

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
بلحاج بوشعيب جامعة عين تموشنت
Université–AinTemouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Electrotechnique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique
Thème :

Commande robuste du système d'énergies renouvelables

Présenté par :

M^{elle}.Benkrama Khedidja

Devant le jury composé de :

Dr ADJOU DJ Redouane

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Président

Pr MENDAZ khaira

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Examineur

Dr ALLAM Mohamed

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Encadrant



"Et dis : œuvrez, car Allah verra votre œuvre, ainsi que Son Messager et les croyants."

(Sourate At-Tawba, verset 105)

"Ils disent que les rêves sont faits pour la nuit,

Mais moi, j'ai choisi d'en faire ma réalité."

À chaque étape, j'ai compris que la réussite ne se donne pas, elle se construit, elle se mérite. L'éducation m'a appris à viser haut, à tenir bon face aux épreuves, et à toujours croire que le savoir est une lumière qu'Allah accorde à ceux qui persévèrent avec sincérité. Que ce projet soit une humble preuve et un rappel que, tant que la volonté guide nos pas, aucun sommet n'est hors d'atteinte.

DÉDICACE





Je dédie ce mémoire à ...

♥ *A ma mère Mokrane Kheira*

Génératrice officielle de courage, dont les douas ont sûrement plus boosté ce projet que n'importe quel algorithme !

♥ *A mon Père Benkrama Abdelhafid*

Le roi discret du "fais attention à toi", celui qui ne parle pas beaucoup, mais dont chaque regard dit : "Je crois en toi... mais vérifie les câbles quand même."

♥ *A mon très cher frère Yassine que j'adore*

Ingénieur en motivation improvisée, toujours là pour dire : "Tu stresses trop. Viens, on mange d'abord."

♥ *A Mon adorable sœur Fatima, la prune de mes yeux*

Mon assistante non déclarée, conseillère émotionnelle à plein temps, et spécialiste en "tu vas y arriver, je le sens !"

♥ *À MES AMIS DE TOUJOURS :*

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

♥ *A MOI MEME*

Vaillante guerrière des nuits blanches, dompteuse de rapports, buveuse de café, qui a survécu à Word, aux simulations qui plantent, et à la redoutable question : "T'as fini ton PFE ?"

Khedidja

Merçi



Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices; mes remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers « Allah » qui me a doté d'intelligence, et me a maintenu en santé, volonté, et la patience que m'a donnée durant toutes ces années d'études et pour la réalisation de ce travail modeste que j'espère être utile.

J'adresse le grand remerciement à mon encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire.

Mes profondes et sincères gratitudees à Mr. Dr ALLAM MOUHAMED, qui a accepté de m'encadrer. Sa gentillesse, son sérieux et son sens de la responsabilité ont été pour moi un précieux encouragement. Il n'a jamais hésité, malgré ses nombreuses obligations, à être à mon disposition, depuis le début de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de siéger à mon soutenance, je souhaite exprimer mon gratitude pour avoir faire de lecteur mon mémoire, aller l'examiner et ils peuvent évaluer cette mémoire. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarques. En particulier un grand merci pour les membres qui se trouvent au l'administration de génie électrique de notre université pour La coopération et la sympathie qu'ils m'ont toujours montré.

Je tien aussi à adresser mes vifs remerciements à tous les enseignants et chercheurs du UAT qui ont contribué à notre formation, à tous les amis, à tous ceux qui m'aidés de près ou de loin qui me soutenues moralement le long de ce travail et qui ont su créer une ambiance chaleureuse de camaraderie et de travail qui restera un souvenir que nous conservons de cette période.

Finalement, je tiens à exprimer mon profonde gratitude à mes parents, ainsi qu'à toute membres de famille qui m'ont toujours soutenues et participent de réaliser ce mémoire.

Introduction Générale	01
------------------------------------	----

Chapitre 1 : Généralités sur les Systèmes d'Énergie Renouvelable

I.1 Introduction	05
I.2 C'est quoi l'énergie renouvelables?	05
I.3 Fonctionnement Général des Systèmes d'Énergie Renouvelable	06
I.3.1 Géothermie	06
I.3.2 La biomasse	08
I.3.3 L'Énergie hydraulique	08
I.3.4 L'énergie solaire	09
a- L'énergie solaire thermique.....	09
b- les énergies solaires thermodynamiques.....	10
c- les énergies solaires photovoltaïques.....	10
I.3.5 l'énergie éolienne	11
I.3.5.1 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde.....	11
I.3.5.2 Différents types d'éolienne	12
a- Les éoliennes à axe vertical.....	12
b- Les éoliennes à axe Horizontal.....	12
I.3.5.3 Principales composantes des éoliennes.....	13
I.3.5.4 Les éoliennes connectées au réseau.....	14
a- Les éoliennes à vitesse fixe.....	14
b- Les éoliennes à vitesse variable.....	14
I.3.5.5 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	16
a- Système à décrochage aérodynamique "Pitch".....	16
b- Système à Décrochage Aérodynamique "Stall".....	16
c- Système a Décrochage Aérodynamique "Active Stall".....	17
I.3.5.6 Facteurs influant sur le rendement énergétique.....	17
I.3.5.6.1 La Surface Balayée Par Le Rotor.....	17
I.3.5.6.2 La Densité De l'air.....	17
I.3.5.6.3 La Vitesse Du Vent.....	18
I.3.5.7 Potentiel Eolien	18
I.3.5.7.1 L'énergie éolienne dans l'Algérie	19
I.3.5.7.2 Le vent en Algérie.....	19
I.3.5.8 choix de types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.....	19
I.4 Les énergies renouvelables en Algérie	20
I.5 Avantages et Inconvénients des Énergies Renouvelables	21
I.5.1 Avantage.....	21
I.5.2 Inconvénients.....	21
I.6. Conclusion	23

Chapitre 02 : Modélisation d'une Chaîne de Conversion Éolienne

II.1 Introduction	25
II.2 Chaîne de Conversion Éolienne	25
II.3 Modélisation du système éolien	26
II.3.1 Partie Aérodynamique (le Vent).....	26
II.3.2 Partie mécanique.....	27
II.3.2.1 Modélisation de la Turbine Éolienne	27
II.3.2.2 Modèle de pales.....	28

a-	Le coefficient de puissance C_p	28
b-	Puissance du vent.....	29
c-	La puissance aérodynamique	29
d-	Le Couple Aérodynamique à la Sortie d'une Turbine Éolienne.....	29
II.3.2.3	Modélisation du Multiplicateur de Vitesse.....	30
II.3.2.4	Modèle de l'arbre.....	31
II.3.2.5	Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	33
II.3.2.5.1	Bilan de puissance.....	34
II.3.2.5.2	Technique d'extraction du maximum de puissance MPPT.....	34
a-	Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....	34
b-	Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de Rotation.....	35
II.3.3	Partie électrique.....	36
II.3.3.1	Description de la MADA.....	36
II.3.3.2	Mode de fonctionnement de la MADA.....	37
II.3.3.3	Domaine d'applications de MADA.....	38
II.3.3.4	Avantages et inconvénients.....	39
II.3.3.4.1	Avantages de la MADA.....	39
II.3.3.4.2	Inconvénients de la MADA.....	39
II.3.3.5	Modélisation de La Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	40
II.3.3.5.1	Hypothèses simplificatrices.....	40
II.3.3.5.2	Représentation du modèle dans le repère (d,q)	42
a-	Choix de référentiel.....	43
b-	L'application de la transformation de Park.....	43
II.3.3.5.3	Représentation d'état de la machine.....	45
a-	Expression du couple.....	46
b-	Expressions des puissances.....	47
II.3.4	Modélisation de l'Interface Électronique de Puissance.....	47
II.3.4.1	Modélisation et commande des convertisseurs de puissance.....	47
II.3.4.2	Commande du convertisseur par Modulation Sinus Triangle.....	48
II.4	Présentation De L'environnement Simulink.....	49
II.5	interprétations et résultats.....	49
a-	Profil du vent appliqué au système étudié.....	49
b-	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β	50
c-	Coefficient de couple C_c en en fonction de λ et β	50
d-	Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.....	51
e-	Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.....	51
f-	MPPT sans asservissement de vitesse mécanique.....	52
i-	MPPT avec asservissement de vitesse mécanique.....	53
j-	la GADA couplée à la turbine éolienne.....	54
II.6	Conclusion.....	56
Chapitre 03 : Commande Vectorielle		
III.1	Introduction.....	58
III.2	Principe de la commande vectorielle.....	58
III.3	Schéma de commande.....	58
III.4	Choix du référentiel et principe de la commande.....	59
III.5	Relation entre tensions et courants	61
III.6	Découplage entre les tensions rotorique sur les axes directs et en quadrature.....	62

III.7 Description du GADA.....	62
III.8 Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) ».....	63
III.9 Simulation et interprétation des résultats.....	65
III.9.1 Commande vectorielle direct	65
III.9.2 Commande vectorielle indirect.....	67
III.10 Conclusion.....	71
Chapitre 04 : La Commande Floue	
IV.1 Introduction.....	73
IV.2 Un peu d’histoire.....	73
IV.3 Domaines d’application	73
IV.4 Rappels des principes de la logique floue.....	74
IV.5 Théorie des ensembles flous.....	74
IV.6 Variables Linguistique.....	75
IV.7 Les fonctions d’appartenance.....	76
IV.8 Opération sur les ensembles flous.....	77
IV.9 Réglage et Commande par la logique floue.....	78
IV.9.1 Principe d’un régulateur flou.....	79
IV.9.1.1 Base de règles.....	79
IV.9.1.2 Moteur d’inférence floue	79
IV.9.1.3 Fuzzification.....	80
IV.9.1.4 Défuzzification.....	80
IV.10 Application de la logique floue à la commande de la MADA.....	80
IV.10.1 Synthèse du régulateur.....	81
IV.10.2 Loi de commande.....	81
IV.10.3 Régulateur.....	81
IV.10.3.1 Choix des Entrées / Sorties.....	82
IV.10.3.2 Définition des fonctions d’appartenance.....	82
IV.10.3.3 Base de règle.....	82
IV.10.3.4 Défuzzification.....	83
IV.11 Résultats et interprétations.....	83
IV.12 Conclusion.....	88
Conclusion Générale et persperties.....	90
Bibliographie.....	93
Résumé.....	94
Annexe.....	97

Notations

v	Vitesse du vent	m/s
P_v	Puissance de la masse d'air qui traverse la surface S	W
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine	W
λ	Ratio de vitesse	-
R	Rayon de la turbine éolienne	m
Ω_t	Vitesse mécanique de rotation de l'aérogénérateur	rad/s
Ω_t^*	Vitesse de référence de la turbine	rad/s
β	Angle de calage des pâles	deg
G	Gain du multiplicateur	-
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
$\Omega_{méc}^*$	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rad/s
C_t	Couple de la turbine avant le multiplicateur	N.m
$C_{t-optimal}$	Couple aérodynamique optimal	N.m
$C_{méc}$	Couple mécanique après le multiplicateur	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine	N.m
C_f	Couple de frottement visqueux	N.m
J_g	Moment d'inertie de la génératrice	Kg.m ²
J_t	Moment d'inertie de la turbine	Kg.m ²
J_T	Moment d'inertie Total (génératrice + turbine)	Kg.m ²
f_r	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice	N.m.s/rd
$P_{s-réf}$	Puissance active statorique de référence	W
Q_s	Puissance réactive statorique	W
$Q_{s-réf}$	Puissance réactive statorique de référence	W
g	Glissement de la MADA	-

Glossaire

AC	: Alternating Current.
DC	: Direct Current.
MS	: Machine Synchronne.
MAS	: Machine Asynchrone.
GADA	: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
CCM	: Convertisseur Côté Machine.
CCR	: Convertisseur Côté Réseau.
MLI	: Modulation de Largeur Impulsion.
MCC	: Machine à Courant Continu.
CVD	: Commande Vectorielle Directe.
CVI	: Commande Vectorielle Indirecte.
PI	: Proportionnelle Intégral.
CSV	: Commande à Structure Variable.
FSMC	: Fuzzy Sliding Mode Control.
DFIM	: Doubly fed Induction Machine.
dqo	: direct, quadrature et homopolaire

Chapitre 01 : les Systèmes d'Énergies Renouvelables		
Figure	Titre	Page
01	Distribution des valeurs des énergies renouvelable [3]	05
02	Le principe de la géothermie [5].	06
03	Graphique de l'utilisation de l'énergie géothermique [7]	07
04	Carte de température des sources thermiques vents en Algérie [8]	07
05	Energie de biomasse [9]	08
06	Schémas d'une centrale hydraulique [10]	08
07	Energie solaire thermique [5]	09
08	Energie solaire thermodynamique [5]	10
09	Energie solaire photovoltaïque [7]	10
10	Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne [2]	11
11	Capacité totale installée (MW)	11
12	Les éoliennes à axe vertical [6]	12
13	Les éoliennes à axe Horizontal [4]	13

14	Principales composants de l'éolienne [7]	13
15	Éolienne directement connectée au réseau [6]	14
16	Éoliennes à vitesse variable [6]	15
17	La relation entre la puissance et la vitesse variable [6]	15
18	La variation de l'angle de calage d'une pale [5]	16
19	Flux d'air sur un profil de pale " stall "[5]	16
20	Flux d'air sur un profil de pale " Active stall "[5]	17
21	Puissances selon les tailles des éoliennes [3]	17
22	Carte d'énergie éolienne [8]	19
23	Répartition d'énergie renouvelable dans l'Algérie [10]	20

Chapitre 02 : Modélisation d'une Chaîne de Conversion Éolienne		
Figure	Titre	Page
01	Schéma simplifié d'une chaîne e convention éolienne [3]	25
02	Schéma de modélisation d'une chaîne e convention éolienne [4]	26
03	Modèle mécanique simplifié de la turbine [7]	27

04	Modèle de la turbine éolienne [10]	27
05	Modèle d'équation de la turbine éolienne [12]	28
06	Modèle mécanique de la turbine éolienne [15]	29
07	Image réel d'un multiplicateur [17]	30
08	Model d'un multiplicateur [18]	31
09	Model d'un arbre [18]	31
10	Model d'une turbine éolienne [18]	32
11	Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne [1]	32
12	Zones de fonctionnement de la turbine éolienne [4]	33
13	Bilan de puissance la turbine éolienne [8]	34
14	Stratégies de MPPT [16]	34
15	Stratégie MPPT avec Asservissement de la vitesse [6]	35
16	Stratégie MPPT sans Asservissement de la vitesse [6]	35
17	Structure de la machine asynchrone à double alimentation [12]	37
18	Les quatre quadrants du fonctionnement de la MADA [20]	38
19	Référentiel tournant d'axes (d-q)	43

20	Modèle du convertisseur de puissance [14]	47
21	La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle [4]	48
22	Matlab Simulink [16]	49
23	Simulation du Profil du vent appliqué	49
24	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β	50
25	Coefficient de couple C_{cen} fonction de λ et β	50
26	Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation	51
27	Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation	51
28	Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse mécanique	52
29	Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse mécanique	53
30	Résultats de simulation du MPPT de la GADA couplée à la turbine	56

Chapitre 03 : La Commande vectorielle		
Figure	Titre	Page
01	Principe de la commande vectorielle [3]	58
02	Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA [4]	59
03	Orientation de l'axe d sur le flux statorique [5]	59
04	Description des couplages [5]	61
05	Commande de MADA [5]	62
06	Schéma bloc du système GADA [3]	62
07	Commande vectorielle direct [3]	63
08	Commande vectorielle indirect [3]	63
09	Schéma bloc du système régulé par un PI [3]	64
10	Résultats de simulation de la CVD à vitesse variable de la GADA	66
11	Commande vectorielle de la GADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable	66
12	Résultats de simulation de la CVI à vitesse variable de la GADA.	67

13	Commande vectorielle de la GADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable	68
14	Résultats de simulation des teste de robustesse à vitesse variable de la GADA	69

Chapitre 04 : La Commande floue

Figure	Titre	Page
01	Fonction d'appartenance : (a) logique classique : (b) logique floue [10]	74
02	Fonctions d'appartenance de pression (T) [10]	75
03	Fonctions d'appartenance associées à A et B	77
04	Fonctions d'appartenance associées à A et B	78
05	Schéma synoptique général d'un système flou	79
06	Schéma bloc de régulation par régulateur flou	81
07	les règles de décision.	82
08	Résultats de simulation de la commande floue à vitesse variable de la GADA.	84
09	Résultats de simulation pour un facteur de puissance unitaire de la commande floue à vitesse variable de la GADA.	85

10	Résultats de simulation pour étude de robustesse de la commande floue à vitesse variable de la GADA.	85
11	Résultats de simulation pour étude de THD de 03 commandes à vitesse variable de la GADA.	87

Chapitre 01 : les Systèmes d'Énergie Renouvelable		
Tableau	Titre	Page
01	Projets d'énergie renouvelable dans l'Algérie [10]	21

Chapitre 03 : La Commande vectorielle		
Tableau	Titre	Page
01	Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle directe et indirecte.	70
02	Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle directe et indirecte.	70

Chapitre 04 : La Commande floue		
Tableau	Titre	Page
01	Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle et la commande floue.	86
02	Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle et la commande floue	86



Introduction Générale

Moulin perse VIIe siècle

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » — Antoine Lavoisier

Depuis des décennies, l'humanité est confrontée à un défi énergétique majeur : comment satisfaire une demande sans cesse croissante tout en préservant notre environnement et en garantissant un avenir durable pour les générations futures ?

