur C_{mec} . Ce couple est le résultat du couple électromagnétique du générateur C_{em} , du couple de frottement visqueux C_v et du couple multiplicateur de vitesse C_g . [23] [24]

$$C_{mec} = J \cdot d \Omega_g / dt \tag{III.7}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_v \tag{III.8}$$

Le couple du frottement visqueux C_v est modélisé ainsi :

$$C_v = f \cdot \Omega_g \tag{III.9}$$

Donc, à partir de ces équations établies, nous obtenons l'équation différentielle de la dynamique de la partie mécanique de l'éolienne, exprimée par :

$$J \cdot d\Omega_g/dt = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{III.10}$$

Le schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne est présenté par la figure suivante :

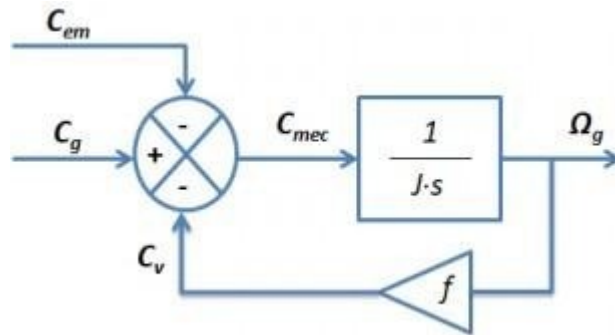


Figure3. 9 : Schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne.

Le schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne est donné par :

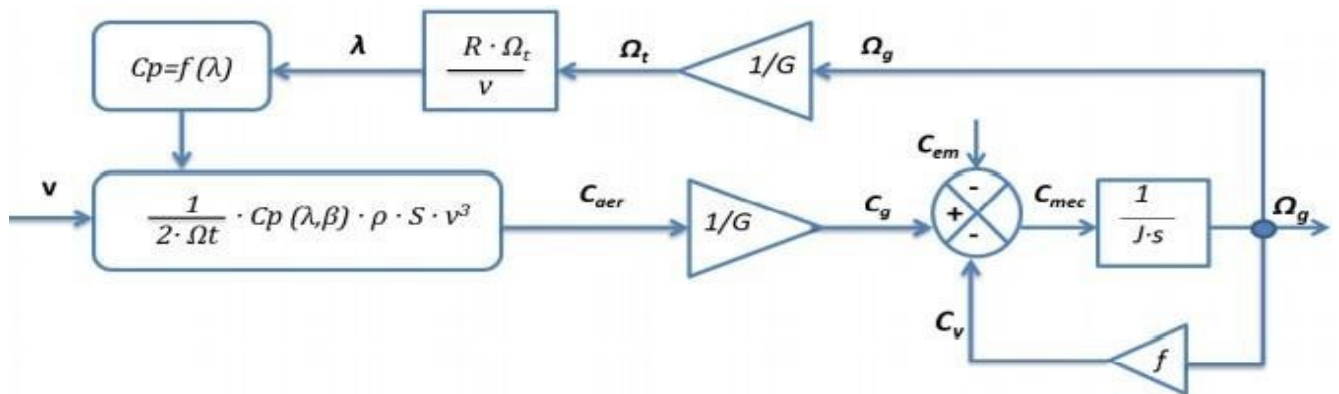


Figure3. 10 : Schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne.

III-6 Modélisation et commande de la GADA (MADA) :

III-6.1 Structure de la GADA (MADA) :

Une génératrice asynchrone à double puissance (GADA) est un moteur asynchrone triphasé. Sa double alimentation s'explique par le fait qu'elle est alimentée par deux armatures en même temps : le stator et le rotor. Son principal avantage est qu'il offre la possibilité de contrôler le flux de puissance dans les états bas et super synchrones pendant le fonctionnement du moteur ou du générateur. Il permet également le fonctionnement à vitesse variable du système intégré .

Pour les systèmes éoliens à vitesse variable, il existe deux configurations principales d'alimentations doubles pour moteurs asynchrones : les alimentations doubles stator et les

alimentations doubles stator et rotor. La particularité de cette dernière configuration est l'utilisation de convertisseurs installés entre le rotor de la machine et le réseau, la puissance rotorique qu'ils transmettent étant réduite, l'encombrement et le coût sont réduits. De plus, il offre également la possibilité de régler l'amplitude et la fréquence de la tension du rotor. C'est pourquoi cette configuration est plus populaire dans les systèmes de production d'énergie éolienne à vitesse variable que les éoliennes à vitesse variable alimentées par stator avec convertisseurs. Dans la littérature. [25]

➤ **Génératrice asynchrone doublement alimentée à rotor bobiné:**

La MADA à rotor bobiné est une machine asynchrone possédant un stator identique à celui des machines triphasées à induction et ayant un rotor constitué de trois enroulements triphasés. connectés en étoile et leurs extrémités reliées chacune à des bagues conductrices. Ces connexions permettent le contrôle-commande des grandeurs rotoriques .La figure suivante montre la constitution et la disposition des enroulements statoriques et rotoriques d'une MADA à rotor bobiné.

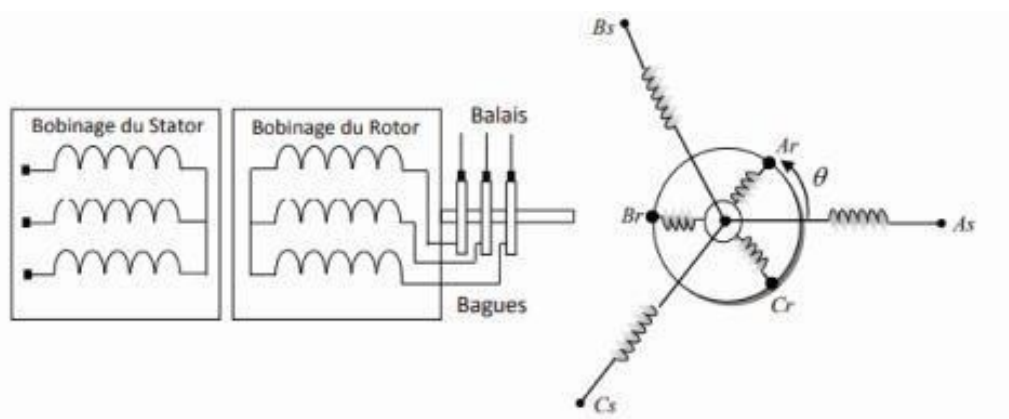


Figure3. 11 : schéma descriptif d'une génératrice.

Lorsqu'elle est connectée au réseau, son stator est directement relié au réseau électrique tandis que son circuit rotorique est connecté au réseau par le moyen d'un seul convertisseur direct (AC/AC): Cyclo-convertisseur ou Convertisseur matriciel ou par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance, à noter l'un se trouve du côté de la machine (CCM) et l'autre du côté du réseau électrique (CCR). Dans la littérature, il existe plusieurs structures possibles : une MADA avec pont à diodes et pont à thyristors « Structure de Kramer », une MADA avec pont à diodes et pont à transistors, une MADA avec cyclo-convertisseur, une Structure à trois MLI et une MADA avec convertisseurs MLI, appelée « Montage de Scherbius» [26]

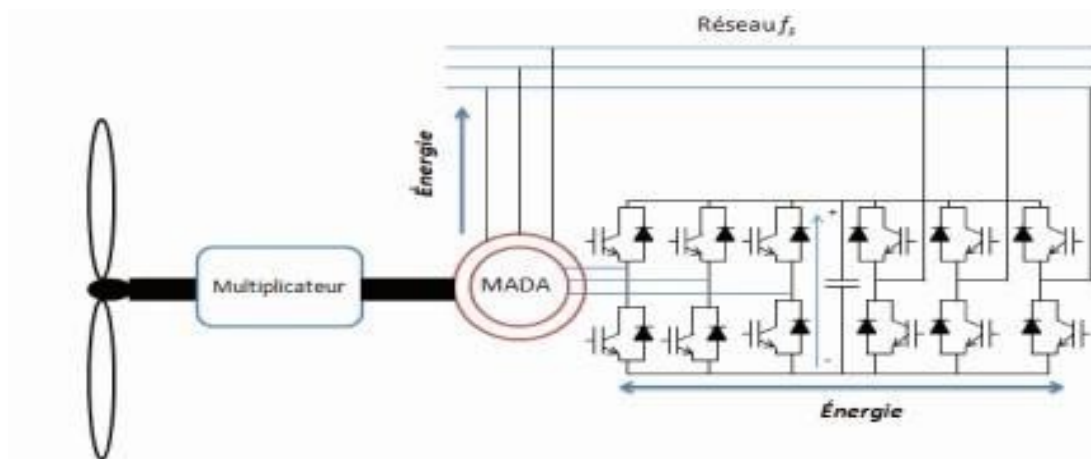


Figure3. 12 : structure *scherbius* avec convertisseur MLI .

➤ ***machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone :***

Ce type de machine se compose de deux machines avec un rotor de bobinage et avec un couplage mécanique reliant électriquement entre elles. Le stator de la première machine est connecté directement au réseau tandis que le stator de la deuxième machine se connecte au réseau au moyen d'un convertisseur (AC/AC). Cette configuration assure le contrôle du système via le stator fourni par le convertisseur et contrôle également la puissance réactive et active de manière découplée.