Le modèle énergétique basé sur l'exploitation massive des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz ...) atteint aujourd'hui ses limites. Non seulement ces ressources sont limitées, mais leur utilisation engendre des conséquences environnementales graves, telles que le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique et l'épuisement des écosystèmes [1].

Face à ces constats, la transition vers des sources d'énergie renouvelable est devenue une nécessité stratégique, économique et écologique. Parmi les alternatives prometteuses, l'énergie éolienne s'impose comme l'une des plus matures et des plus accessibles. Grâce à sa capacité à produire de l'électricité sans émissions polluantes, elle constitue une réponse crédible aux enjeux de développement durable, que ce soit pour l'alimentation de sites isolés ou en complément des réseaux électriques existants [2].

Cependant, la production éolienne est par nature variable, soumise aux fluctuations du vent et à l'incertitude des conditions météorologiques. Cette instabilité requiert la mise en œuvre de stratégies de commande, capables de garantir un fonctionnement fiable et optimal des systèmes, quelles que soient les conditions de fonctionnement. C'est dans ce contexte que la commande robuste prend toute son importance. Elle vise à assurer la stabilité et la performance du système, même en présence de perturbations externes ou d'incertitudes sur les paramètres du modèle.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique, en se focalisant sur la commande robuste d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance, basée sur une génératrice asynchrone double alimentation à axe horizontal. Ce type de génératrice présente de nombreux avantages, notamment une meilleure densité énergétique, une fiabilité accrue et un rendement élevé, ce qui le rend particulièrement adapté aux systèmes éoliens modernes.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier, modéliser et simuler l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne, tout en développant des stratégies de commande performantes, adaptées aux différents modes de fonctionnement. Une attention particulière sera portée sur la puissance active et réactive, malgré les variations du vent et de la charge.

Pour répondre à ces objectifs, le mémoire est structuré en **quatre chapitres** :

- **Le premier chapitre** propose un état de l'art sur les systèmes renouvelables surtout celles de éolienne, leurs composants et leurs différents modes de fonctionnement. Il introduit également les architectures de chaînes de conversion, et met en évidence les avantages de la Machine A Double Alimentation dans ce type d'application.

- **Le deuxième chapitre** est consacré à la chaîne de conversion d'énergie éolienne , la modélisation aérodynamique, la modélisation du Machine à double alimentation et des convertisseurs statiques. Les modèles sont implémentés sous Matlab/Simulink.
- **Le troisième chapitre** ;Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande vectorielle, une technique largement utilisée dans le domaine des machines électriques. À travers une modélisation mathématique rigoureuse, nous avons implémenté cette commande dans l'environnement Matlab/Simulink afin de vérifier la capacité de la commande vectorielle à assurer une régulation performante, avec un bon suivi des références et une réduction notable des ondulations.
- **Enfin, le quatrième chapitre** Bien que la commande vectorielle offre de bonnes performances dans des conditions nominales, elle peut montrer certaines limites en présence de perturbations externes ou d'incertitudes liées à la modélisation. Pour pallier ces insuffisances, nous avons exploré une approche plus robuste : la commande floue.

Notre travail se termine par des références bibliographiques et une conclusion générale.

Ce travail vise ainsi à contribuer à l'optimisation des petites installations éoliennes autonomes ou hybrides, en mettant l'accent sur la robustesse et la fiabilité du système de commande.



CHAPITRE I
Les Systèmes d'Énergie
Renouvelable

Moulin européenne XI siècle

I.1 Introduction

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux. La richesse des sources d'énergies renouvelables se retrouve dans la variété des produits et vecteurs énergétiques qu'elles permettent de fournir : énergie thermique (capteurs solaires thermiques, géothermie...), combustibles solides, liquides et gazeux (biocombustibles et biocarburants, biogaz), électricité (hydroélectricité, centrales géothermiques et à biomasse, énergie éolienne, photopiles...) [1].

Cette variété permet aux énergies renouvelables de pénétrer le marché des services énergétiques de tous les secteurs économiques : agriculture, industrie, habitat et transports. Cette pénétration peut se faire soit par le biais de l'accès aux réseaux électriques, ou par le biais d'applications décentralisées (chaudières à bois et chauffage solaire intégrés à chaque bâtiment, électrification rurale décentralisée par petits aérogénérateurs et systèmes photovoltaïques, pompes solaires, etc) [2].

Nous présenterons dans ce chapitre les différentes sources d'énergies renouvelables pour la production de l'électricité et nous détaillerons plus sur l'énergie éolienne. Nous présenterons également, l'intégration de ces énergies au marché algérien, en montrant l'intérêt de ces systèmes.

I.2 C'est quoi l'énergie renouvelables?

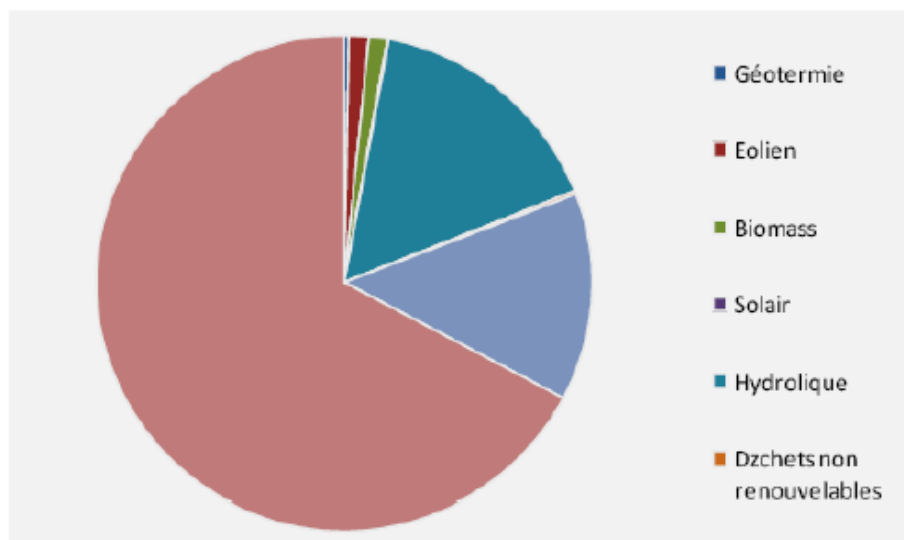


Figure I.1 : Distribution des valeurs des énergies renouvelable [3].

Le terme « énergie renouvelable » est relativement récent « apparition en 1970 », la totalité des énergies qu'existe depuis quasiment l'origine de la terre et leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines voire à plusieurs milliers d'années. La biomasse fut utilisée notamment pour se chauffer, et développer l'industrie des métaux. L'énergie thermique solaire fut mobilisée pour sécher les aliments, les céréales ou le foin. Les sources géothermales furent à l'origine de nombreuses implantations humaines. L'énergie hydraulique fut utilisée en Perse et dans L'empire Romain il y a plus de deux millénaires [4].

L'Europe du moyen âge redécouvrit les techniques et les utilisa à grande échelle (moulins à vent, moulins à marée, moulins hydrauliques) pour moudre les céréales, pomper l'eau, entrainer des martinets ou fabriquer de papier par exemple. Et avec le progrès des machines

thermiques, les puissances croissantes demandées par les concentrations industrielles et les impératifs de productivités allaient rendre obsolètes ces générateurs mécaniques à faible puissance [4].

On parle généralement que une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie d'humanité [2].

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs avantages.

I.3 Fonctionnement Général des Systèmes d'Énergie Renouvelable

Chaque système d'énergie renouvelable repose sur un principe de conversion d'une source naturelle en énergie utilisable :

I.3.1 Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C [5].

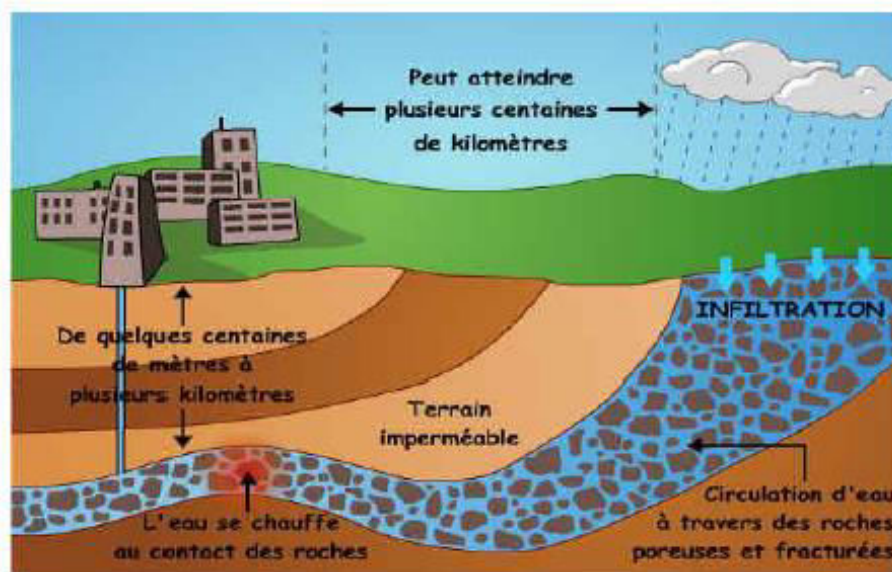


Figure I.2 : le principe de la géothermie [5].

Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000 °C à 4300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [6].

Types de géothermie existent selon la température de gisement :

- La géothermie à haute énergie

- La géothermie à basse énergie
- La géothermie à très basse énergie

La géothermie est une énergie qui ne se transporte pas ou très peu car le transport par canalisation coûte cher et les pertes sont très importantes [7].

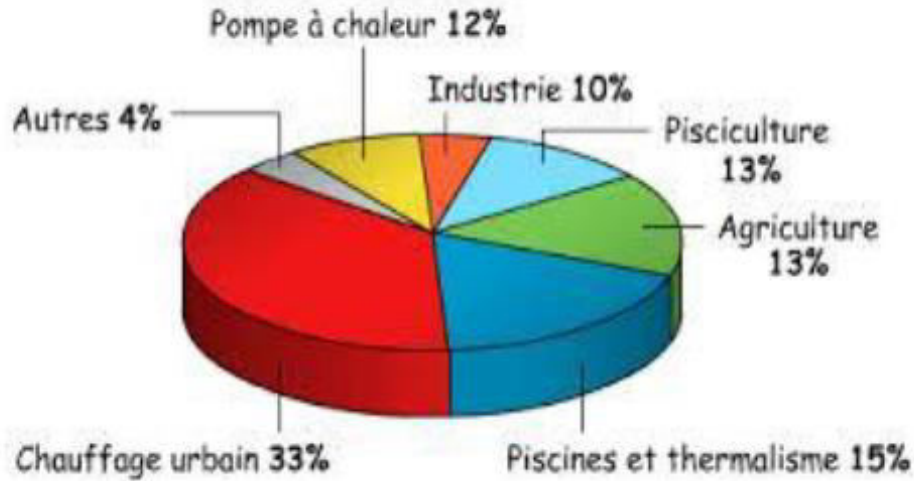


Figure I.3 : Graphique de l'utilisation de l'énergie géothermique [7].

Potentiel de l'énergie géothermique [8]

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire (figure I.4). Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5 °C/100 m :

- Zone de Relizane et Mascara ;
- Zone d'AïneBoucif et Sidi Aïssa ;
- Zone de Guelma et Djebel El Onk.

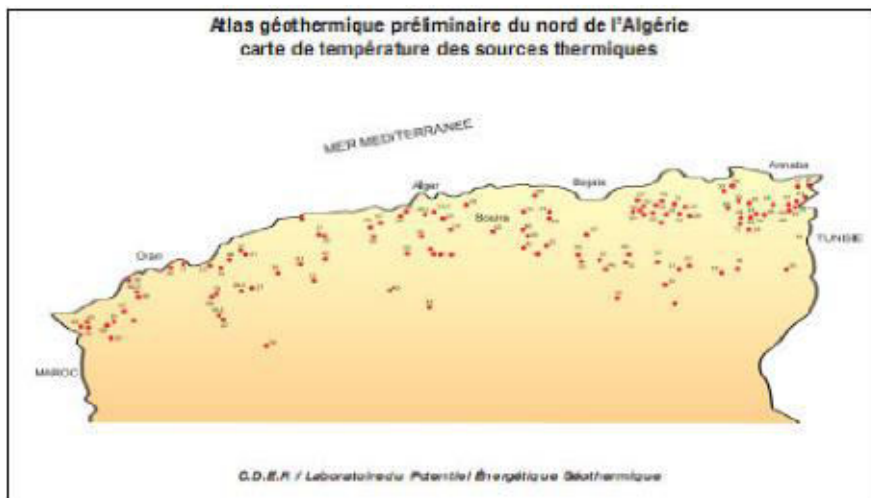


Figure I.4 : Carte de température des sources thermiques vents en Algérie [8].

I.3.2 La biomasse :

La « biomasse » est un terme général qui fait référence aux matières organiques et qui englobe les plantes, les arbres. Il y a plusieurs façons de transformer la biomasse en chaleur et en électricité, dont la combustion directe, la digestion anaérobie, la pyrolyse et la gazéification [9].



Figure I.5 : Energie de biomasse [9].

Potentiel de la Biomasse [8]

a) Potentiel de la forêt

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole).

Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

b) Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

Cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de TEP/an.

I.3.3 L'Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique désigne l'énergie qui provient de la force des eaux (cours d'eau et océans). Les centrales hydroélectriques ou usines marémotrices transforment l'énergie de la gravité de l'eau en énergie électrique grâce au courant de l'eau passant dans les turbines [10].

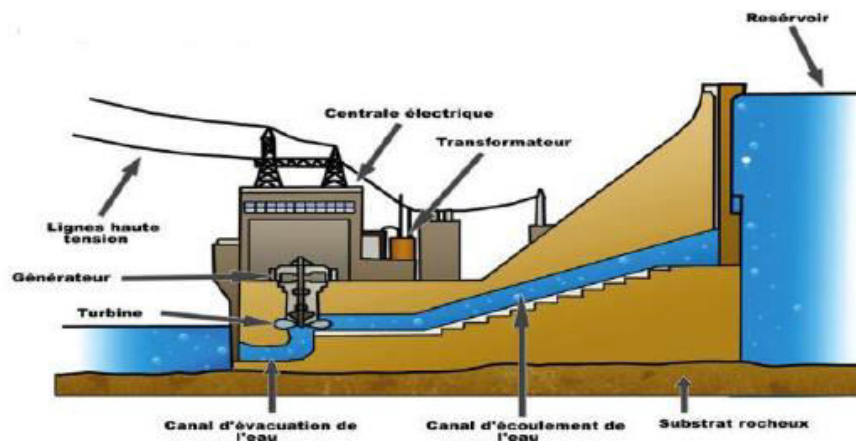


Figure I.6 : Schémas d'une centrale hydraulique [10].

Les types de l'énergie hydraulique [10]

- Energie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues.
- Energie marémotrice : issue du mouvement de l'eau créé par les marées.
- Energie hydrolienne : les hydroliennes utilisent les courants sous-marins.
- Energie thermique des mers : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
- Energie osmotique : la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie.