➤ ***machine asynchrone à double alimentation en cascade à unrepère :***

Cette machine est constituée de deux machines connectées entre elles mécaniquement seulement. Comme pour le type cité précédemment, le stator d'une machine est couplé directement au réseau alors que le stator de la deuxième machine est relié au réseau à travers un convertisseur (AC/AC).

➤ ***machine à double alimentation sans balais :***

Cette machine a deux enroulements triphasés avec différentes paires de pôles de stator. Le premier enroulement qui transfère la puissance est directement connecté au réseau, et le deuxième enroulement permet de modifier le courant d'excitation du moteur est connecté au réseau via un convertisseur AC/AC. Pour le rotor, il est composé d'une boucle conductrice, le nombre de paires de pôles est égal à la somme des deux paires de pôles des deux enroulements statoriques. Le moteur à double alimentation à réluctance variable est un MADA sans balai. La seule différence entre les deux machines est que la conception du rotor est basée sur le principe de l'entrefer variable ou de la réluctance variable. Pour le système éolien faisant l'objet de cette recherche, nous avons choisi une configuration basée sur un rotor bobiné MADA avec un système de brosses annulaires, qui est basé sur une structure

Scherbius avec un convertisseur MLI.

III-6.2 Principe de fonctionnement :

Lorsque le stator du moteur est alimenté par un réseau de fréquence f_s , un champ magnétique tournant B de vitesse N apparaît dans le circuit statorique, tel que :

$$N_s = f/p \quad (III.11)$$

Si le rotor devait être bloqué (en circuit ouvert), selon la loi de Faraday, le champ magnétique généré balayera le rotor et générera une force électromotrice dans le conducteur :

$$e = d\phi/dt \quad (III.12)$$

La fermeture du circuit rotorique entraîne l'apparition du courant rotorique, et donc l'apparition de la force électromotrice générée par l'action du champ magnétique statorique sur le courant rotorique. Et selon la loi de Lenz, la force fait tourner le rotor dans le même sens que le champ magnétique. Lorsque le couple de démarrage est suffisant, le rotor commence à tourner.

Les deux conditions nécessaires pour générer le couple sont : Le circuit rotor fermé et la vitesse rotorique est différente de la vitesse synchrone , car lorsque $N = N_s$, aucune force Génère une force électromotrice (f. e. m) et il n'y a pas de courant induit dans le rotor, donc il n'y a pas Coupler. Le courant rotorique est dû à la différence entre les vitesses N_s et N .

Par conséquent : N_s , N sont respectivement la synchronisation et la vitesse du rotor de la machine. Selon l'équation, la fréquence du volume du rotor est proportionnelle au glissement
Suivant :

$$f_r = g \cdot f_s \quad (III.13)$$

Compte tenu de l'ampleur du glissement, nous pouvons classer le modal MADA fonctionne sous 4 systèmes différents :

- **Etat statique** : L'aimantation du stator est générée par un réseau avec une fréquence de f_s . Le champ magnétique généré génère une force électromotrice au rotor de la machine, mais il n'y a pas de courant circulant dans le circuit rotorique, donc aucun couple n'est généré. Le comportement du MADA est le même que celui du transformateur. Dans ce cas, on a $a = 0$ et $g = 1$.
- **Faible vitesse synchrone** : Dans ce cas, la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse synchrone s et le glissement est positif, ce qui signifie que le champ magnétique statorique est dans le même sens que le rotor du moteur. Au fur et à mesure que la vitesse du rotor approche

de la vitesse synchrone, la fréquence du rotor f diminue progressivement et se rapproche de zéro. Cette fois on a : $\omega < \omega_s$ et $0 < g < 1$.

- **Vitesse synchrone** : Dans ce cas, la vitesse du rotor est égale à la vitesse synchrone, donc il n'y a pas de glissement entre le champ magnétique du stator tournant et le rotor du moteur ($\omega = \omega_s$ et $g = 1$). Par conséquent, il n'y a pas de tension induite dans l'enroulement du rotor.
- **Vitesse super synchrone** : A cette vitesse, la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse synchrone, le glissement devient négatif. Cela peut provoquer une augmentation de la pression artérielle. Le rotor, on a donc : ($\omega > \omega_s$ et $g < 1$).

III-6.3 Modes de fonctionnement de la MADA :

L'un des principaux avantages de MADA est qu'il permet quatre quadrants différents, contrairement aux machines asynchrones classiques qui fonctionnent comme un moteur lorsque la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse du moteur et fonctionnent en génératrice lorsque sa vitesse de rotation dépasse la vitesse synchrone. Ainsi, pour ADM, la vitesse de rotation ne détermine plus le mode de fonctionnement du moteur ou du générateur. Quatre modes de fonctionnement de MADA sont décrits comme suit :

■ **Fonctionnement moteur hyposynchrone de la MADA** : lors de ce mode, le réseau fournit au stator de la MADA une puissance notée P_s , la puissance de glissement P_r est injectée dans le réseau en transitant par les deux convertisseurs et une puissance mécanique est récupérée sur le rotor de la machine.

■ **Fonctionnement d'une génératrice synchrone faible** : Dans le cas d'une éolienne, la puissance mécanique P_m est fournie par la turbine à la machine, la puissance P fournie au réseau passe par le stator, et la puissance de glissement P est absorbée par le rotor.

■ **Fonctionnement super générateur synchrone** : injecter la puissance P et glisser la puissance P_r dans le réseau. Par conséquent, nous avons un fonctionnement en mode générateur qui est supérieur à la vitesse synchrone. [27] [28]

Pour les systèmes éoliens, les deux derniers modes de fonctionnement de MADA sont les plus intéressants. La figure suivante résume les quatre modes de fonctionnement de MADA et le flux correspondant de chaque mode de fonctionnement :

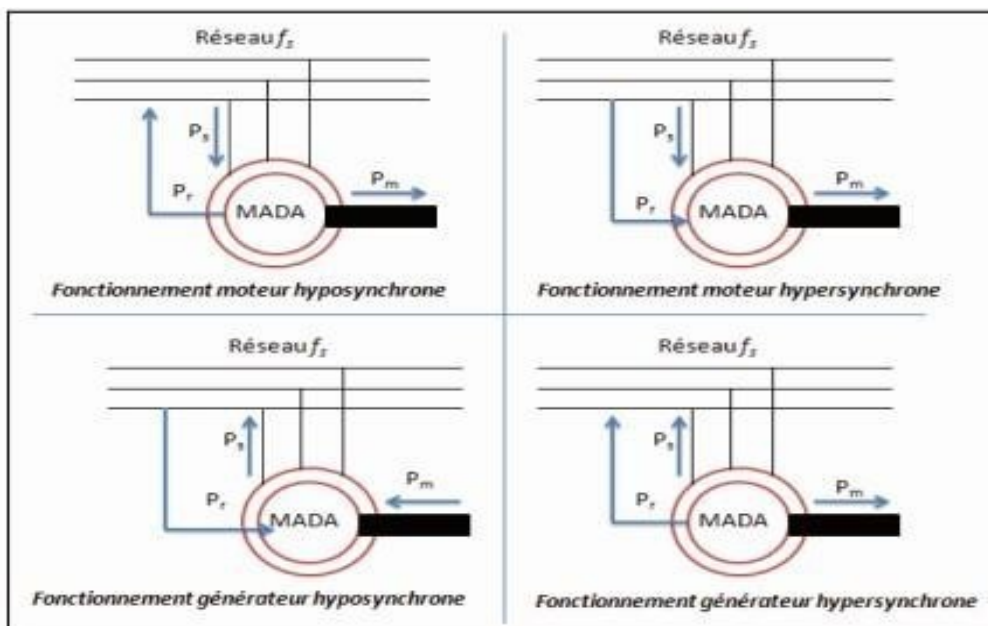


Figure3. 13 : Les quatres modes de fonctionnement de la MADA.

III-6.3.1 Avantages de la MADA pour l'application éolienne:

- Un système éolien basé sur la MADA permet de faire varier la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. C'est ainsi que nous parvenons à extraire le maximum de puissance possible. L'emploi des éoliennes à vitesse variable autorise le fonctionnement sur une large plage de vitesses de vent et permet d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent .
- Dans un système éolien, la vitesse de rotation de MADA est de $\pm 30\%$ synchrone, ce qui limite la puissance circulant dans l'enroulement du rotor, qui est égale à $(g \times P)$, de sorte que la taille du convertisseur de puissance peut transmettre la puissance glissante P_r à le plus égal à 30% de la puissance nominale de la machine .
- Par rapport aux convertisseurs utilisés dans les systèmes de production d'énergie éolienne à base de moteurs à cage d'écureuil ou d'aimants permanents, la taille du convertisseur de puissance est réduite d'environ 70% , le coût est moindre et le bruit est plus faible. De plus, ces convertisseurs ont des taux de perte réduits, ce qui améliore l'efficacité du système.
- L'utilisation de MADA dans les éoliennes à vitesse variable permet un contrôle indépendant de la puissance active et réactive via le convertisseur côté rotor de la machine (CCM), contrôlant ainsi le facteur de puissance. [29]

III-6.3.2 Modélisation et contrôle vectoriel de laGADA :

III-6.3.2.1 Modèle triphasé de la MADA :

La MADA considérée dans cette étude est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, constituée d'un stator fixe et d'un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Le stator comporte trois enroulements semblables logés dans des encoches, ayant un nombre p de paires de $\frac{2}{3}\pi$

Quant au rotor, il comporte aussi trois enroulements triphasés, connectés en étoile et dont les extrémités sont raccordées à un système bagues- balais.