Le potentiel hydraulique [8]

Le secteur hydraulique possède 103 sites de barrage qui sont recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. Les quantités globales tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud.

I.3.4 L'énergie solaire

Est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire [1].

L'énergie solaire est divisée en trois d'énergies :

a) L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est dérivée du rayonnement du soleil qui augmente la température d'un corps exposé sous ce rayonnement. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée dans la vie quotidienne. L'énergie solaire est essentiellement utilisée pour le chauffage de l'eau, de l'air, ou d'un bâtiment tout entier.

Le principal intérêt de l'énergie solaire thermique, c'est sa simplicité : les panneaux destinés au chauffage sont simples, solides, résistants et durables [5].

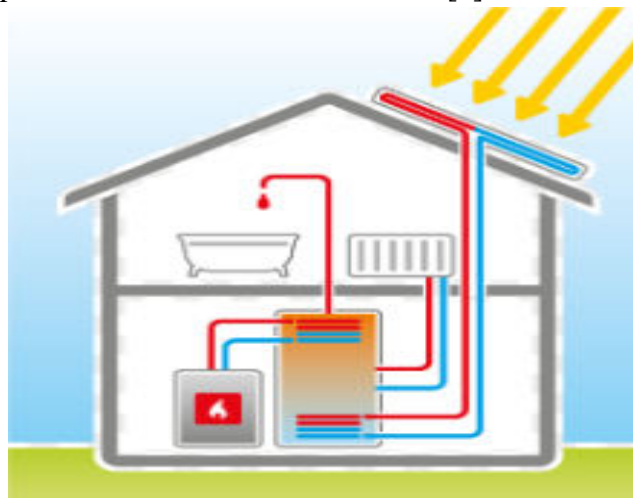


Figure I.7 : énergie solaire thermique [5].

b) les énergies solaires thermodynamiques

L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels [5].



Figure I.8 : énergie solaire thermodynamique [5].

c) les énergies solaires photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique : une borne négative et une borne positive, la lumière met en mouvement des électrons pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière est naturelle (soleil) donc renouvelable [7].

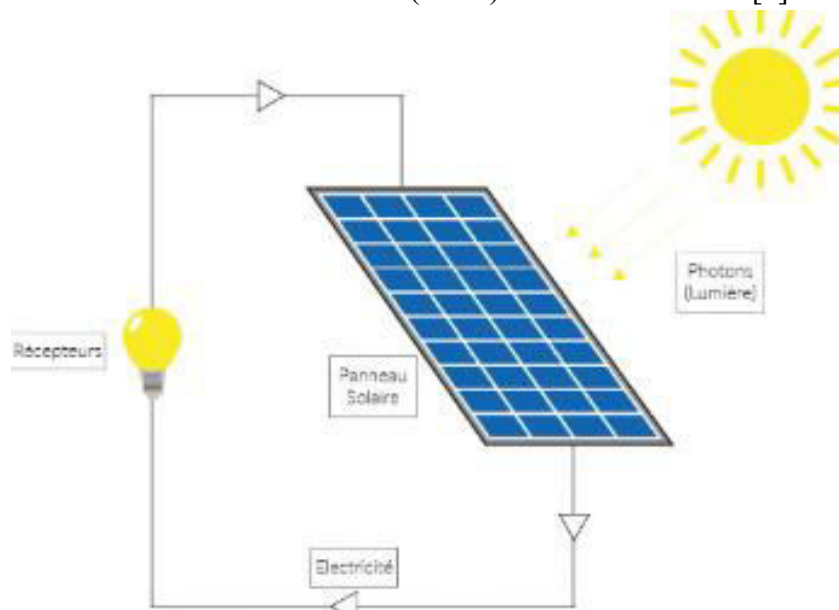


Figure I.9 : énergie solaire photovoltaïque [7].

Potentiel solaire [8]

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les gisements plus élevés dans le monde. Les possibilités de l'énergie solaire en Algérie sont assises sur trois parties : Désert, les hauts plateaux et le sahel, nous trouvons la zone désertique occupe la scène avec une durée moyenne du rayonnement solaire d'une valeur de 3500 heures /an et sa valeur est de 2650 KWh /m²/an,

puis les hauts plateaux avec 3000 heure/an et sa valeur est de 1900 KWh/m²/an, et en dernier le sahel avec 2650heure /an et sa valeur est de 1700 kWh/m²/an.

I.3.5 l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [2].

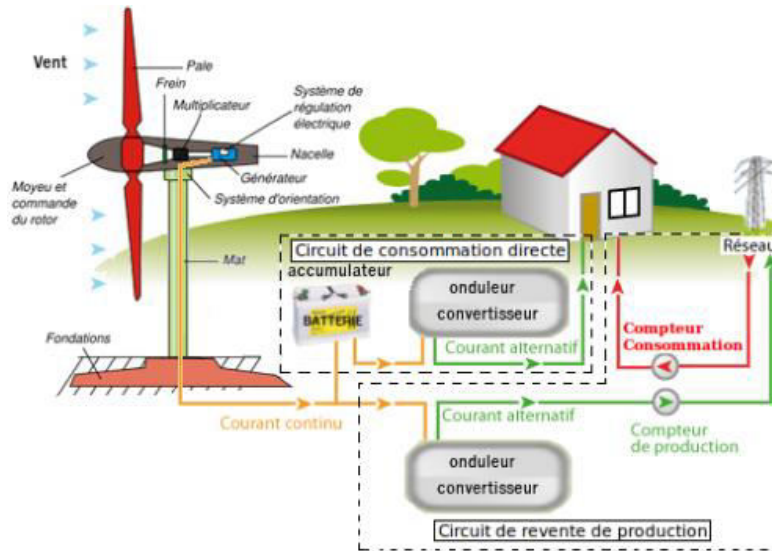


Figure I.10: Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne [2].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

I.3.5.1 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le mode

En 2024, la capacité mondiale de l'énergie éolienne a dépassé les 1 130 GW, avec une forte contribution de la Chine, des États-Unis et de l'Europe. Le secteur continue de croître, notamment grâce à l'éolien terrestre, tandis que l'offshore se développe plus lentement. Malgré cette expansion [2].



Figure I.11: Capacité totale installée (MW).

I.3.5.2 Différents types d'éolienne

a) Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [8] [3] et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts[4].Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement.

De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal[5] [6].

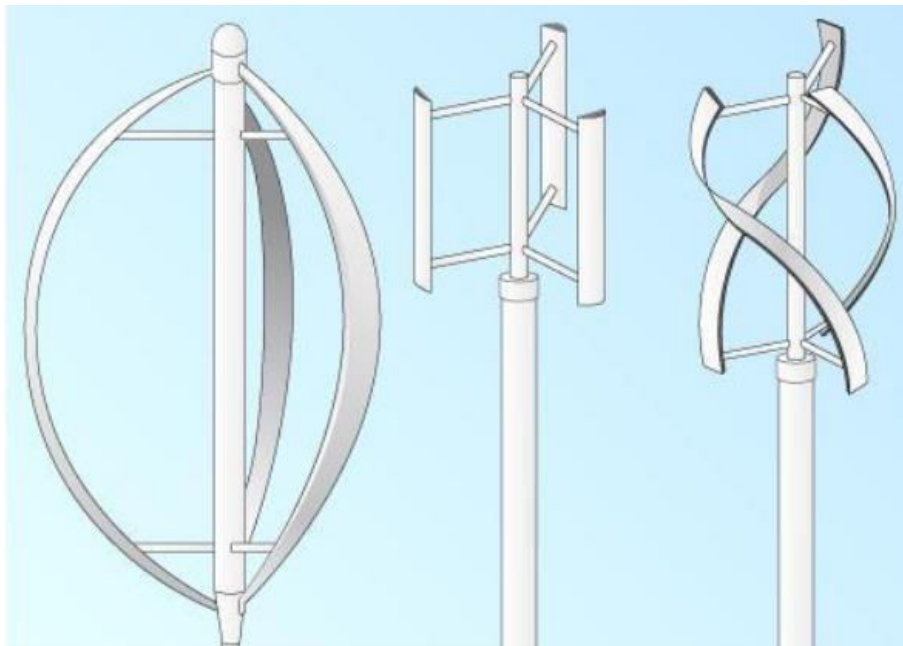


Figure I.12: Les éoliennes à axe vertical [6].

b) Les éoliennes à axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des dynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [4].

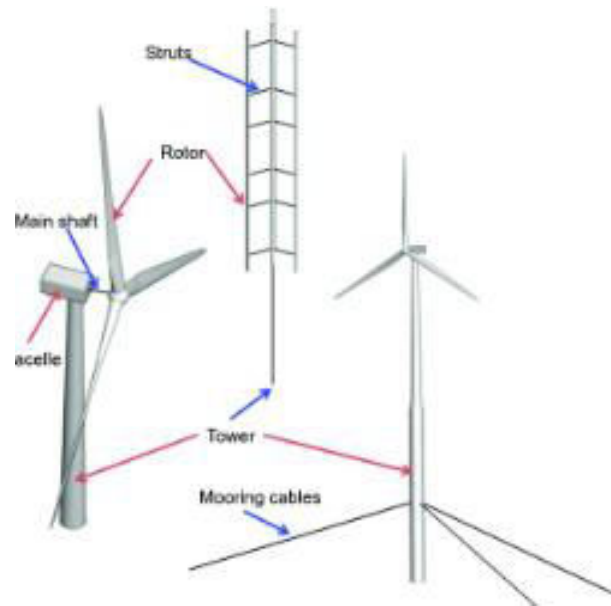


Figure I.13: Les éoliennes à axe Horizontal [4].

I.3.5.3 Principales composantes des éoliennes

L'éolienne à axe horizontal, étant le sujet de notre étude, sera décrit en citant ses différents composants. En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [6] [7].

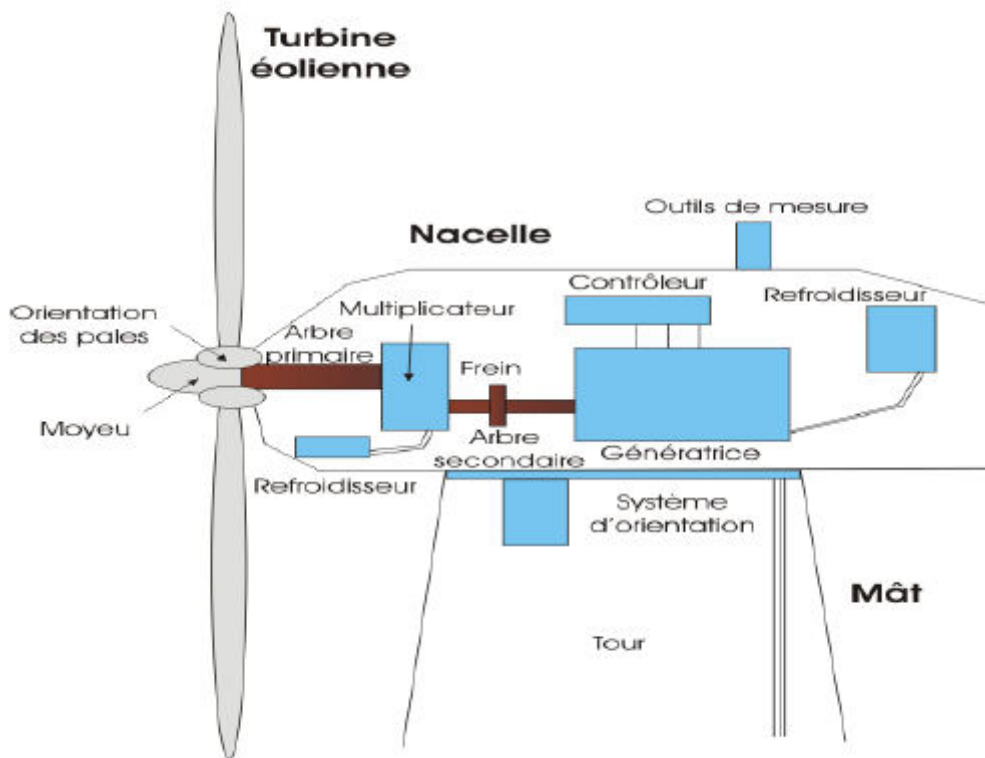


Figure I.14: Principales composantes de l'éolienne [7]

- **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.

- **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

I.3.5.4 Les éoliennes connectées au réseau

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de famille d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées et les éoliennes à vitesse variable [6].

a) Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice[6].

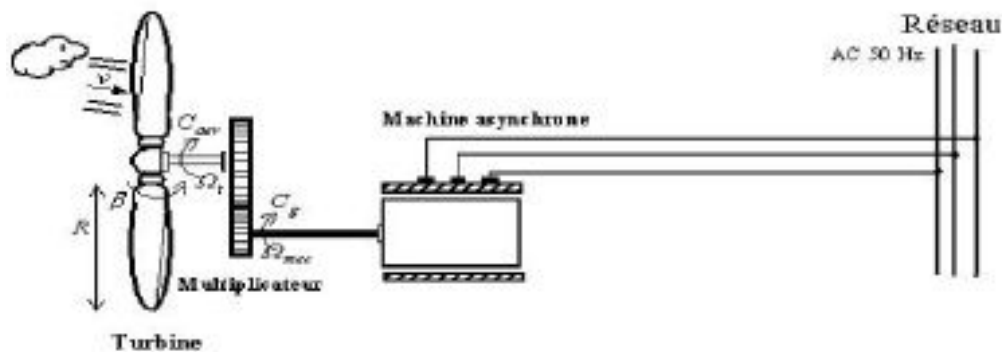


Figure I.15: Éolienne directement connectée au réseau [6].

b) Les éoliennes à vitesse variable

La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

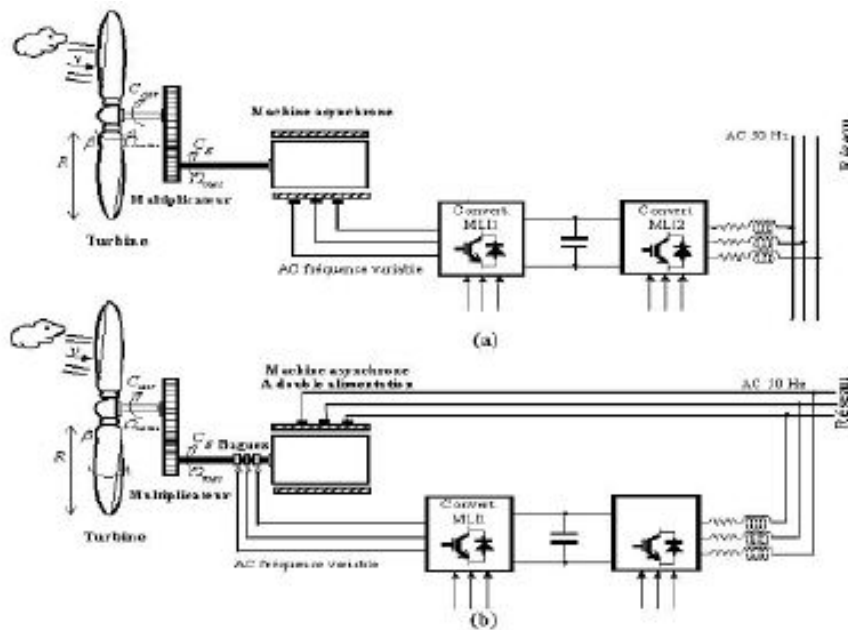


Figure I.16: Éoliennes à vitesse variable [6].

Suivant la figure (I.17), pour une vitesse de vent et une vitesse mécanique de la génératrice on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure. Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [10].

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite.

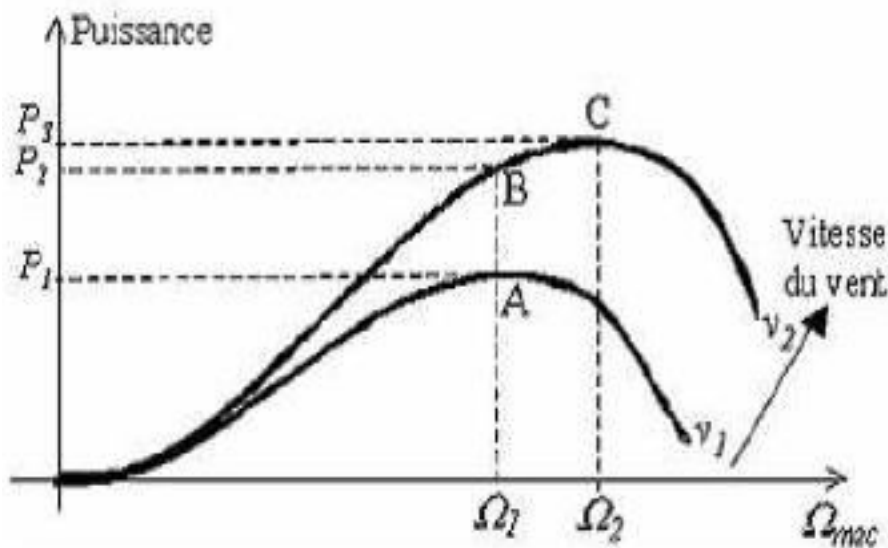


Figure I.17: la relation entre la puissance et la vitesse variable [6].

I.3.5.5 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse.

a) Système à décrochage aérodynamique "Pitch"

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment [5]. C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

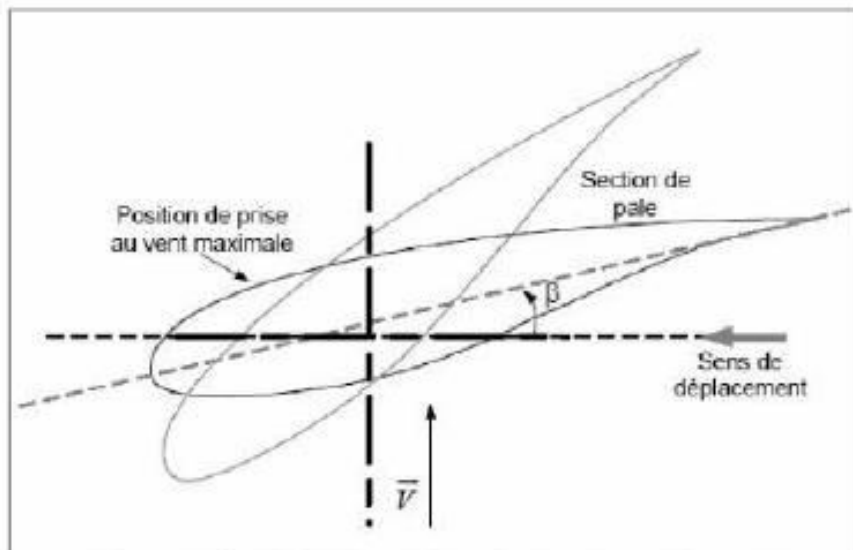


Figure I.18: la variation de l'angle de calage d'une pale [5]

b) Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique [6].

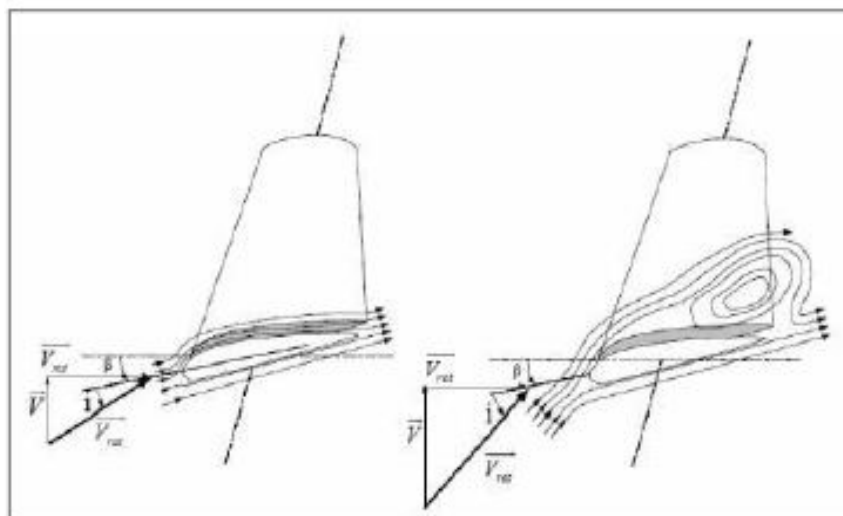


Figure I.19: Flux d'air sur un profil de pale "stall" [5]

c) Système a Décrochage Aérodynamique "Active Stall"

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « Stall » et de la régulation« Pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [5].

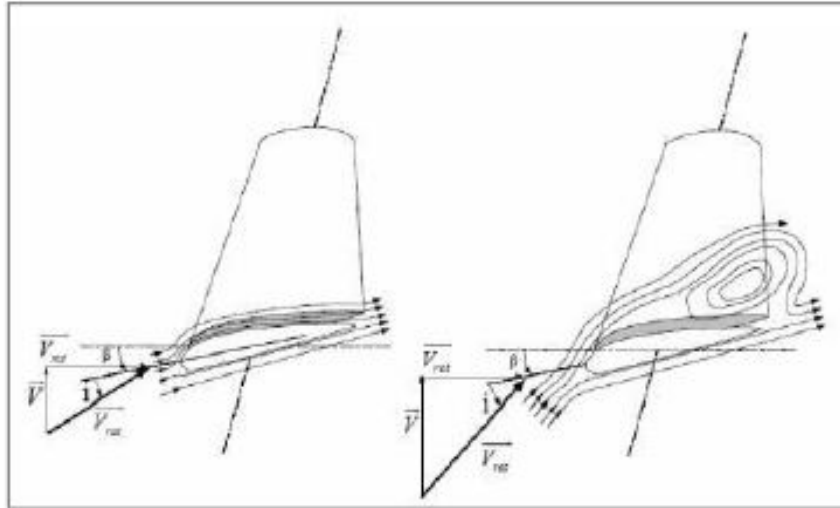


Figure I.20: Flux d'air sur un profil de pale " Active stall "[5]

I.3.5.6 Facteurs influant sur le rendement énergétique

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

I.3.5.6.1 La Surface Balayée Par Le Rotor

La surface de disque balayée par le rotor (ainsi que la vitesse du vent, évidemment) détermine la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année [2]. Peut vous donner une idée des diamètres généraux du rotor, valables pour les différentes tailles d'éoliennes [3].

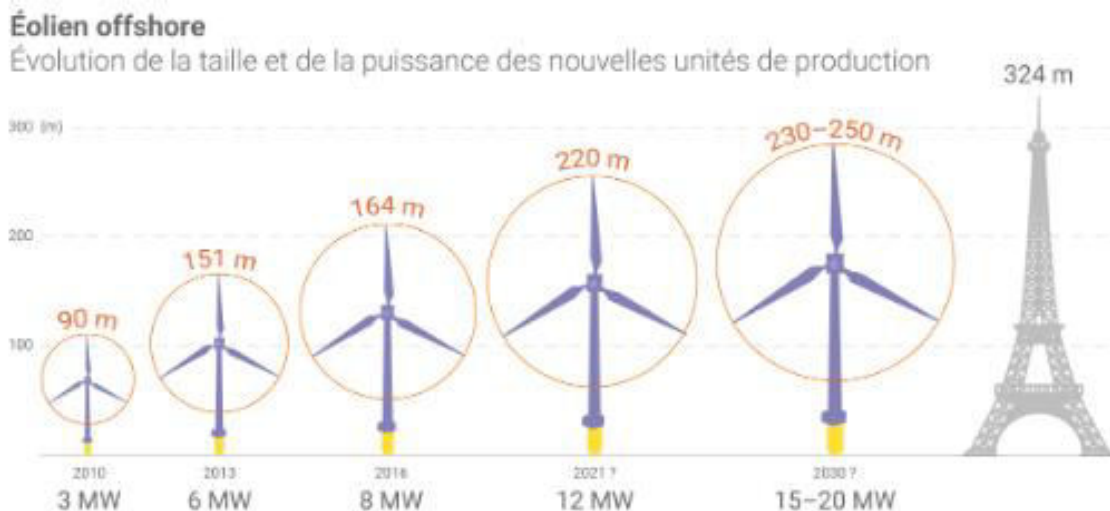


Figure I.21: Puissances selon les tailles des éoliennes. [3]

I.3.5.6.2 La Densité De l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à.-d. La masse de l'air par

unité de volume. Où autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante. A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité augmente un peu lorsque l'humidité de l'air augmente.

De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. [9]

I.3.5.6.3 La Vitesse Du Vent

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent. L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de la capacité énergétique de $2 \times 2 \times 2 = 8$ fois.

En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air à travers le rotor par seconde, chaque disque transportant quatre fois plus d'énergie [10].

I.3.5.7 Potentiel Eolien [8]

Le programme EnR algérien prévoit, suite à des études qui seront menées pour détecter les emplacements favorables, la réalisation de plusieurs projets sur la période allant jusqu'à 2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen, le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée, montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel).

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s)

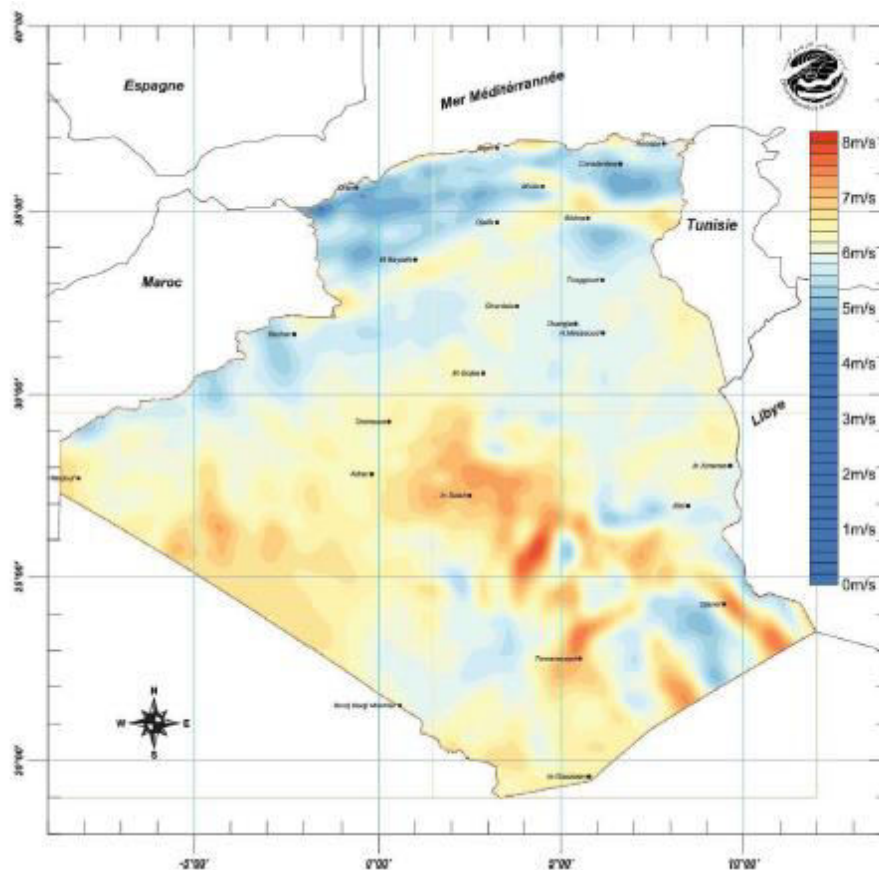


Figure I.22: carte d'énergie éolienne. [8]

I.3.5.7.1 L'énergie éolienne dans l'Algérie

L'estimation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure. La quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour.

Alors l'Algérie est un pays qui est placé dans un lieu trop riche avec des sources des énergies développées. L'éolienne dans les grandes régions (ouest et nord même les hauts plateaux) d'Algérie est très facile pour étudier tel que dans certaines villes algériennes, le vent est très fort comme le Ouest Algérienne (Adrar et Tiaret et Oran...Etc.) [1]

I.3.5.7.2 Le vent en Algérie

Les vents « GISEMENT EOLIEN » de l'Algérie commencent à être timidement étudiés. L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Lorsque les vents dans une zone ou une région sont définis comme source d'énergie, des études approfondies doivent être faites selon les aérogénérateurs que l'on désire installer. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne [3].

I.3.5.8 choix de types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

Sur ce et à travers nos lectures il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement.

I.4 Les énergies renouvelables en Algérie

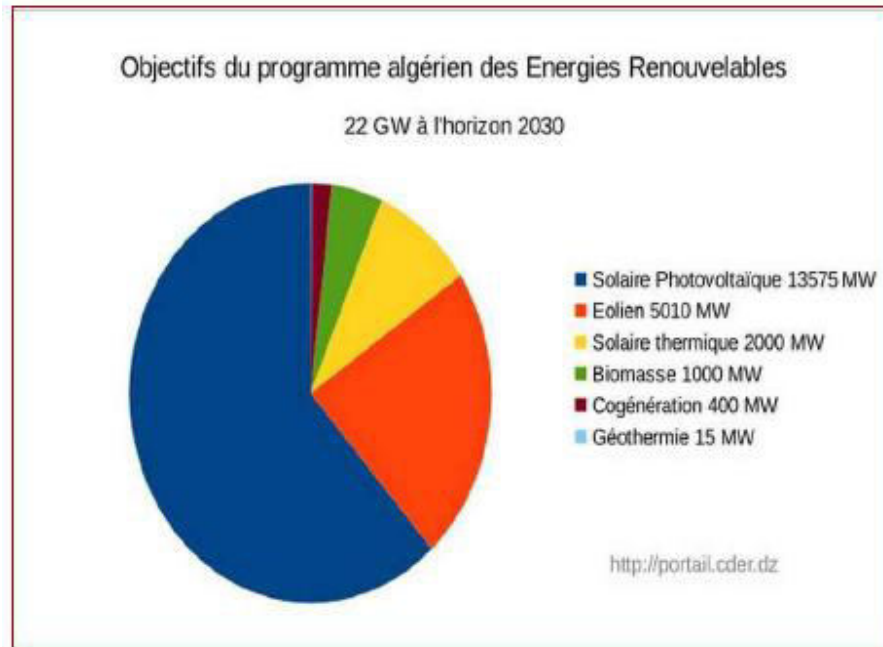


Figure I.23 : Répartition d'énergie renouvelable dans l'Algérie [10].

L'Algérie se classe au 17^e rang mondial des producteurs de pétrole et occupe la troisième place en Afrique, derrière l'Angola et le Nigeria. Elle est également le premier producteur africain de gaz naturel et se positionne au neuvième rang mondial. Toutefois, 58 ans après son indépendance, son économie demeure largement dépendante de la rente pétrolière [10].

Consciente des défis environnementaux et de la nécessité de préserver ses ressources fossiles, l'Algérie s'oriente vers les énergies renouvelables en mettant en place un programme ambitieux adopté par le gouvernement. En mobilisant compétences et initiatives, le pays amorce une transition vers un modèle énergétique plus durable.

Le programme actualisé des énergies renouvelables prévoit l'installation d'une capacité de 22 000 MW d'ici 2030, principalement pour le marché national, tout en gardant l'option d'exportation comme un objectif stratégique, sous réserve de conditions de marché favorables.

Par ailleurs, le programme d'efficacité énergétique vise à économiser environ 63 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) d'ici 2030 dans divers secteurs tels que le bâtiment, l'éclairage public, les transports et l'industrie. Cette transition repose notamment sur l'adoption de l'éclairage performant, l'isolation thermique, les chauffe-eaux solaires, l'utilisation de carburants propres et l'optimisation des équipements industriels [10].

	1ère phase 2015 -2020	2ème phase 2021- 2030	TOTAL
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4 525	17 475	22000

Tableau I.1 :projets d'énergie renouvelable dans l'Algérie [10].

En complément, ce programme permettra de réduire les émissions de CO₂ d'environ 193 millions de tonnes, contribuant ainsi à une démarche plus respectueuse de l'environnement.