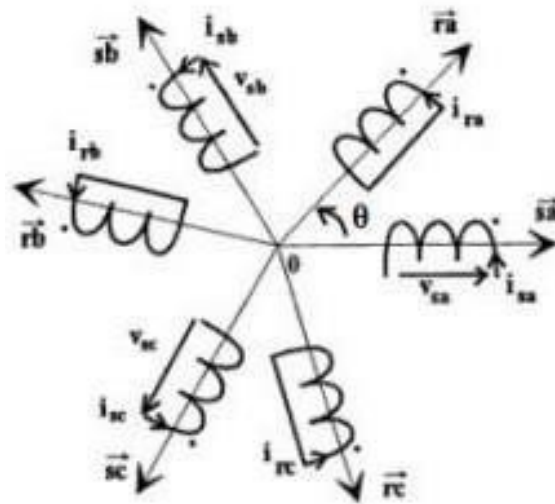


Figure 3.14 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [Caron 1995].

Avec :

Les indices s, r désignent respectivement le stator et le rotor de la machine, (·) désigne le sens des courants et des flux ; en effet, un courant positif entre par le point crée un flux positif dans l'enroulement,

θ est l'angle électrique entre \vec{Ra} et \vec{Sa}

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} sont les tensions d'alimentation des phases statoriques

$Sa, Sb, Sc,$

isa, isb, isc sont les courants des phases statoriques $Sa, Sb, Sc,$

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} sont les tensions des phases rotoriques $Ra, Rb, Rc,$

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} sont les courants des phases rotoriques Ra, Rb, Rc ,

La modélisation mathématique de cette machine, nécessite la mise au point de certaines hypothèses simplificatrices :

- Entrefer constant,
- Effet des encoches négligé,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- Pertes ferromagnétiques négligeables,
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux,
- La constante des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

■ Les tensions statoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \tag{III.14}$$

■ Les tensions rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \tag{III.15}$$

En manière plus courte :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -[R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\phi_{sabc}]}{dt} \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\phi_{rabc}]}{dt} \end{cases} \tag{III.16}$$

Pareils que :

V_{sabc} : Les tensions appliquées aux phases statorique ;

V_{rabc} : Les courants qui traversent celle-ci ;

ϕ_{sabc} : Les flux totaux à travers ces enroulements ;

R_s : Leurs résistances ;

Pour le rotor en adoptant les mêmes notations, en remplaçant l'indice « s » par l'indice « r »

Equations magnétique :

Les équations des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = -[L_{ss}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = -[L_{rr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} - [M_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

La manière raccourcie :

$$\begin{cases} \phi_{sabc} = -[L_{ss}] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [I_{rabc}] \\ \phi_{rabc} = [L_{rr}] \cdot [I_{rabc}] - [M_{rs}] \cdot [I_{sabc}] \end{cases} \quad (III.18)$$

Avec les matrice des inductances statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned} [L_{ss}] &= \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \\ [L_{rr}] &= \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (III.19)$$

Dans lequel :

L_s : l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : l'inductance propre d'une phase rotoriques ;

M_s : l'inductance mutuelle entre phase statorique ; M_r : l'inductance mutuelle entre phase statorique ;

La matrice des inductances mutuelles entre phase statorique et phase rotorique est donné par :

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

Ou: $[Msr] = [Msr]^T$ (III.20)

Equations mécaniques :

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$Cem = \frac{1}{2} p [I]^T \frac{d[L]}{dt} [I]$$
(III.21)

Ou :

$[I]$ Matrice de courant total ;

$[L]$: Matrice inductance totale ;

p : C'est le nombre des pairs des pôles ;

$$[i] = \begin{bmatrix} [is] \\ [ir] \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} [Lss] & [Msr] \\ [Msr] & [Lrr] \end{bmatrix}$$
(III.22)

Compte tenu que tous les termes des sous matrices, $[Lss]$ et $[Lrr]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$Cem = p [I]^T \left(\frac{d}{d\theta} [Msr] \right) [Ir]$$
(III.23)

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$\frac{d\omega}{dt} = Cem - Cr - fr\omega$$
(III.24)

La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ , ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé . [30].

[31]

III-6.4 La transformation de Park :

Les transformations mathématiques (telles que la transformation de Park) peuvent faciliter l'analyse de tels systèmes en convertissant ces équations différentielles à paramètres variables dans le temps en équations différentielles à paramètres constants écrites dans un système de coordonnées avec des axes orthogonaux.

La transformation de parc est un outil mathématique qui peut simplifier les équations des moteurs triphasés. Il intègre le système du système de référence (abc) au système de référence orthogonal (u, v) et obtient ainsi l'équation du système à coefficients constants, simplifiant ainsi sa résolution.

Afin de passer la représentation à l'aide de la matrice de transformation (θ), la transformation peut être appliquée au courant, à la tension et au débit.

La transformation est donnée sous la forme suivante :

$$[X_{uvo}] = [p(\theta)][x_{abc}] \tag{III.24}$$

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\phi) & -\sin(\phi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\phi - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \tag{III.25}$$

Pour le passage biphasé-triphasé il faut utiliser la matrice inverse :

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 1 \\ \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\phi - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\phi - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \tag{III.26}$$

• Application la transformation de Park sur la MADA:

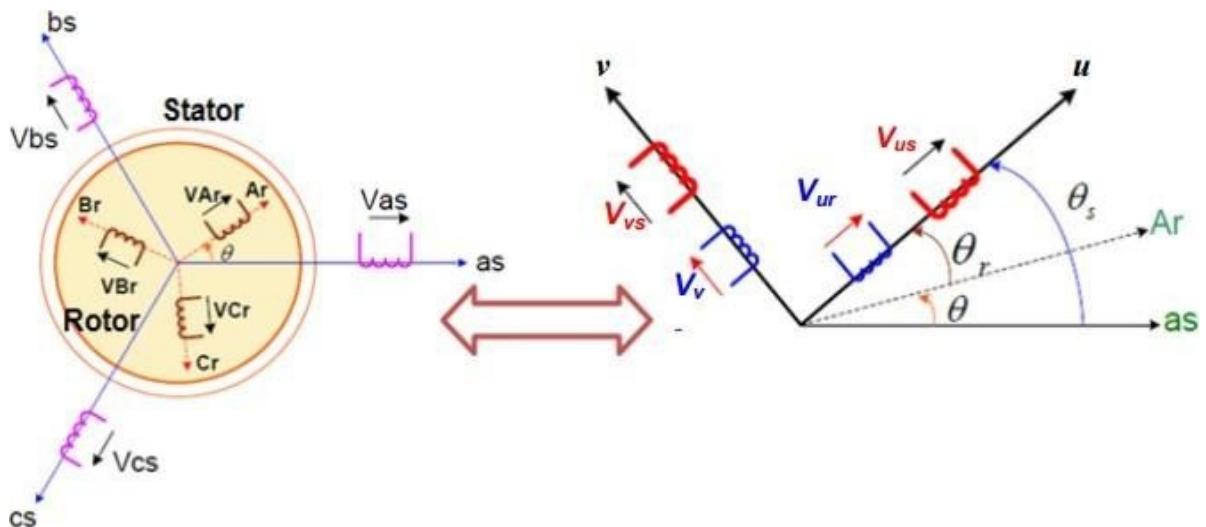


Figure 3.15 : Passage du système triphasé au biphasé (abc vers uv).

La figure 3.15 représente la projection des trois enroulements triphasés (as, bs, cs) d'axes fixe de la machine sur un repère mobile d'axes fictif (u, v, o) orthogonal.

Où :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe statorique ;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe directu;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique et l'axe direct u ;

$$\theta_s = \theta_r + \theta \tag{III.27}$$

L'indice o est une composante homopolaire.

Le système d'axes (u, v) tournant à la vitesse $\omega_{COOR} = d(\theta_s)/dt$

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ pour les équations du stator et θ_r pour celles du rotor [32].

$$\begin{cases} [V_{suv}] = [p(\theta_s)] \cdot [Vsabc] \\ [I_{suv}] = [p(\theta_s)] \cdot [Isabc] \\ [\Phi_{suv}] = [p(\theta_s)] \cdot [\Phi sabc] \end{cases} \begin{cases} [V_{ruv}] = [p(\theta_r)] \cdot [Vrabc] \\ [I_{ruv}] = [p(\theta_r)] \cdot [Irabc] \\ [\Phi_{ruv}] = [p(\theta_r)] \cdot [\Phi rabc] \end{cases} \tag{III.28}$$

On représente le modèle de la GADA dans le système d'axes (u, v) tournant à la vitesse ω_{COOR} :

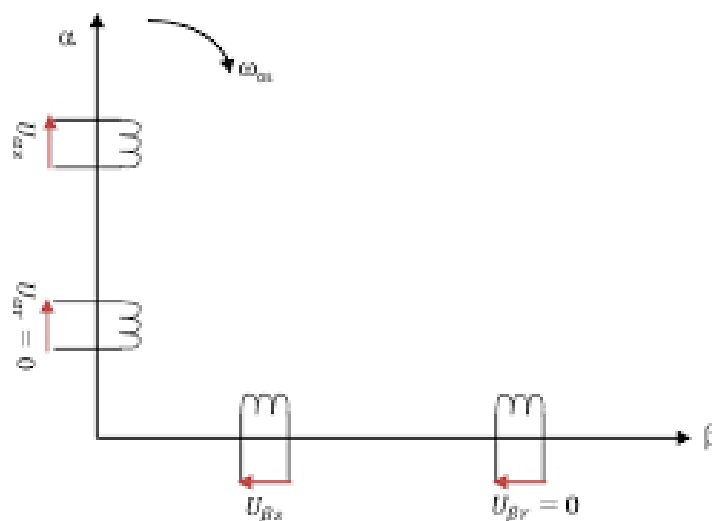


Figure3. 16 : Le modèle généralisé de la GADA selon les axes (u, v).

le schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé

(u, v) est représenté comme suivant :

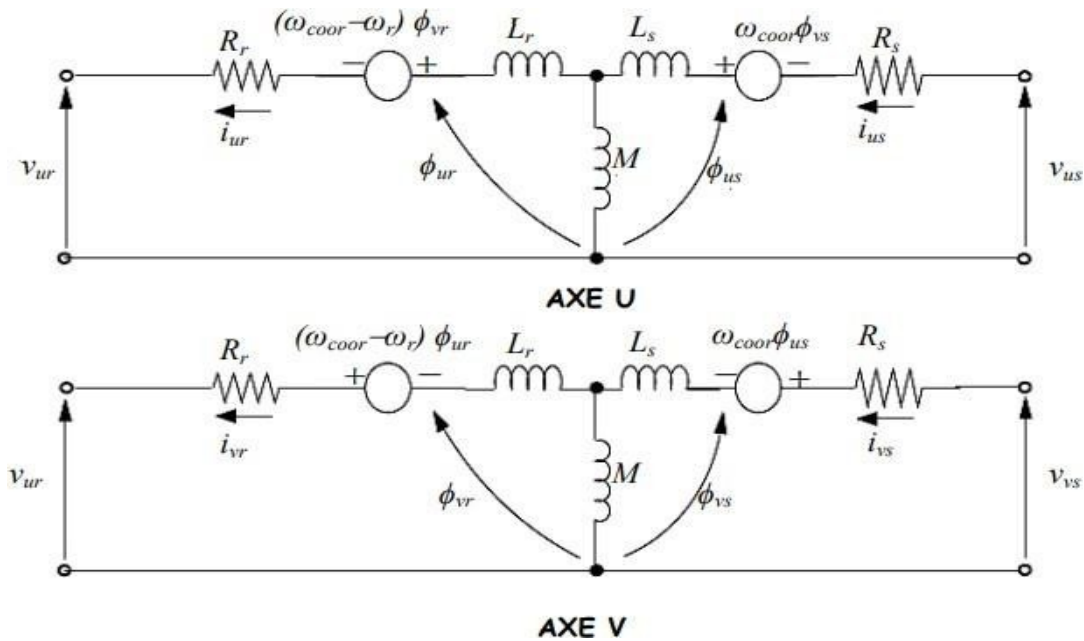


Figure3. 17 : Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé.

Après développement et simplification, les tensions statoriques et rotoriques sont :

$$\begin{cases} v_{us} = -R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{\text{coor}} \phi_{us} \\ v_{vs} = -R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{\text{coor}} \phi_{vs} \\ v_{ur} = -R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = -R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \phi_{ur} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Et les équations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{us} = -L_s i_{us} + M i_{ur} \\ \phi_{vs} = -L_s i_{vs} + M i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} - M i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} - M i_{vs} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Tel que :

L_s : Inductance cyclique statorique.

L_r : Inductance cyclique rotorique.

$M=3/2M_{sr} = 3/2M_{rs}$: mutuelle cyclique entre rotor stator

III-6.4.1 Choix du référentiel :

Il y a trois systèmes d'axes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes généralisé (u,v) . Ces systèmes d'axes sont :

- Le système d'axes (α, β) lié au stator, alors $\omega_{\text{coor}} = 0$;
- Le système d'axes (x,y) lié au rotor , $\omega_{\text{coor}} = \omega$;
- Le système d'axes (d,q) lié par rapport au champ tournant c.-à-d

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_s$$

L'utilisation est lié par rapport au champ tournant dernier système est recommandée généralement pour étudier les machines asynchrones, en particulier celles qui sont commandées par des convertisseurs de fréquence [33].

III-6.4.2 Modèle de la GADA référentiel lié au champ tournant :

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans lerepère de PARK lié au champ tournant comme suit :

A. Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

B. Equations des flux magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = -L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = -L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} - M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} - M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

C. Equations mécaniques:

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (III.33)$$

• Mise du modèle biphasé sous forme d'état :

Si on remplaçant les flux par leurs expressions (dans le système d'équations des tensions (III.29) on obtient[34].:

$$\begin{cases} v_{su} = -R_s i_{su} - L_s \frac{di_{su}}{dt} + M \frac{di_{ru}}{dt} + \omega_{coor} L_s i_{sv} - \omega_{coor} M i_{rv} \\ v_{sv} = -R_s i_{sv} - L_s \frac{di_{sv}}{dt} - M \frac{di_{rv}}{dt} - \omega_{coor} L_s i_{su} + \omega_{coor} M i_{ru} \\ v_{ru} = R_r i_{ru} + L_r \frac{di_{ru}}{dt} + M \frac{di_{su}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{rv} + (\omega_{coor} - \omega_r) M i_{sv} \\ v_{rv} = R_r i_{rv} + L_r \frac{di_{rv}}{dt} - M \frac{di_{sv}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{ru} - (\omega_{coor} - \omega_r) M i_{su} \end{cases} \quad (III.34)$$

Posons $\omega_m = \omega_{coor} - \omega$.

En mettant le système d'équations précédant sous forme compacte, on obtient :

$$[B][U] = [L][I] + \omega_m [C][I] + [D][I] \quad (III.35)$$

Avec:

$$U = [v_{su} \quad v_{sv} \quad v_{ru} \quad v_{rv}]^T; [I] = [I_{su} \quad I_{sv} \quad I_{ru} \quad I_{rv}]^T; [\dot{I}] = \frac{d}{dt} [I]$$

$$\begin{aligned} [B] &= \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]; \\ [L] &= \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}; \\ [C] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}; \\ [D] &= \begin{bmatrix} -R_s & \omega_{coor} L_s & 0 & -\omega_{coor} M \\ -\omega_{coor} L_s & -R_s & \omega_{coor} M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (III.36)$$

En mettant (II.17) sous forme d'état, on trouve :

$$[I] = [L]^{-1} \{ [B][U] - [D][I] - \omega_m [C][I] \}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (GADA) et Amélioration de la Commande par mode glissant (MADA) et la modélisation en puissance avec la transformation de Park. Dans le chapitre suivant on va voir la simulation de notre système éolien, un modèle mathématique est proposé et est considérée comme un scénario de défauts mécaniques.

(III.37)

Chapitre IV

Résultat et simulation du système éolien

IV-1 Introduction :

On a vu la modélisation de système éolienne dans le chapitre précédant éolien il va falloir maintenant faire la simulation avec l'étude de défaut quel'on peut exposer a ce système.

On a deux blocs a simulé :

- Bloc turbine.
- Bloc génératrice.

IV-2 Bloc Turbine :

Une turbine est composée de plusieurs éléments qui peuvent être simulé avec plusieurs sous blocs.

1. Sous bloc vent : Pour une bonne simulation de la turbine on doit utiliser un sous bloc vent variable pour bien simuler le comportement aléatoirement du vent:



Figure 4.1 : Bloc pour le profil du vent variable.

IV-2.2 Les paramètres initiaux de la turbine :

```
%turbine
Rt=3.19;      %reyon de la turbine (m)
G=2;         %coefficient de multiplication
rho=1.225;   %la masse volumique de l'aire (kg.m^-3 )
f=0.0024;   %coefficient du frottement visquex
J=7.68;     %L'inertie
%P=2;       %Le nombre de pair de pôles.
F=50;       %la fréquence(Hz)
ws=2*pi*F   %la pulsation statorique (rad/s)
```

IV-2.3. Déclaration des sous blocs de fonction de la turbine :

Pour le système de la turbine est composé de plusieurs types de sous blocs :

- Sous bloc 'pales' (d'angle de calage β) :

Pour l'angle de calage β on utilise le bloc de constante pour déclarer le degré de l'angle :

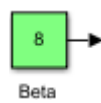


Figure 4.2 : l'angle de calage β .

- Sous bloc de 'Paramètre de rapidité' (la vitesse spécifique) λ :

λ est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles et la vitesse du vent. D'après la démonstration (III.12)

Si :

- λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.
- λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

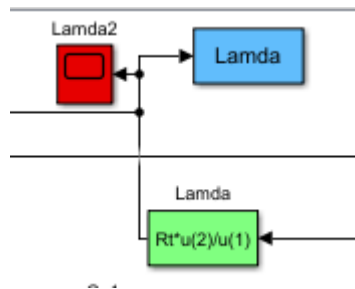


Figure .4.3: Paramètre de rapidité (la vitesse spécifique) λ .