I.5 Avantages et Inconvénients des Énergies Renouvelables [9] :

I.5.1 Avantage

Les énergies renouvelables sont une solution clé pour un avenir énergétique durable, propre et économiquement viable. Voici les principaux bénéfices :

a) Écologique et durable

- Réduit les émissions de gaz à effet de serre (CO₂) et lutte contre le changement climatique.
- Préserve les ressources naturelles en exploitant des sources inépuisables (soleil, vent, eau, biomasse, géothermie).
- Diminue la pollution de l'air, de l'eau et des sols.

b) Indépendance énergétique

- Réduit la dépendance aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et aux importations.
- Permet aux pays et aux régions d'exploiter leurs propres ressources naturelles.

c) Création d'emplois et développement économique

- Favorise la croissance économique locale grâce à la construction et à l'entretien des infrastructures.
- Génère de nombreux emplois dans les secteurs de l'ingénierie, de la production et de la maintenance.

d) Coût à long terme réduit

- Une fois installées, les sources d'énergie renouvelable (éoliennes, panneaux solaires, barrages) ont des coûts d'exploitation faibles.
- Moins sensibles aux fluctuations des prix des combustibles fossiles.

e) Sécurité énergétique et résilience

- Réduit les risques de crises énergétiques liées aux conflits géopolitiques.
- S'intègre facilement dans un mix énergétique diversifié et adaptatif.

f) Adaptabilité et innovation

- Peut être exploitée à différentes échelles : individuelle (panneaux solaires domestiques) ou industrielle (grands parcs éoliens).
- Encourage l'innovation et le développement de nouvelles technologies énergétiques.

I.5.2 Inconvénients :

Bien que les énergies renouvelables soient une solution d'avenir, elles doivent encore surmonter plusieurs défis techniques et économiques pour devenir la principale source d'énergie mondiale. Voici les principaux défis associés à ces sources d'énergie :

a) Dépendance aux conditions naturelles

- L'énergie solaire dépend de l'ensoleillement et ne produit pas la nuit.
- L'énergie éolienne nécessite du vent et peut être intermittente.
- L'hydroélectricité peut être affectée par les sécheresses.

b) Stockage et intermittence

- Difficile de stocker l'énergie produite pour une utilisation ultérieure.
- Besoin de batteries ou de systèmes de stockage coûteux pour assurer un approvisionnement constant.

c) Coût initial élevé

- L'installation de panneaux solaires, d'éoliennes ou de barrages nécessite un investissement initial important.
- Certaines technologies, comme les batteries ou les systèmes de conversion, restent onéreuses.

d) Impact environnemental et territorial

- L'implantation d'éoliennes peut nuire aux paysages et affecter la biodiversité (oiseaux, chauves-souris).

- Les barrages hydroélectriques modifient les écosystèmes et peuvent provoquer des déplacements de populations.
- L'exploitation de certaines énergies renouvelables (biomasse) peut entraîner la déforestation si elle n'est pas bien gérée.

e) Besoins en espace

- Les fermes solaires et éoliennes nécessitent de grandes surfaces pour être rentables.
- Peut entrer en concurrence avec d'autres usages du sol (agriculture, habitat).

f) Technologie en développement

- Certaines énergies renouvelables ne sont pas encore totalement optimisées.
- Nécessite des investissements continus en recherche et innovation pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts.

g) Intégration au réseau électrique

- Adapter les réseaux électriques pour gérer des sources d'énergie intermittentes demande des infrastructures modernes et coûteuses.
- Peut nécessiter l'ajout d'unités de production d'appoint (centrales à gaz ou batteries) pour compenser les fluctuations.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève description des cinq familles d'énergie renouvelable. Dans ce contexte, une étude générale a été exposée dont il a été observé que l'importance donnée à ces derniers est devenue de plus en plus considérable.

Nos travaux portent sur un système éolien, c'est pour cela que dans la dernière partie du chapitre, une importance a été donnée à ce type d'énergie.

Dans une deuxième partie, nous allons étudier par modélisation et simulation numérique chaque partie de la chaîne de conversion éolienne.



CHAPITRE II
Modélisation d'une Chaîne
de Conversion Éolienne

Eolienne de Bollée (1868)

II.1 Introduction

Ces dernières années, la production d'électricité issue de l'énergie éolienne a connu une évolution significative. Cette source d'énergie s'est développée grâce à la diversité des zones exploitables et à son coût relativement attractif. La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans les unités de production en raison de plusieurs avantages [11] [12] :

- Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme),
- Contrôle indépendant des puissances actives et réactives,
- Stabilité de l'angle rotorique,
- Réduction des contraintes mécaniques et du bruit acoustique,
- Amélioration de la qualité de puissance et coût réduit.

Ce chapitre se concentre principalement sur la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une MADA. Dans un premier temps, chaque élément du système de conversion éolienne est modélisé, notamment la turbine éolienne et ses composants mécaniques, ainsi que la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur.

II.2 Chaîne de Conversion Éolienne

L'analyse du comportement d'un système est une tâche complexe qui requiert avant tout une compréhension approfondie de son modèle dynamique. Cette maîtrise permet de simuler avec précision son fonctionnement dans divers scénarios. Il est donc essentiel de disposer d'un modèle mathématique capable de représenter fidèlement la réalité du système. Pour examiner la dynamique d'un système de production électrique, un modèle rigoureux de la conversion énergétique s'avère indispensable [13].

Une éolienne capable de produire une puissance de 10Kw composée de trois pales de longueur R fixées sur un axe rotatif et reliées à un multiplicateur G entraîne une génératrice électrique.

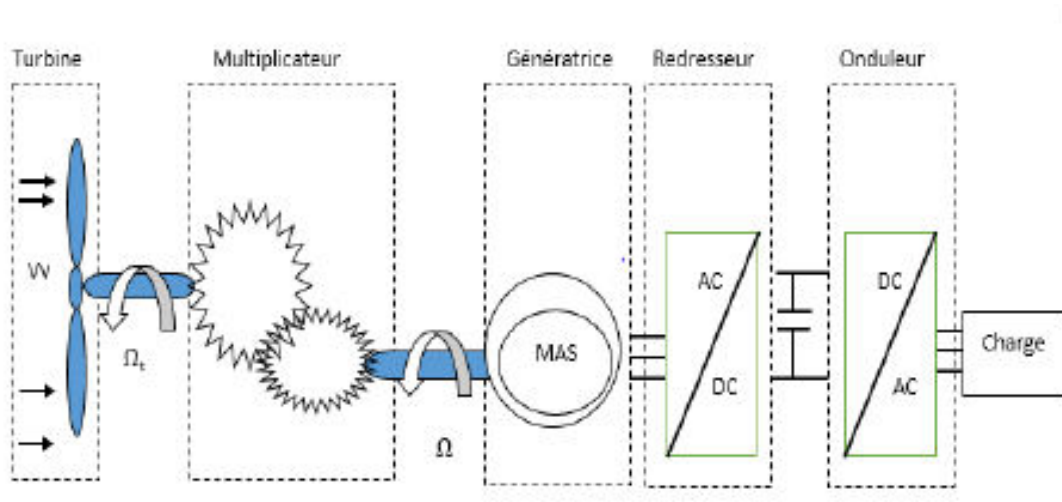


Figure II.1 : Schéma simplifié d'une chaîne de conversion éolienne [13].

Nous allons utiliser, dans cette étude, un générateur asynchrone à double alimentation capable de convertir l'énergie avec une grande efficacité.

Le stator de la GADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), l'un en mode onduleur (CCM), l'autre en mode redresseur (CCR), mis en cascade à travers un bus continu (DC-Bus) [13].

II.3 Modélisation du système éolien

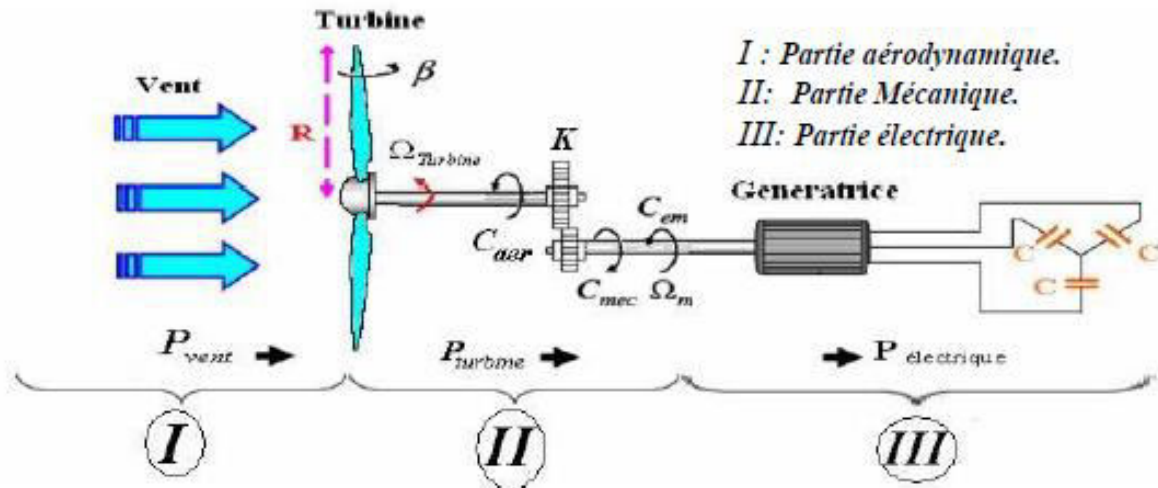


Figure II.2 : Schéma de modélisation d'une chaîne de conversion éolienne [14].

II.3.1 Partie Aérodynamique (le Vent) :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- développer et affiner la modélisation du rotor ;
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle de vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (II.1) [15].

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \sin(b_n \omega t)) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_n : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

ωt : Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le range de dernier harmonique retenue dans le calcul du profile du vent [16], [17].

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [17] :

$$V(t) = 8.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec : } \omega = \frac{2\pi}{10} \quad (\text{II.3})$$

II.3.2 Partie mécanique

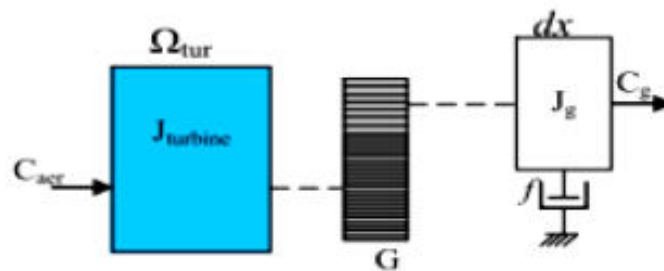


Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié de la turbine [7].

II.3.2.1 Modélisation de la Turbine Éolienne

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure [18] [19].

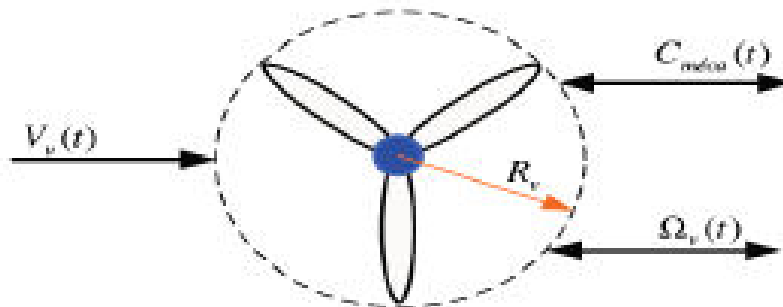


Figure II.4 : Modèle de la turbine éolienne [10].

Afin de modéliser la turbine, nous nous appuyerons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposerons que [11]

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air;
- Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

II.3.2.2 Modèle de pales

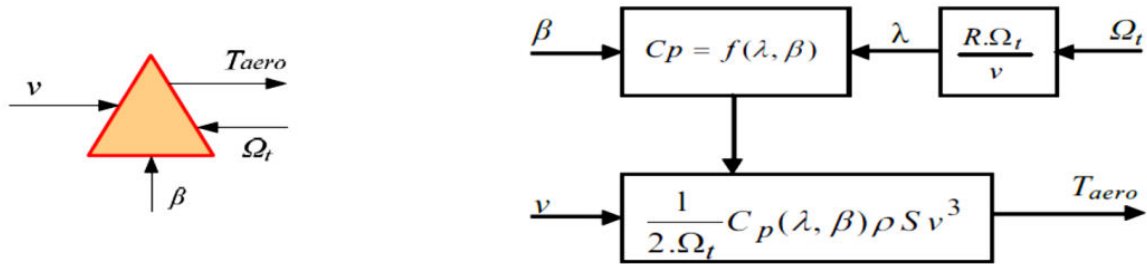


Figure II.5 : Modèle d'équation de la turbine éolienne [12].

a) Le coefficient de puissance Cp :

Le coefficient de puissance Cp dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [13].

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour modéliser le coefficient Cp et différentes expressions ont été proposées [14].

Dans notre travail, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage des pales β dont l'expression a pour origine les travaux de Siegfried Heier. Ce dernier présente à la référence [14] une formule analytique pour le calcul de $C_p = f(\lambda, \beta)$ pour des éoliennes à rotation rapide à 2 ou 3 pales basée sur des données expérimentales. Cette expression empirique est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right) + 0.0068\lambda \tag{II.4}$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine t et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \tag{II.5}$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales ;

Ω_t : est la vitesse de la turbine en (rad/s).

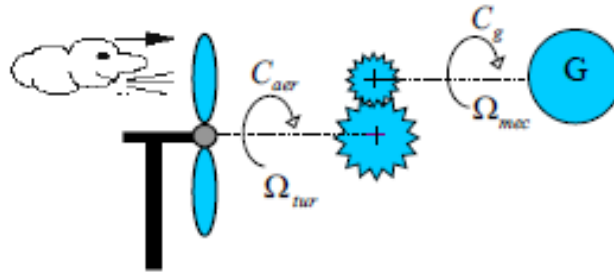
b) Puissance du vent :

Figure II.6 : Modèle mécanique de la turbine éolienne [15].

La puissance disponible dans le vent est donnée par l'équation [15] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (II.6)$$

Où :

- P_{vent} est la puissance du vent (W),
- ρ est la densité de l'air ($\approx 1.225 \text{ kg/m}^3$ au niveau de la mer),
- S est la surface balayée par les pales ($S = \pi R^2$, avec R étant le rayon du rotor),
- V est la vitesse du vent (m/s).

c) La puissance aérodynamique :

Une turbine éolienne ne peut pas convertir toute la puissance du vent en énergie mécanique. Le limite théorique de Betz indique qu'au maximum 59,3 % de cette puissance peut être extraite. Ainsi, la puissance récupérable est :

$$P_{éolienne} = C_p \cdot P_{vent} = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (II.7)$$

Où C_p (coefficient de puissance) dépend du design de l'éolienne et de la régulation de son fonctionnement. En général, C_p varie entre 0,3 et 0,5 pour les éoliennes modernes [16].

d) Le Couple Aérodynamique à la Sortie d'une Turbine Éolienne :

Le couple aérodynamique (C_a) représente le couple mécanique généré par les pales de l'éolienne sous l'effet du vent. Ce couple est responsable de la mise en rotation du rotor et de la transmission de l'énergie mécanique au générateur.

Le couple aérodynamique à la sortie de la turbine s'exprime comme :

$$C_a = \frac{P_{éolienne}}{\omega} \quad (II.8)$$

Où :

- C_a est le couple aérodynamique (N.m),
- $P_{\text{éolienne}}$ est la puissance mécanique transmise par le rotor (W),
- ω est la vitesse de rotation du rotor (rad/s).

II.3.2.3 Modélisation du Multiplicateur de Vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et la génératrice qui adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). En effet la vitesse de la turbine éolienne varie entre 5 à 25 tours par minute, il est nécessaire de placer un multiplicateur de vitesse qui augmentera la vitesse de la turbine pour atteindre celles de la machine asynchrone qui varient entre 1000 à 2000 tours par minute [17].



Figure II.7 : image réel d'un multiplicateur [17].

En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes [17] :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.9})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$C_{méc}$: Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_{méc}$: Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice ;

C_t : Couple de la turbine (aérodynamique) ;

Ω_t : Vitesse de la turbine ;

G : Gain du multiplicateur.

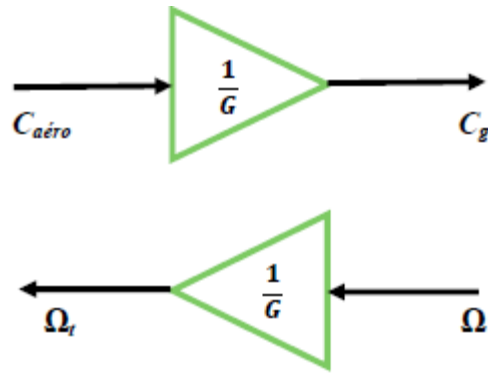


Figure II.8 : model d'un multiplicateur [18].