- Sous bloc du Coefficient de puissance (coefficient de performance) C_p : Ce coefficient indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité, on utilise l'expression suivante : D'après (I. 6) $C_p = (0.5 - 0.0167 * (u(2) - 2)) * ((\pi * (u(1) + 0.1)) / (18.5 - 0.3 * (u(2) - 2))) - 0.00184 * (u(1) - 3) * (u(2) - 2))$

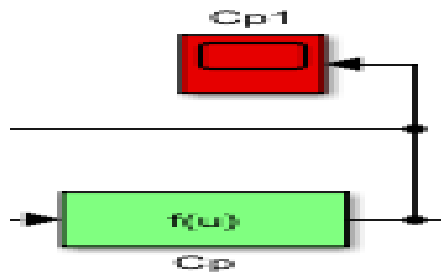


Figure 4.4: Coefficient de puissance (coefficient de performance) C_p .

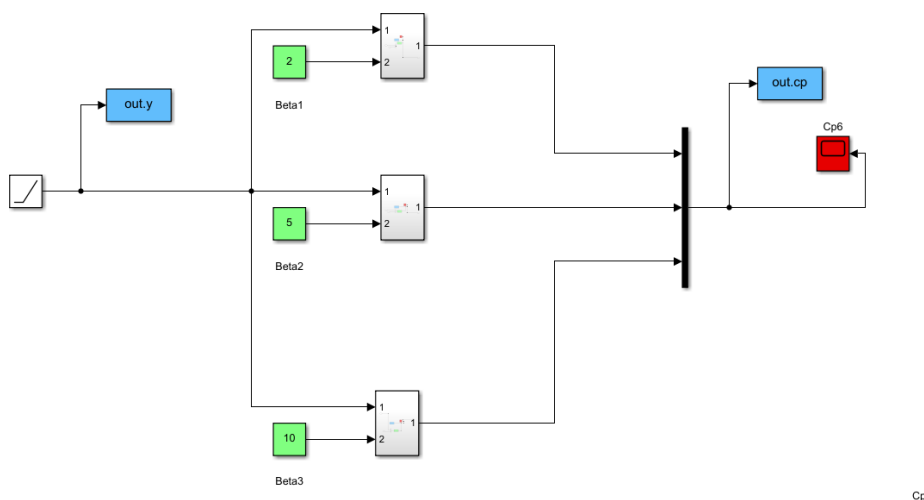


Figure4.5 : ce model Simulink de Cp est présenté par varie la valeur de β : 2 .5.10.

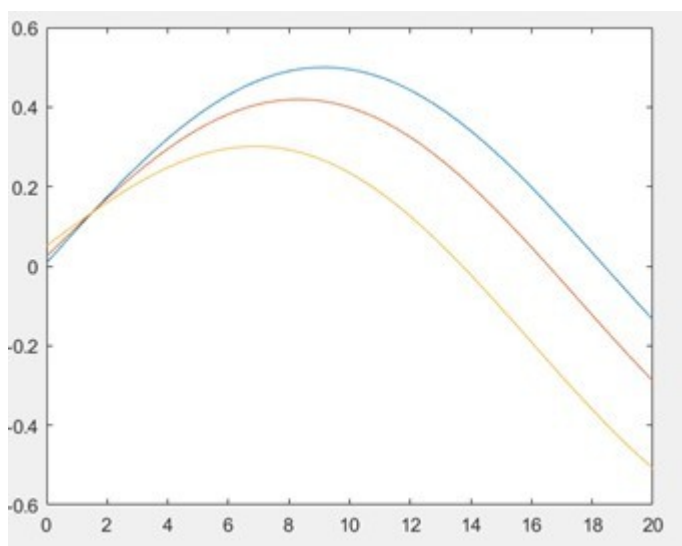


Figure 4.6: Résultat de simulation de variation la Cp en fonction de beta

- Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne Ct :

le couple mécanique totale c'est le couple mécanique le couple mécanique exercé par les forces aérodynamiques sur les pales de l'éolienne donné par l'équation

suivant les équations (III.7) (III.8) :

$$Ct = 0.5 * rho * pi * Rt^2 * u(3)^3 * u(2)/u(1)$$

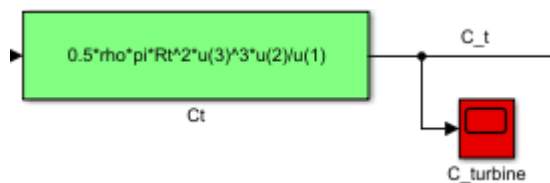


Figure 4.7 : Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne Ct

IV-2.4 Sous bloc multiplicateur :

Le multiplicateur arrange la vitesse (lente) de la turbine avec la vitesse de la génératrice.

- Couple résistant (issu du multiplicateur) C_g : Qui a en entrée C_t (Couple mécanique total) est en sortie C_g : D'après l'équation(III.5)

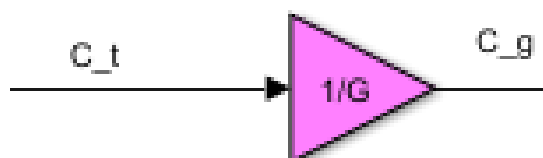


Figure. 4.8 : couple issu multiplicateur.

IV-2.5 Sous bloc 'arbre' :

La force rapportée à la génératrice par l'arbre est sous forme d'une fonction de transfert $J_{Turbine}$: D'après le chapitre précédant elle suit l'expression suivante :

$$J = J_t / G^2 + J_g$$

• Sous bloc de 'perturbations' :

- CP_MAX = 16 27 ~ 0.59 : c'est le rendement maximal du système
- Lamda1
- Lamda optimal
- Omega
- ω_t (vitesse angulaire [rad/s])
- Careo
- C_{estim} : couple aerodynamique estimé

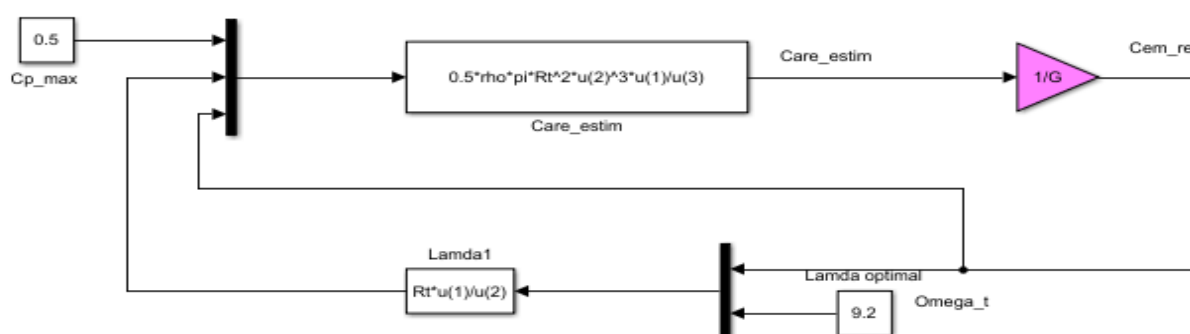


Figure 4.9 : bloc des perturbations.

IV-2.6 Bloc général de la turbine :

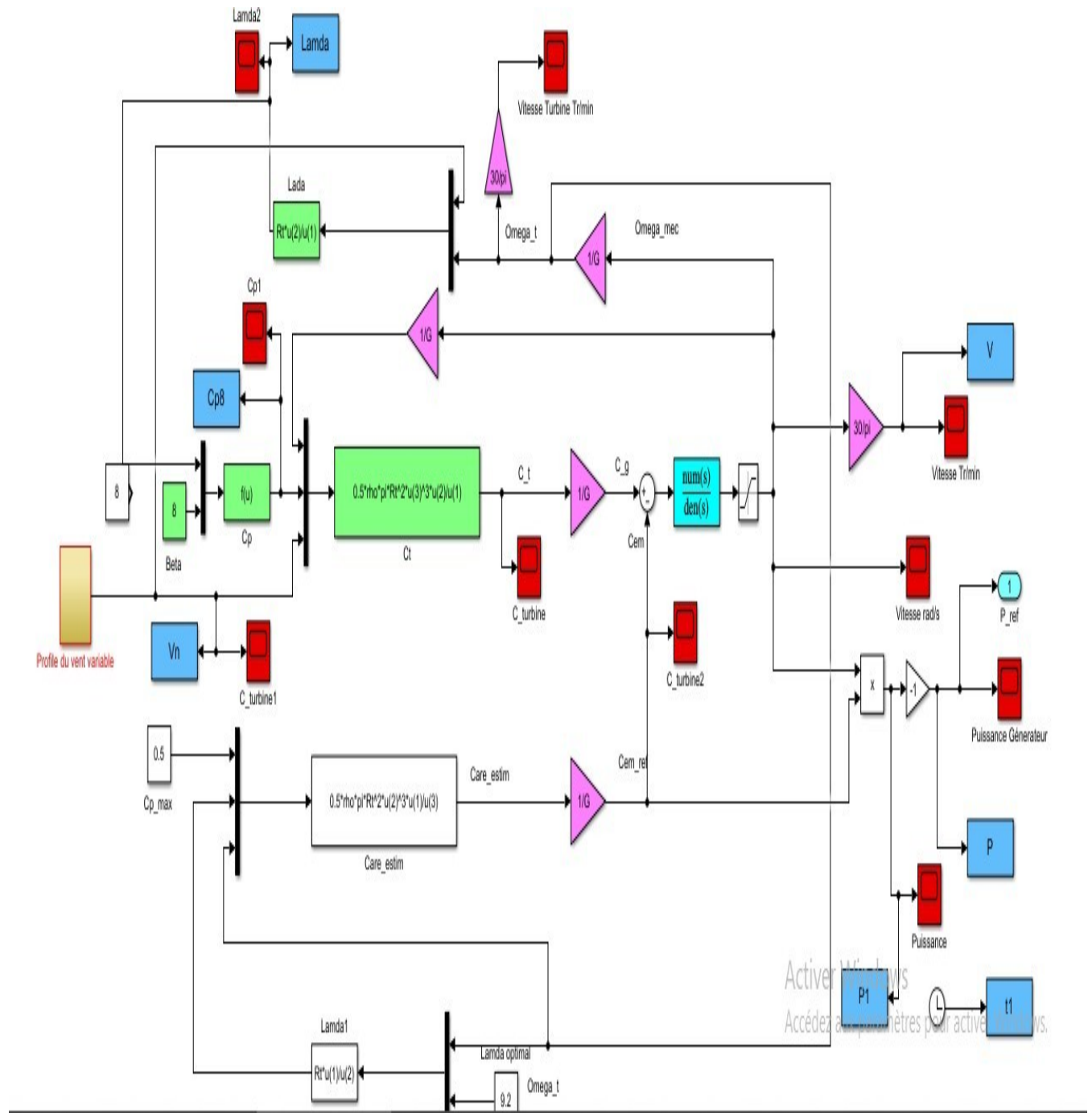


Figure 4.10 : bloc général de la turbine.