II.3.2.4 Modèle de l'arbre

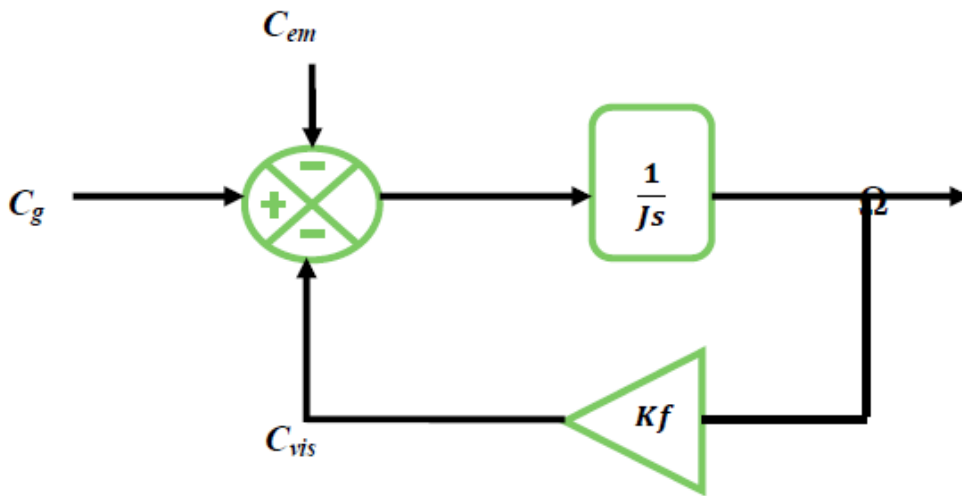


Figure II.9 : model d'un arbre [18].

La liaison entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représentée ici par l'intermédiaire de l'équation du mouvement. Plusieurs modèles du comportement mécanique de l'arbre de l'éolienne, sont proposés dans la littérature, [19]. La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice :

$$J_t = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{II.11}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne General Electric de 1.5MW, le poids du rotor de la turbine pèse 23 tonnes [20].

On peut écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$J_t = \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + C_f = C_{méc} - C_m \tag{II.12}$$

$$C_f = f_r \Omega_{méc} \tag{II.13}$$

f_r : le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

La turbine produit un couple aérodynamique à partir de la puissance cinétique du vent et par action de l'angle d'orientation des pales. Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique de la turbine en couple du multiplicateur et en même temps, il transforme la vitesse mécanique en vitesse de la turbine.

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique [18].

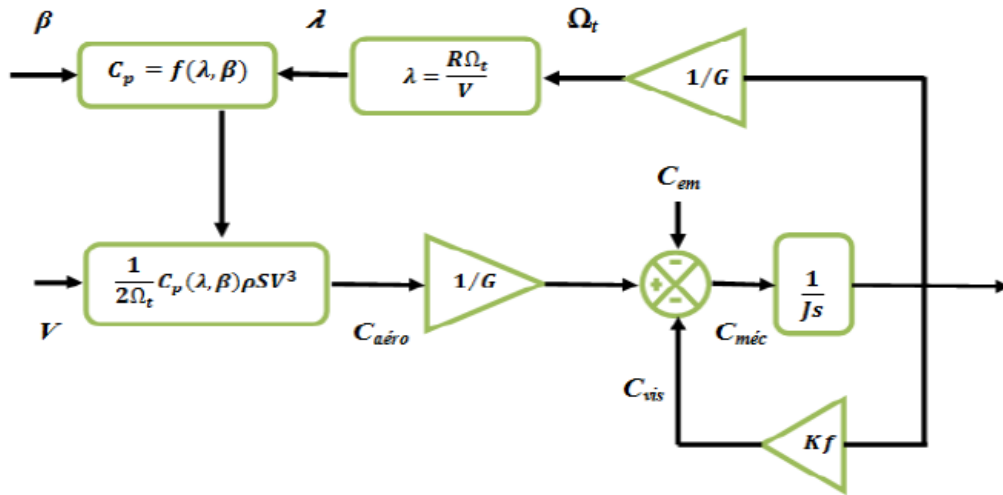


Figure II.10 : model d'une turbine éolienne [18].

L'organigramme de simulation de la turbine peut se représenter comme suit :

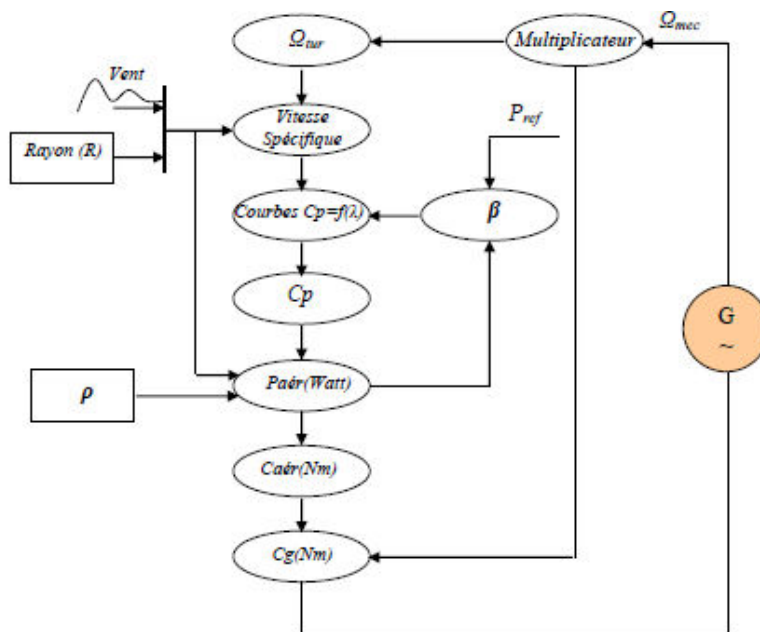


Figure II.11 : Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne [1].

II.3.2.5 Stratégie de commande de la turbine éolienne

Trois zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées [4]:

- Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale v_{\min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n ;
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de décalage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{\max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

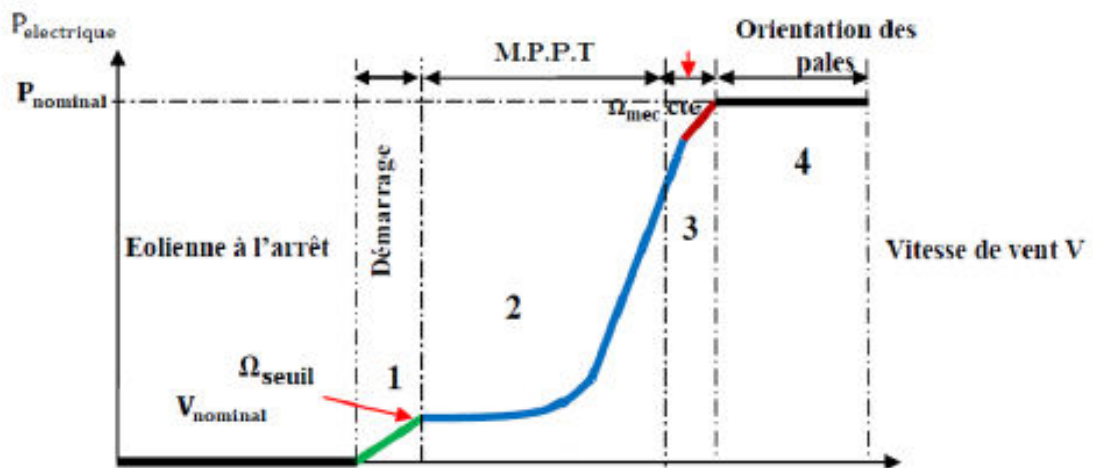


Figure II.12 : Zones de fonctionnement de la turbine éolienne [4].

Nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de décalage des pales β est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour conséquence une modification de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la GADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT.

II.3.2.5.1 Bilan de puissance

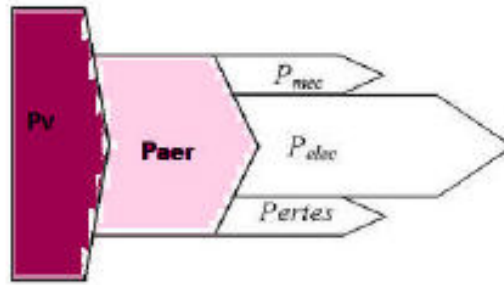


Figure II.13 : Bilan de puissance la turbine éolienne [8].

II.3.2.5.2 Technique d'extraction du maximum de puissance MPPT

Pour maximiser la puissance des éoliennes en fonctionnement, les éoliennes à vitesse variable sont dotées d'un système de régulation MPPT, qui vise le suivi du point de puissance maximale, un principe également applicable aux systèmes photovoltaïques (PV) [12]. Concernant les éoliennes, deux principales stratégies MPPT émergent : la première, moins courante, traite la propriété C_p comme inconnue, La deuxième approche prend cependant en compte le fait que la fonctionnalité C_p est bien connue et désormais la plus courante. Il existe deux types de contrôle différents dans cette deuxième catégorie [16].

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.

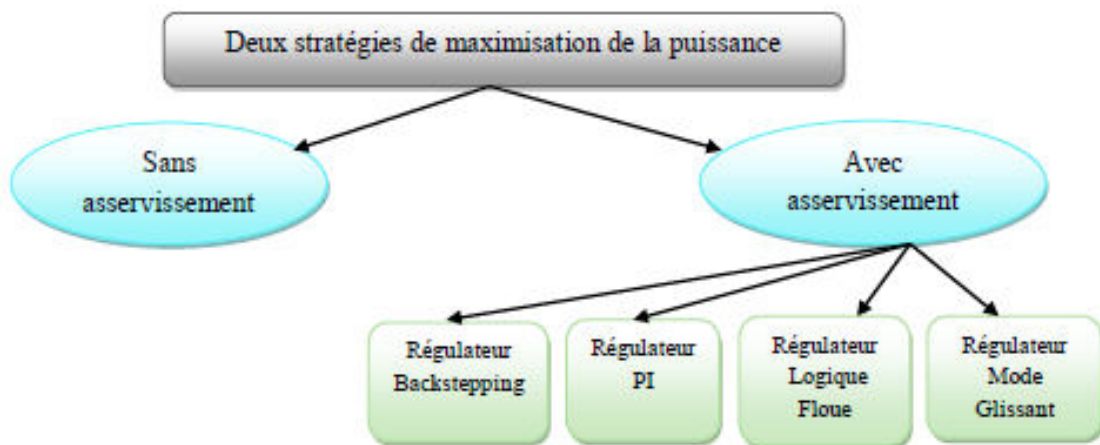


Figure II.14 : Stratégies de MPPT [16].

a) Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

Cette technique consiste à ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique, qui correspond à la zone II de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. [20][17]

On suppose que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

Le couple électromagnétique de référence permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence est donné par la relation suivante :

$$C_{méc}^* = R(\Omega_{méc}) (\Omega_{méc}^* - \Omega_{méc}) \tag{II.14}$$

Avec : $R(\Omega_{méc})$: C'est le régulateur de vitesse (PI)

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple.

$$\Omega_{méc}^* = G \Omega_t^* \tag{II.15}$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \tag{II.16}$$

L'action des correcteurs de vitesse doit accomplir deux tache ;

- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence ;
- Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par :

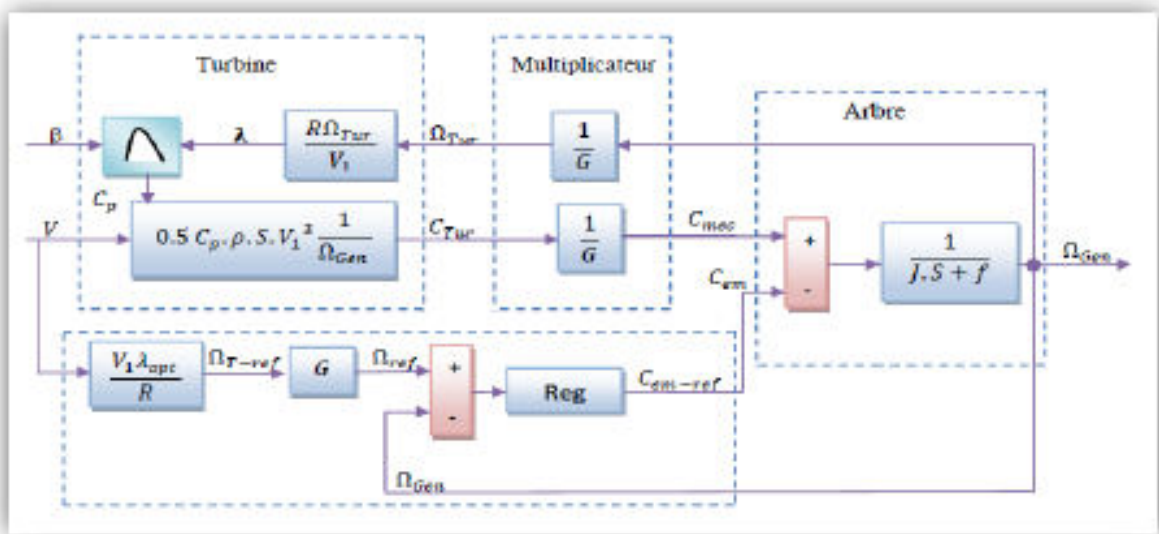


Figure II.15 : Stratégie MPPT avec Asservissement de la vitesse [6].

b) Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de Rotation

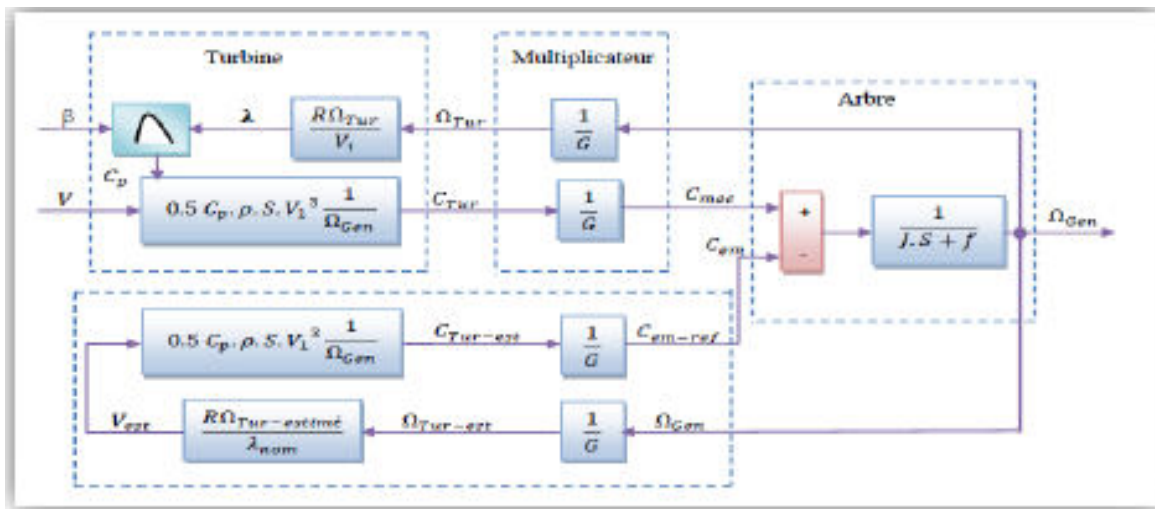


Figure II.16 : Stratégie MPPT sans Asservissement de la vitesse [6].

L'anémomètre des systèmes éoliens est placé derrière le rotor de la turbine. Étant donné le grand diamètre balayé par les pales de l'éolienne, il est ardue déterminer avec précision la vitesse du vent. Face à ces défis, on utilise souvent une méthode de contrôle de la vitesse de rotation sans feedback de vitesse. Elle repose sur l'idée qu'avec de faibles variations des constantes de temps électriques du système éolien, la vitesse du vent peut être considérée comme négligeable. De même, l'effet de couple dû au frottement est souvent omis. Dans ces conditions, pour le fonctionnement éolien, l'équation mécanique devient [3] :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{em} - C_f = 0 \quad (II.17)$$

La régulation MPPT sans contrôle de vitesse se base sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice. De cette mesure, on peut déduire la vitesse de rotation de la turbine de la manière suivante :

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.18)$$

La valeur de la vitesse du vent peut être estimée comme suit :

$$\hat{v} = \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (II.19)$$

Le couple estimé des éoliennes C_t est calculé à partir des valeurs estimées de la vitesse du vent et celle de rotation de la turbine Ω_t est. Il est exprimé par l'équation suivante :

Ainsi, le couple électromagnétique de référence s'écrit :

$$\hat{C}_{em}^* = \hat{C}_{méc}^* = \frac{\hat{C}_t^*}{G} = \frac{1}{2G\lambda_{opt}^2} C_{c-max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (II.20)$$

Au point où la puissance est maximale, la vitesse spécifique atteint sa valeur optimale λ_{opt} et le coefficient de puissance correspond à sa valeur maximale C_{pmax} .