IV-3 simulation du bloc Génératrice :

Les paramètres initiaux de la Génératrice:

```

%GADA
P=3;          %Nombre de paires de poles
M=0.082;
Ls=0.094;    %Inductance cyclique statorique
Lr=0.088;    %Inductance cyclique rotorique
Rs=0.95;     %Résistance statorique
Rr=1.8;      %Résistance rotorique
g=0.03;      %Moment d'inertie
ws=2*pi*50;  %vitesse angulaire statorique
wr=320;      % vitesse angulaire rotorique
Vs=220;
Tr=Lr/Rr;
Ts=Ls/Rs;
sigma=1-(M^2/(Ls*Lr));
v1=g*M*Vs/Ls;
v2=g*ws*(Lr-M^2/Ls);
v3=v2;
v4=Vs^2/(ws*Ls);
v5=Rr*Vs/(M*ws);
%v5=v4
KV=-1000000
KVq=-1000000
    
```

Bloc de la génératrice:

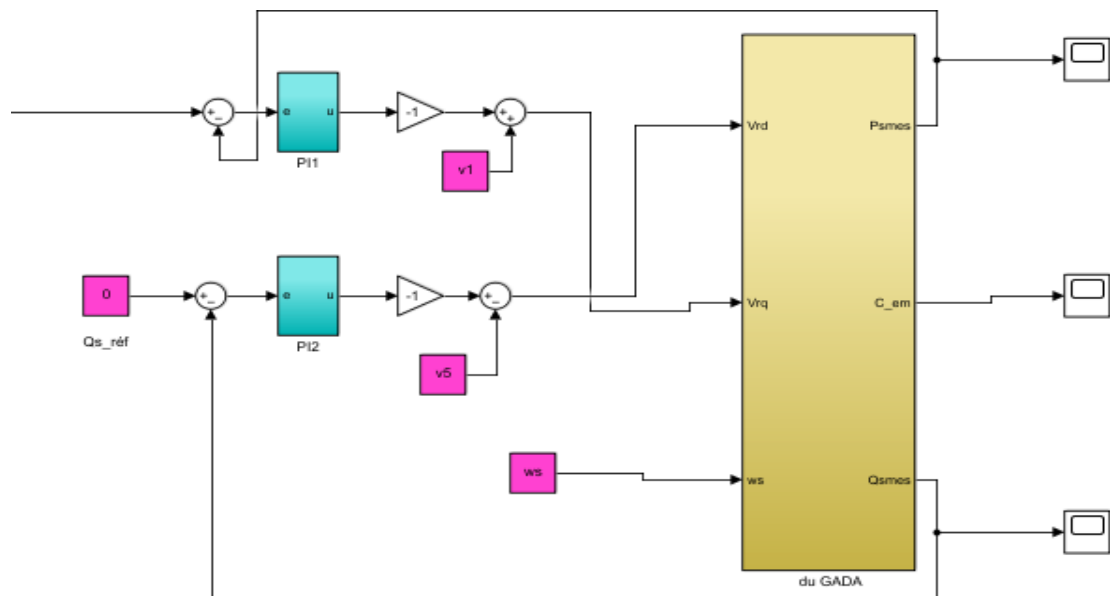


Figure 4.11 :Bloc de la génératrice

Bloc générale de la Génératrice :

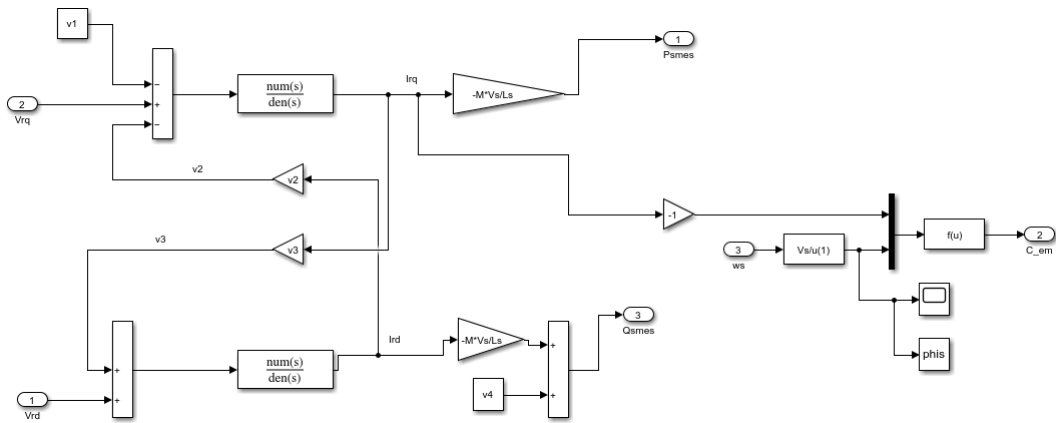


Figure4.12 : bloc générale de la Génératrice :

Bloc de commande :

Bloc de commande vectoriel direct c'est un bloc qui relie la turbine avec la génératrice

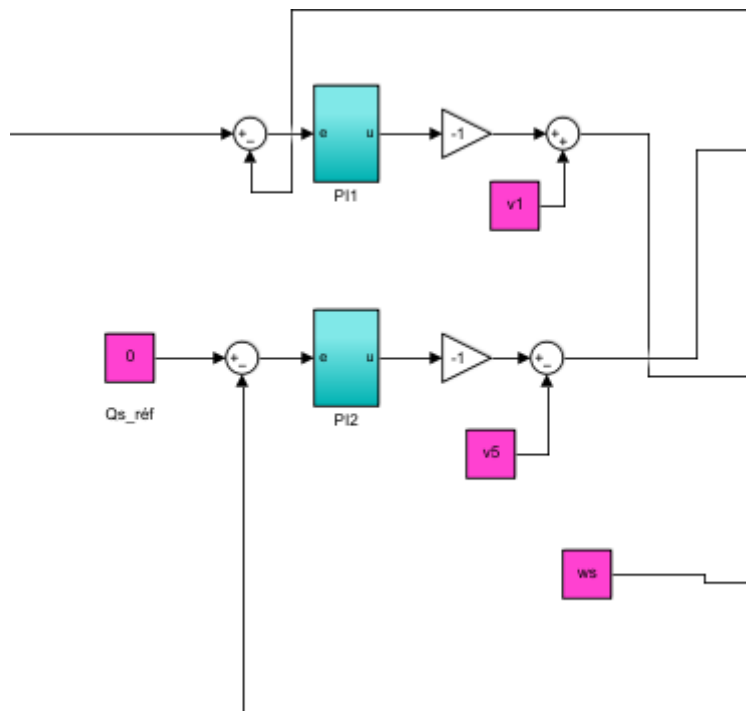


Figure 4.13 :Bloc de commande

Schéma Global du système éolien :

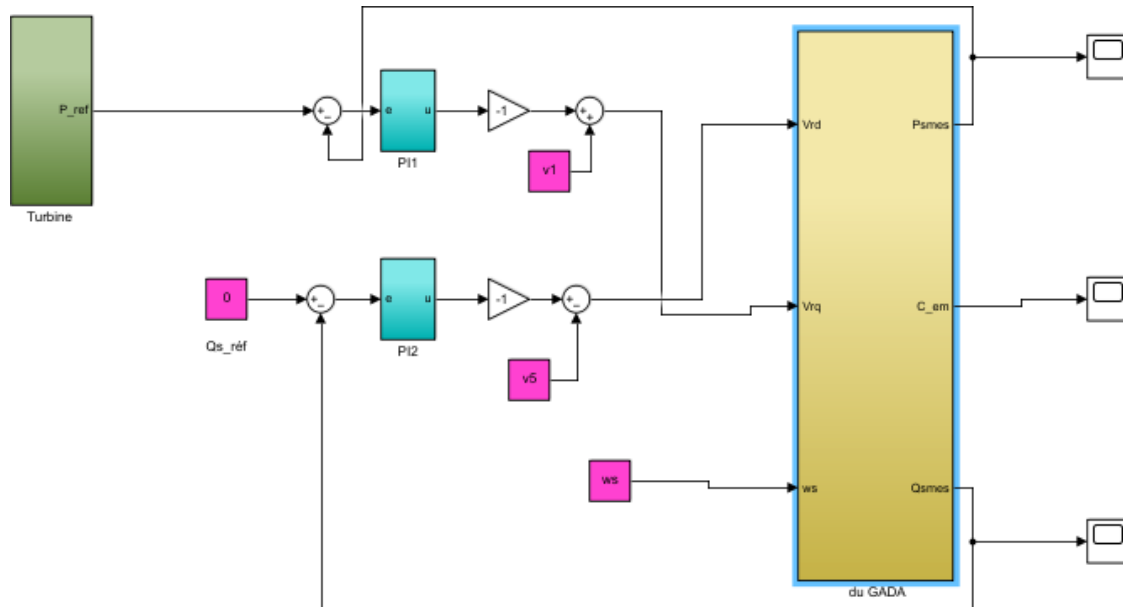


Figure 4.14 :Schéma Global du système éolien .