II.3.3 Partie électrique

II.3.3.1 Description de la MADA

La Machine Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoques dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [12].

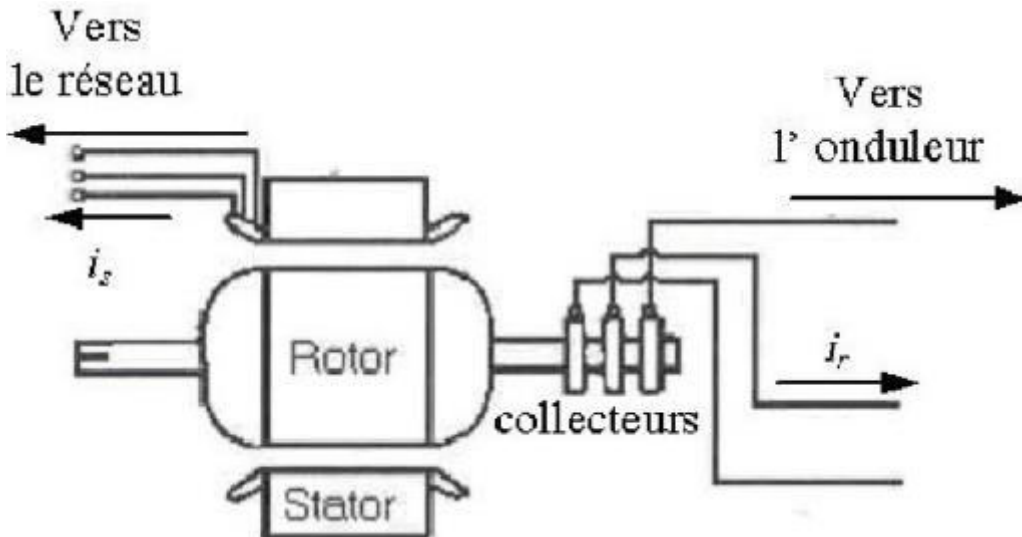


Figure II 17 : Structure de la machine asynchrone à double alimentation [12].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tournée.

II.3.3.2 Mode de fonctionnement de la MADA

La MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotorique qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [15] [18].

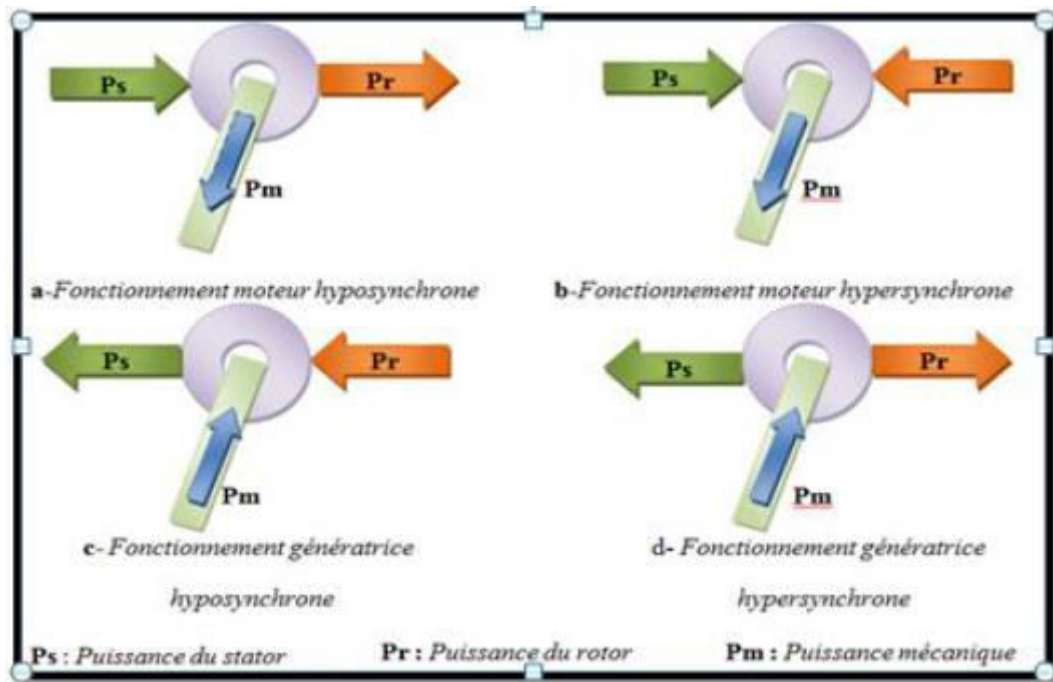


Figure II.18 : Les quatre quadrants du fonctionnement de la MADA [20].

➤ **Fonctionnement moteur hypo synchrone ($g > 0$) :**

Le fonctionnement en mode hypo synchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit que La puissance est fournie par le réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.

➤ **Fonctionnement moteur hyper synchrone ($g < 0$) :**

Le fonctionnement en mode hyper synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques est convertie en puissance mécanique.

➤ **Fonctionnement générateur hypo synchrone ($g > 0$) :**

Dans ce mode de fonctionnement la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

➤ **Fonctionnement générateur hyper synchrone ($g < 0$) :**

Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près.

II.3.3.3 Domaine d'applications de MADA

La machine asynchrone double alimentation est occupée une large place dans les applications industrielles et sur tout en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.

- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant. [19]

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- L'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges [18]

II.3.3.4 Avantages et inconvénients [17]

II.3.3.4.1 Avantages de la MADA

Le principale avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable ce qui permet :

- l'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection de l'énergie dans les enroulements de la machine.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominale sur une grande plage de vitesse.
- l'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotorique. Ce dispositif est par conséquent économique.
- en fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur les résistances placée dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.

II.3.3.4.2 Inconvénients de la MADA

La MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivant :

- Elle est plus volumineuse qu'un MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseur, augment le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.
- un autre inconvénient apparait lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouvert, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce

fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [13].

II.3.3.5 Modélisation de La Machine Asynchrone à Double Alimentation

La modélisation nous permettant de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent[7].

La machine est représentée par son modèle de Park dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées. Il nous faut poser des hypothèses qui vont nous simplifier le modèle sans pour autant trop s'éloigner du système réel.

II.3.3.5.1 Hypothèses simplificatrices

- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault, l'entrefer d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche sont supposé négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau est négligeable
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses citées précédemment, le comportement dynamique de la GADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$V_{sa,b,c}$ et $V_{ra,b,c}$: les tensions statorique et rotorique de la machine ;

$I_{sa,b,c}$ et $I_{ra,b,c}$: les courants statorique et rotorique de la machine ;

$\varphi_{sa,b,c}$ et $\varphi_{ra,b,c}$: les flux statorique et rotorique de la machine ;

R_s et R_r : les résistances des enroulements statorique et rotorique de la machine.

On a aussi les équations des flux comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M] \\ [M] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} ; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{ab} \\ I_{ac} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{ab} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \\ [L_s] &= \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \\ [M] = [M_{rs}]^t = [M_{sr}] &= m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ave:

L_s et L_r : les inductances cycliques statorique et rotorique de la machine ;

M_s et M_r : les inductances mutuelles entre deux phases statorique et entre deux phases rotoriques de la machine ;

M : l'inductance magnétisante (L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor) ;

m : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ;

M_{sr} et M_{rs} : les inductances mutuelles entre deux phases statorique-rotorique, et entre deux phases rotorique-statorique de la GADA, respectivement ;

l_s et l_r : Les inductances propres statorique et rotorique.

On a :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s & ; L_r = l_r - m_r & ; M = \frac{3}{2}m \end{cases}$$

Equation mécanique :

$$J_g \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{em} - C_r + f_r \cdot \Omega_{méc} \quad (II.24)$$

J_g : Moment d'inertie des masses tournantes ;

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine ;

$\Omega_{méc}$: Vitesse mécanique ;

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine ;

f_r : Coefficient de frottement visqueux ;

$(f_r \cdot \Omega_{méc})$: Terme de couple de frottement visqueux.

On voit bien que le système est complexe et difficile à étudier. Donc on va proposer une transformation qui est un changement de base suivant la matrice de Park

II.3.3.5.2 Représentation du modèle dans le repère (d,q)

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [3]

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux (courants, tensions, et flux) permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

Donc la matrice de transformation de Park est :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

x : Peut-être la tension, le courant ou le flux ;

d, q, o : L'axe direct, quadrature et homopolaire.

$P(\theta)$: la matrice de transformation directe de Park donnée par :

$$P(\theta) = 2/3 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

L'angle θ peut dépendre du temps et de la position initiale. Et pour ce qui est du référentiel on choisit celui du champ tournant.

La transformation de Park inverse est définie par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Avec : $P(\theta)^{-1}$ la matrice de transformation inverse de Park donnée par:

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.28})$$

La composante homopolaire (o) dans un système équilibré est nulle

a)- Choix de référentiel

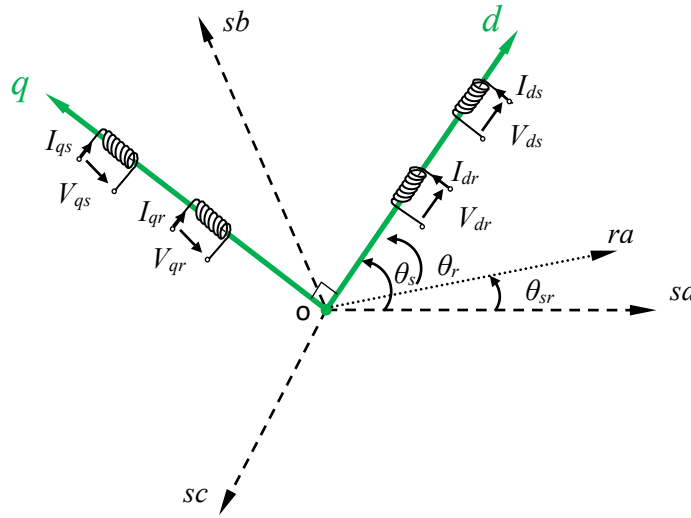


Figure II.19 : Référentiel tournant d'axes (d-q) [3].

Trois types de référentiels peuvent être envisagés à savoir :

- Référentiel lié au *stator* ($\theta=0$) : Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- Référentiel lié au *rotor* ($\theta=\theta_r$) : Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- Référentiel lié au *champ tournant* statorique ($\theta=\theta_s$) : Ce choix s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique (permet d'avoir un découplage parfait entre les puissances active et réactive statorique).

b)- L'application de la transformation de Park

La transformation de Park du système :

$$[P(\theta)] \cdot \left[\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \tag{II.29}$$

Avec :

$\theta = \theta_s$: Pour les grandeurs statorique.

$\theta = \theta_s - \theta_r = \theta_{sr}$: Pour les grandeurs rotorique.

On obtient le modèle biphasé suivant :

$$\begin{cases} V_d = RI_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q = RI_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_o = RI_o + \frac{d\varphi_o}{dt} \end{cases} \tag{II.30}$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Avec:

$$\begin{cases} \theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s & \text{: Pour les grandeurs statorique.} \\ \theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r & \text{: Pour les grandeurs rotorique.} \end{cases}$$

D'où : ω_s , ω_r et ω_{sr} représentent respectivement : les vitesses de pulsation statorique, rotorique et de glissement de la GADA.

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes ($d.q.o$) et ceux des axes ($a.b.c$) on obtient :

Au stator :

$$\begin{cases} [\varphi_{dqos}] = [P(\theta)] \cdot [l_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqos}] + [P(\theta)] \cdot [M] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqor}] \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} [\varphi_{dqor}] = [P(\theta)] \cdot [l_r] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqor}] + [P(\theta)] \cdot [M] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqos}] \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

On obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

II.3.3.5.3 Représentation d'état de la machine

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (\text{II.35})$$

Avec :

X : le vecteur d'état : $X = [I_{ds}, I_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}]^T$;

U : le vecteur de commande : $U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$;

A : la matrice d'état du système;

B : la matrice de commande.

Nous avons :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) I_{qs} - \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) I_{qs} + \omega_s (L - \frac{M^2}{L_r}) I_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = -R_r \frac{M}{L_r} I_{ds} + \frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = -R_r \frac{M}{L_r} I_{qs} + \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Tel que :

$$\sigma = L_s [1 - (\frac{M^2}{L_s L_r})] = (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \text{ et } T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

σ : Le coefficient de dispersion magnétique de Blondel ;

T_r : La constante du temps rotorique.

Après l'arrangement du système d'équations, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r T_r \sigma}\right] I_{ds} + \omega_s I_{qs} + \left[\frac{M}{L_r T_r \sigma}\right] \varphi_{dr} + \left[\frac{M}{L_r \sigma}\right] \omega_r \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{ds} - \left[\frac{M}{L_r \sigma}\right] V_{dr} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\omega_s I_{ds} - \left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r T_r \sigma}\right] I_{qs} - \left[\frac{M}{L_r \sigma}\right] \omega_r \varphi_{dr} + \left[\frac{M}{L_r T_r \sigma}\right] \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{qs} - \left[\frac{M}{L_r \sigma}\right] V_{qr} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{ds} - \frac{1}{T_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} - \frac{1}{T_r} \varphi_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

L'écriture Sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{ds}}{dt} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r \sigma T_r}\right) & (\omega_s) & \left(\frac{M}{\sigma T_r L_r}\right) & \left(\omega_r \frac{M}{\sigma L_r}\right) \\ -(\omega_s) & -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{\sigma T_r L_r}\right) & -\left(\omega_r \frac{M}{\sigma L_r}\right) & \left(\frac{M}{\sigma T_r L_r}\right) \\ \left(\frac{M}{T_r}\right) & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \left(\frac{M}{T_r}\right) & -(\omega_s - \omega_r) & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{M}{\sigma L_r}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{M}{\sigma L_r}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

a) Expression du couple

A partir de la relation de la puissance active suivant :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{II.41})$$

En remplace les tensions par leurs valeurs on obtient :

$$P_s = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs}\right) + \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.42})$$

$$\begin{cases} P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \\ P_r = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \\ P_{em} = \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Avec :

P_j : les pertes joule statorique ;

P_r : les pertes rotorique ;

P_{em} : puissance électromagnétique.

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{em} = \omega_s C_{em} \tag{II.44}$$

En distingue l'expression du couple :

$$C_{em} = p (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \tag{II.45}$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \tag{II.46}$$

b) Expressions des puissances

Les expressions des puissances active et réactive statorique sont données par :

$$P_s = (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) \tag{II.47}$$

$$Q_s = (V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs})$$

II.3.4 Modélisation de l'Interface Électronique de Puissance

II.3.4.1 Modélisation et commande des convertisseurs de puissance

Les convertisseurs de tension utilisés sont représentés dans la figure, [14]. Chaque convertisseur comprend six transistors et de six diodes. Les transistors ($i = \{1 \rightarrow 3\}$ et $j = \{1 \rightarrow 3\}$) sont en antiparallèle avec les diodes de roue libre ($i = \{1 \rightarrow 3\}$ et $j = \{1 \rightarrow 3\}$) respectivement.