IV-4 Comportement du système éolien en présence de défauts

:IV-4.1 défaut mécanique :

• Défaut aux niveaux des pales : Pour simuler un défaut de pales on fait varier l'angle de calage, puisque le vent provoque une force sur les pales qui fait varier cet angle . On prend les valeurs de l'angle de calage comme suivant :

$\beta=3^\circ$ (en mauve)

$\beta=4^\circ$ (en orange)

$\beta=5^\circ$ (en rouge)

$\beta=8^\circ$ (bleu)

$\beta=9^\circ$ (en vert)

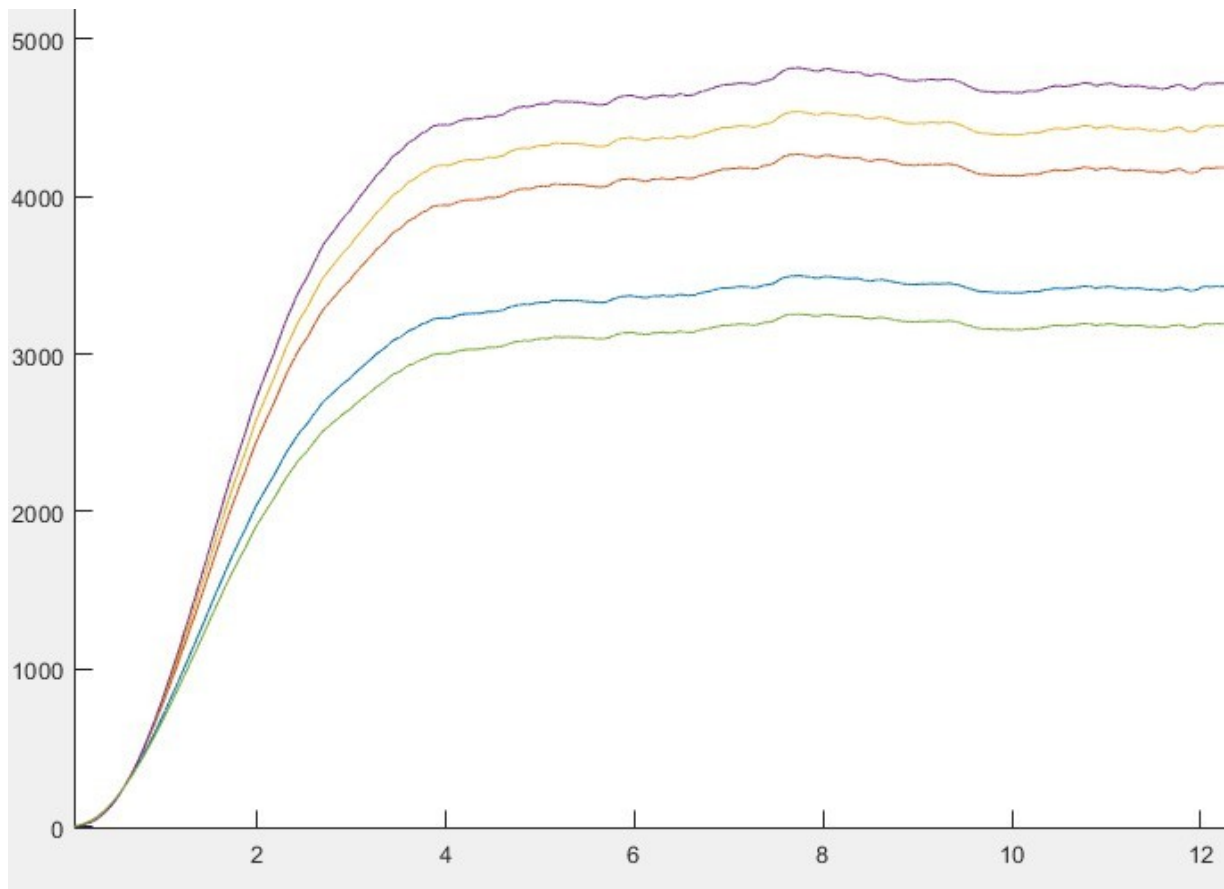


Figure 4.15: évolution de la puissance en présence de défauts aux pales (β).

On remarque que l'augmentation de l'angle de calge β est due à la force exercée par le vent sur les pales et en plus la variation de la valeur nominale de puissance de la turbine dépend de la variation de cet angle.

- Défaut au multiplicateur (pignons) :

Pour trouver un défaut dans un multiplicateur nous devons l'étudier au niveau de gain, qui est responsable du nombre de tours

On simule les défauts par les pourcentages du fonctionnement du multiplicateur sous cités :

$G=2 = 100\%$; (Etat sain) (en bleu)

$G=1.95 = 98\%$; (Défauts minime) (en rouge)

$G=1.90 = 95\%$; (en orange)

$G=1.82 = 90\%$; (en mauve)

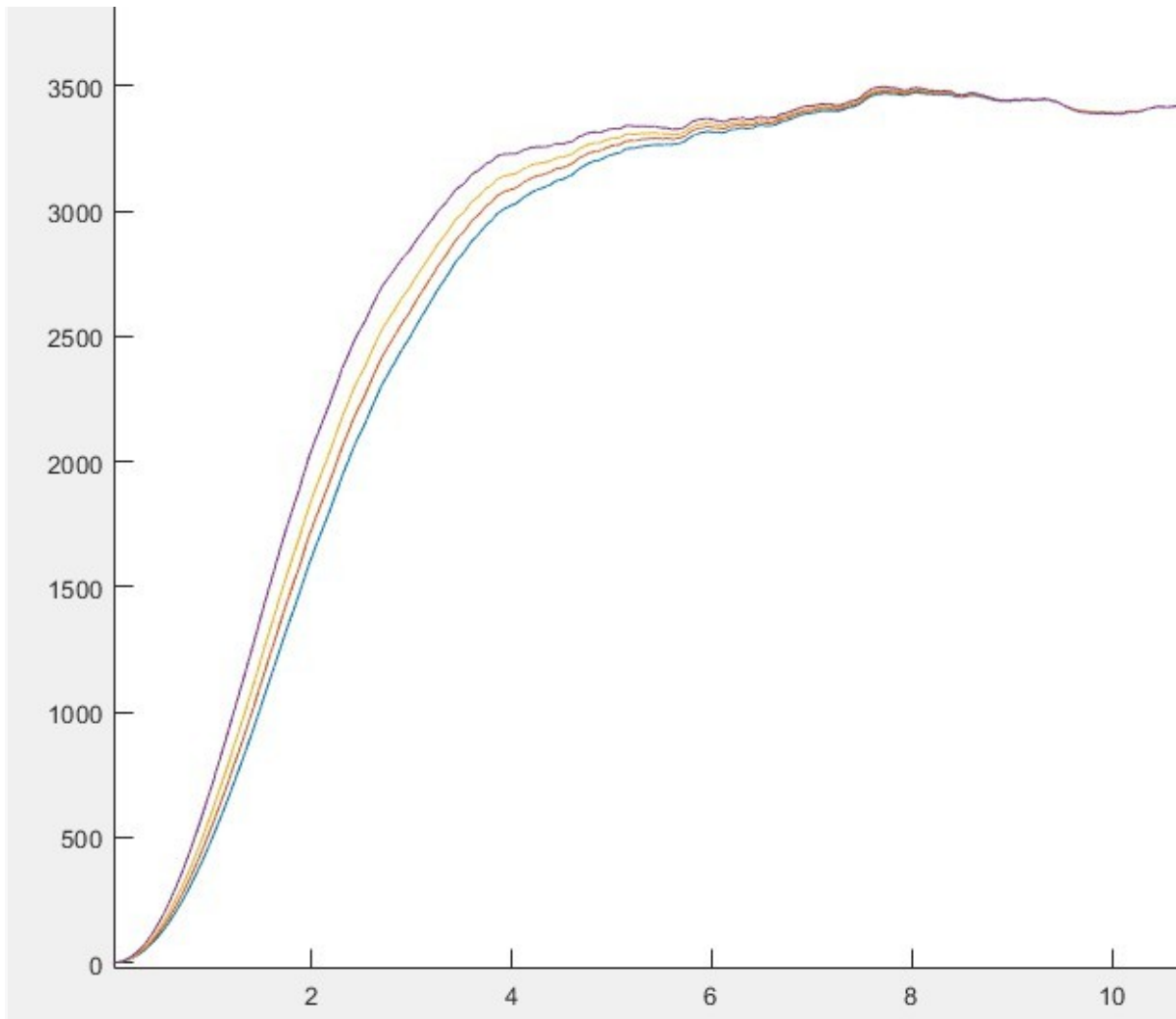


Figure 4.16 : évolution de la puissance en présence de défauts au multiplicateur (G).

Défaut au roulement : Le palier à roulement se situe entre la turbine et la génératrice dans l'arbre secondaire. Nous devons l'étudier au niveau de frottement

On prend les valeurs de frottement comme suivant :

$$F1=0.0024$$

$$F2=0.1$$

$$F3=0.4$$

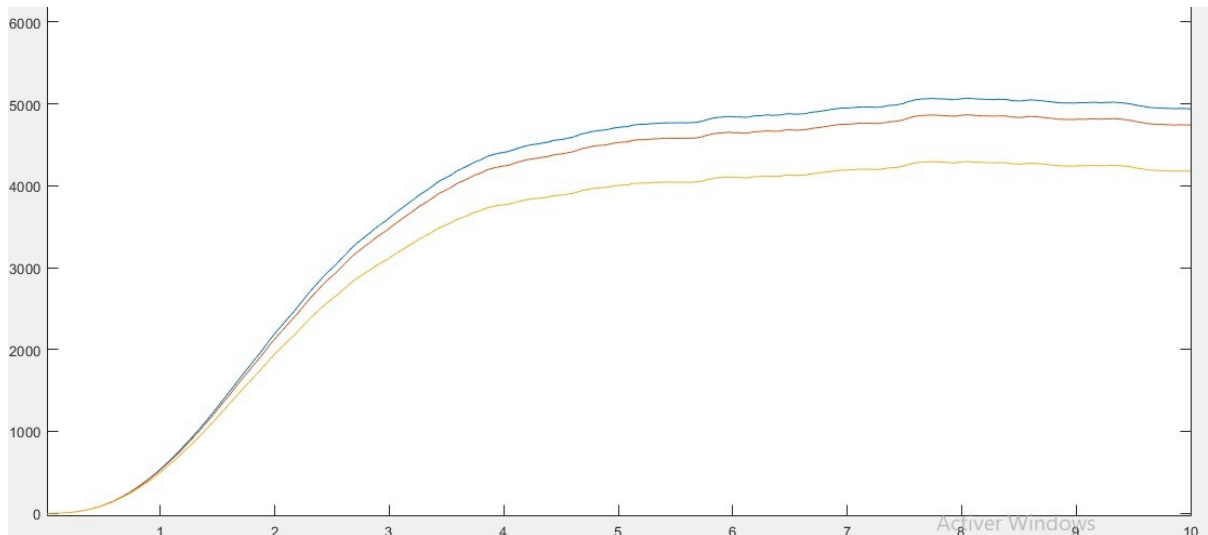


Figure 4.17 : évolution de la puissance en présence de défauts au roulement (frottement f).

On simule les défauts par les pourcentages du fonctionnement du multiplicateur sous cités :

$F1 = 100\%$; (Etat sain) en bleu

$f2 = 95\%$; (Défauts minime) en rouge

$f3 = 85\%$; en orange

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié quelques-uns des défauts auxquels les pales du vent sont exposées du fait de phénomènes naturels par exemple, ou d'autres raisons. Parmi ces défauts, nous classons les défauts mécaniques. Nous nous sommes intéressés aux défauts les plus répandus, les résultats obtenus sont convainquants, ils sont en bonne corrélation avec la réalité.

Nous avons pu mettre en évidence que la présence de défauts diminue la performance du système éolien.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'éolien est la meilleure solution pour répondre aux besoins mondiaux en énergie électrique du fait de l'abondance du vent et de la présence de la source naturellement. Cette solution n'est pas sans conséquence, comme le coût des travaux d'entretien.

Généralement, les gestionnaires de réseaux ne pourront plus se permettre de perdre tout ou partie de la puissance installée afin de garantir la stabilité du réseau suite à un défaut d'origine mécanique ou électrique. C'est pourquoi un système éolien devrait certainement assurer, à plus long terme, une continuité de service suite à n'importe quel type de défaut sur le réseau. Les défauts mécaniques et/ou électriques prévoyant les défaillances des différents constituants du système éolien, facilitant une réponse proactive, minimisant les arrêts brutaux causés par les pannes et par conséquent maximisant la productivité.

Après avoir dressé une description du système éolien et ses principaux constituants, puis on a cité les différents types des défauts mécaniques et leurs causes, les différentes méthodes de diagnostic de ces défauts.

Nous avons étudié de nombreux éléments pour obtenir un meilleur rendement des turbines, en mentionnant les défauts que vous pouvez rencontrer, nous pouvons augmenter la puissance souhaitable en ajustant l'angle d'inclinaison des pales pour capter le débit d'air maximum qui représente le défaut d'aube ainsi que le facteur multiplicateur (réducteur engrenage) pour transférer le maximum d'efficacité de la turbine à l'arbre secondaire, qui représente les erreurs des engrenages, puis nous avons abordé l'effet du facteur de frottement en cas d'augmentation de celui-ci.

En perspective, on suggère que cette étude pourrait être élargie à un calcul qui met en évidence les différents et multiples défauts de cassures des barres et/ou anneau de court-circuit dans son rotor ensuite les défauts de court-circuit dans son stator, rotor ainsi que l'obtention du temps de l'apparition de ces défauts.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013.
- [2] :Siteweb:<http://sitesfinal.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FilieEolienne/eolien.htm>.
- [3] :Ziraoui salah addin , Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau . UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA.2017
- [4] : N.H. Lipman, and D.G. In:field, "Wind-diesel systems", Wind Energy Conversion Systems, ed. L.L. Freris, Prentice Hall International (1990), pp. 330-356.
- [5] :connaissancedesenergies.org/le-point-sur-le-developpement-du-parc-eolien-
- [6] :S.M. Boudia, “Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie ”, Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013.
- [7] :<https://www.google.com/search?definition%20de%20l%27%C3%A9nergie%20%C3%A9olienne=energie+eolienne+algerie&sxsrf=ALiCzsYipuxnLZRPCRJjn3mDSBbY95Fg6g>
- [8] :Saki Ali & Belaidi Mourad «Étude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Énergie Electrique par Eolienne», Thèse de d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [9] : Frédéric POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [10] :<http://www.info-eolien.com/energie-eolienne-composants.html>.
- [11] :ziraoui salah addin Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau . UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA.2017.
- [12] :Yassine Amirat, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Elie Al-Ahmar, Bachir Bensaker and Sylvie Turri, A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 3, 9 (2009) 2629-2636..
- [13] :Lau B C P, Ma E W M, Pecht M, Review of O_shore Wind Turbine Failures and Fault Prognostic Methods, In Proceedings of IEEE Prognostics and System Health Management (PHM), 2012.
- [14] :L. W. M. M. Rademakers, A. J. Seebregts, B. A. V. D. Horn, J. N. T. Jehee, B. M. Blok, Methodology for probabilistic safety assessment of wind turbines , PSA of Wind Turbine, ECN-C-93-010, March 1993.
- [15]: Lau B C P, Ma E W M, Pecht M, Review of O_shore Wind Turbine Failures and Fault.

Références bibliographiques

- [16] :Yassine Amirat, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Elie Al-Ahmar, Bachir Bensaker and Sylvie Turri, A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 3, 9 (2009) 2629-2636.
- [17] :Yassine Amirat, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Elie Al-Ahmar, Bachir Bensaker and Sylvie Turri, A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 3, 9 (2009) 2629-2636.
- [18] :Le Luo, Lan Gao, Hehe Fu, "The Control and Modeling of Diesel Generator Set in Electric Propulsion Ship", *I.J. Information Technology and Computer Science*, 2011.
- [19] :Lau B C P, Ma E W M, Pecht M, Review of O₂ shore "Wind Turbine Failures and Fault Prognostic Methods", In *Proceedings of IEEE Prognostics and System Health Management (PHM)*, 2012, pages : 1-5.
- [20] :Poitiers Frédéric, "ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". Thèse de doctorat. Université de Nantes, 2003.
- [21] :B. Benyachou, F. Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. BahraModélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).
- [22] :IEEE Std 115, "Guide for Test Procedure for Synchronous Machines", IEEE Power Engineering Society, 2009.
- [23] : Saadi fatima Commande d'un Convertisseur Électromécanique : Application à un Système Éolien. Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique, 2014.
- [24] :Prof. Ali Keyhani «Department of Electrical and Computer Engineering The Ohio State University
- [25] : Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).
- [26] :DehoumFawzi& Djeddou Lakhdar, Cheriat El hachemi «Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de d'ingénieur, Université M'sila, 2011.
- [27] :P. E. Vidal, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse,

Références bibliographiques

Décembre 2004.

[28] :Adam MIRECKI, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,» INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.

[29] :Commande d'un Convertisseur Électromécanique : Application à un Système Éolien. Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique.saadi fatima.2014.

[30] :B. Robyns, B. François, Ph. Degobert et J-P. Hautier, « Commande vectoriel de la Machine asynchrone »; Edition Technip, Paris, 2007.

[31] :« Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Thèse de magister Université de Batna, Soutenu le 17/10/2010.

[32] :G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Mars 2007.

[33] : « Wind power in power systems »; John Wiley and Sons, Ltd, Londres, 2005.

[34] : : HACIL, Mahieddine. Amélioration des performances des énergies éoliennes. 2001.