Le pilotage des deux convertisseurs est assuré par les signaux logiques

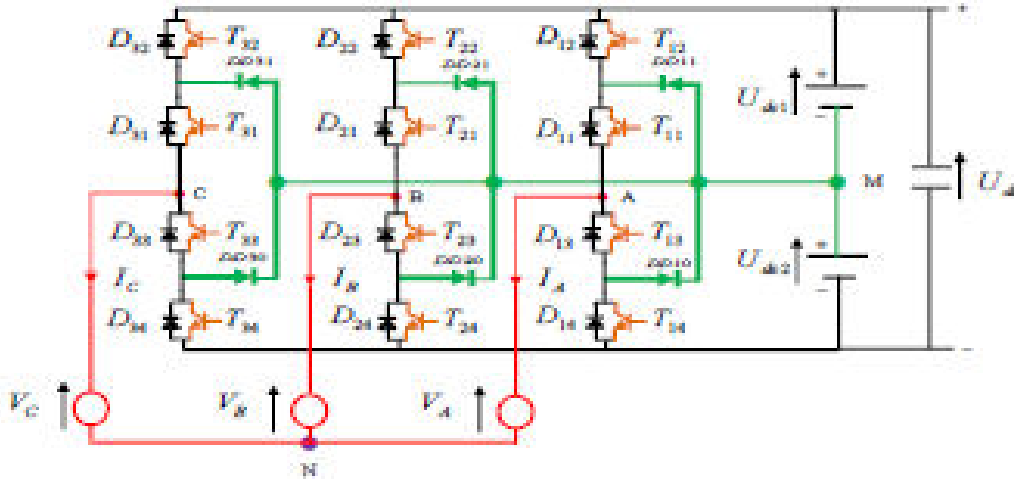


Figure II.20: Modèle du convertisseur de puissance [14].

Pour des raisons de simplification, on suppose que la commutation des interrupteurs est instantanée et la chute de la tension à leurs bornes est négligeable.

Le modèle moyen de l'onduleur est donné par les équations :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{dc1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{dc2} \right\} \tag{II.48}$$

II.3.4.2 Commande du convertisseur par Modulation Sinus Triangle

La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [15].

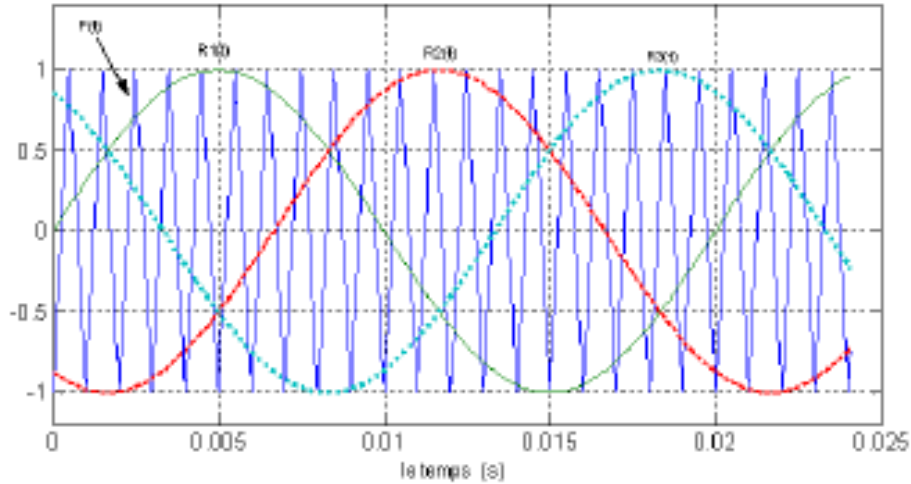


Figure II.21 : La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle [4].

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation I_m égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence.

$$I_m = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (\text{II.55})$$

2. Le coefficient de réglage en tension T_m égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

$$T_m = \frac{V_{réf}}{V_p} \quad (\text{II.56})$$

II.4 Présentation De L'environnement Simulink

Simulink est un logiciel qui permet de modéliser, simuler et analyser des systèmes dynamiques (système dont les sorties et les états évoluent au cours du temps). Ce logiciel a été produit par la société « *The MathWorksInc* » [16]. C'est un outil totalement intégré au noyau de calcul de Matlab qui procure un environnement de modélisation basé sur des schémas-blocs. Il possède aussi un environnement de simulation dynamique, principalement destiné aux systèmes qui peuvent être décrits à l'aide d'équations différentielles.

Simulink possède une interface graphique qui facilite l'analyse de systèmes dans le domaine temporel et fréquentiel.



Figure II.22 : Matlab Simulink[16].

II.5 interprétations et résultats :

a) Profil du vent appliqué au système étudié :

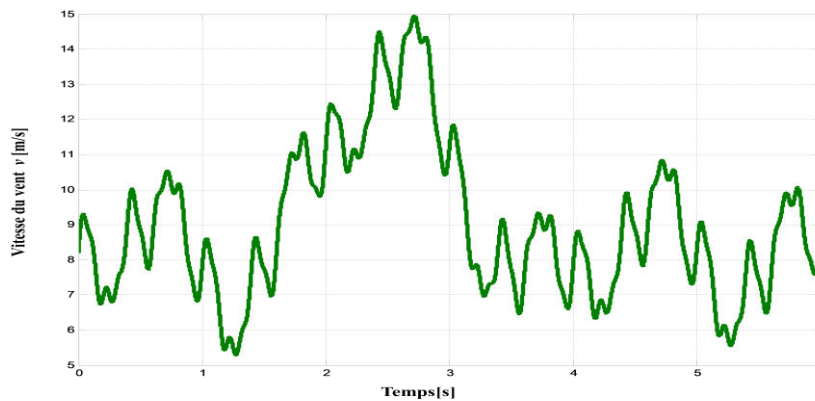


Figure II.23 : Simulation du Profil du vent appliqué.

La figure II .23montre la variation de la vitesse du vent en fonction de la variation de temps ($t=6s$) entre les valeurs de $v = 5.3 \text{ m / s}$ et $v = 15 \text{ m / s}$. Cela donne un reflet d'un véritable profil de vent.

b) Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β :

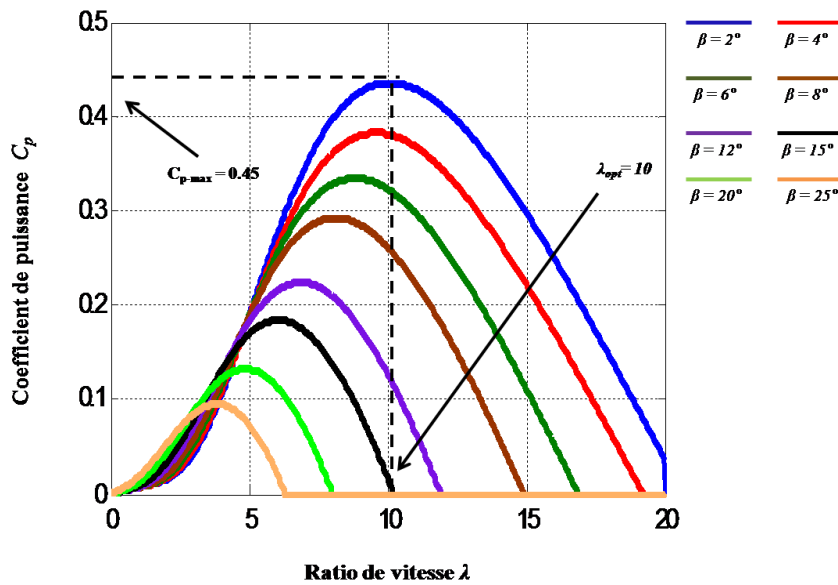


Figure II.24: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β .

Sur la Figure II.24, plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet ($\beta= 2$). Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} =10$; $C_{pmax} =0.45$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

Nous remarquons que l’augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, provoque la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

c) Coefficient de couple C_c en en fonction de λ et β :

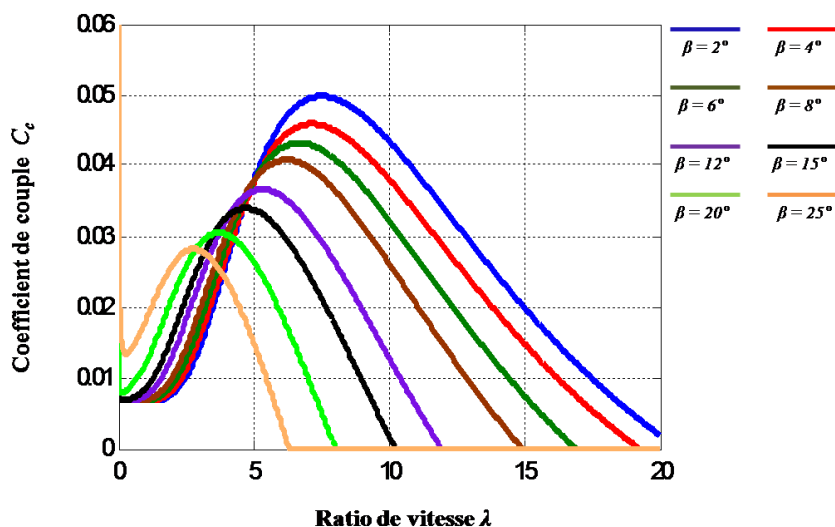


Figure II.25: Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β .

La figure représente le coefficient de couplé C_c (calculé à partir de l'équation) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales. On remarque

que Le coefficient C_c s'exprime en forme d'allure graphique, comme le coefficient C_p , en fonction du ratio de vitesse λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β .

d) Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation :

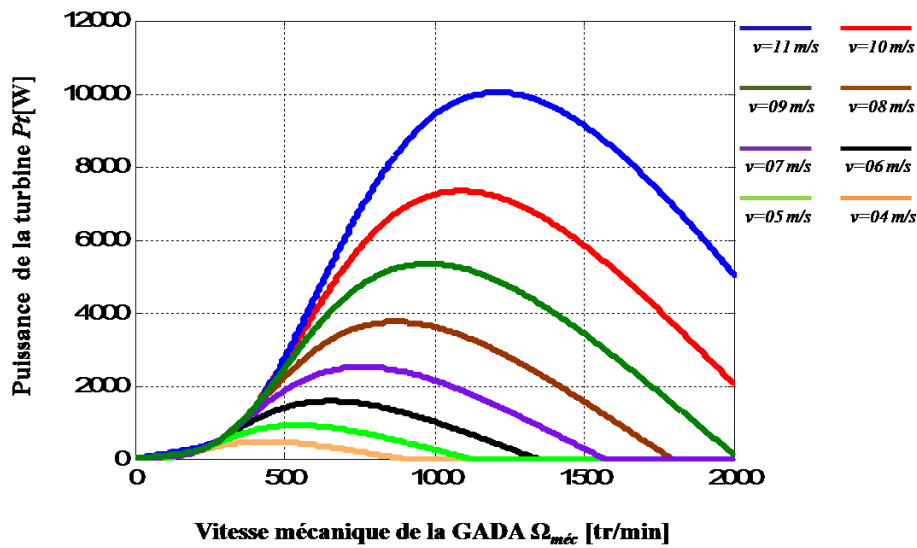


Figure II.26 : Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

La figure II.26 montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction la vitesse de rotation, Le graphe montre souvent une relation non linéaire, avec une montée initiale, un pic de puissance maximale, suivi d'une chute si la vitesse de rotation devient trop élevée.

En résumé, la turbine fonctionne le plus efficacement à une certaine vitesse, et il est important de comprendre comment les caractéristiques spécifiques de la turbine influencent cette courbe pour optimiser la production d'énergie.

e) Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation :

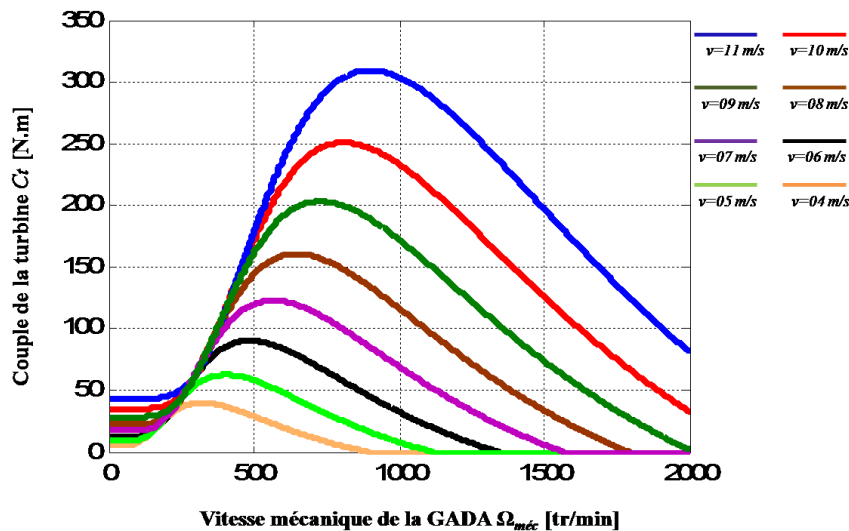


Figure II.27: Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

f) MPPT sans asservissement de vitesse mécanique :

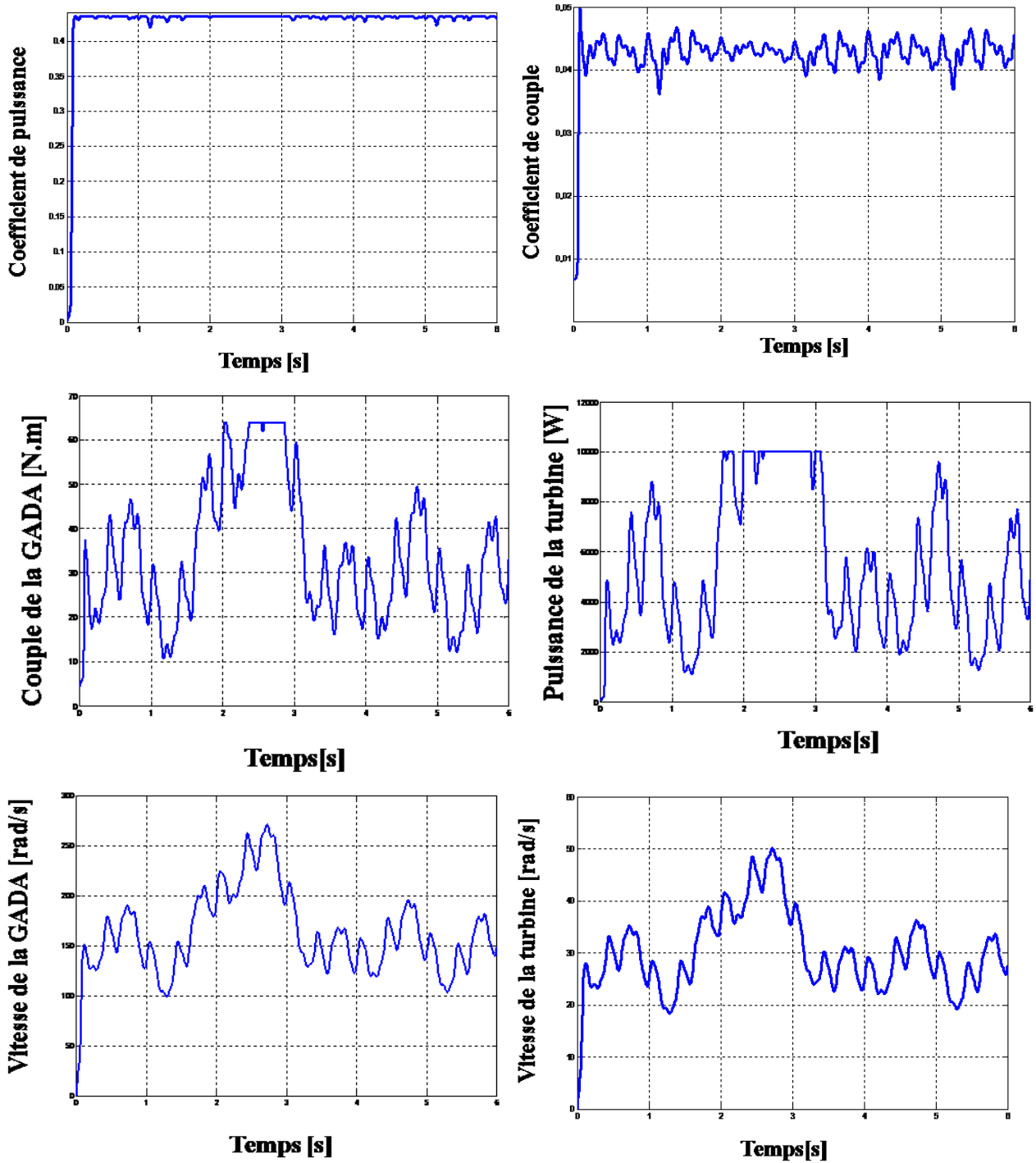


Figure II.28 : Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse mécanique.

Les résultats de la simulation concernant cette structure indiquent que le couple de la génératrice s'ajuste bien à celles du vent, bien que de manière relativement lente.

i) MPPT avec asservissement de vitesse mécanique :

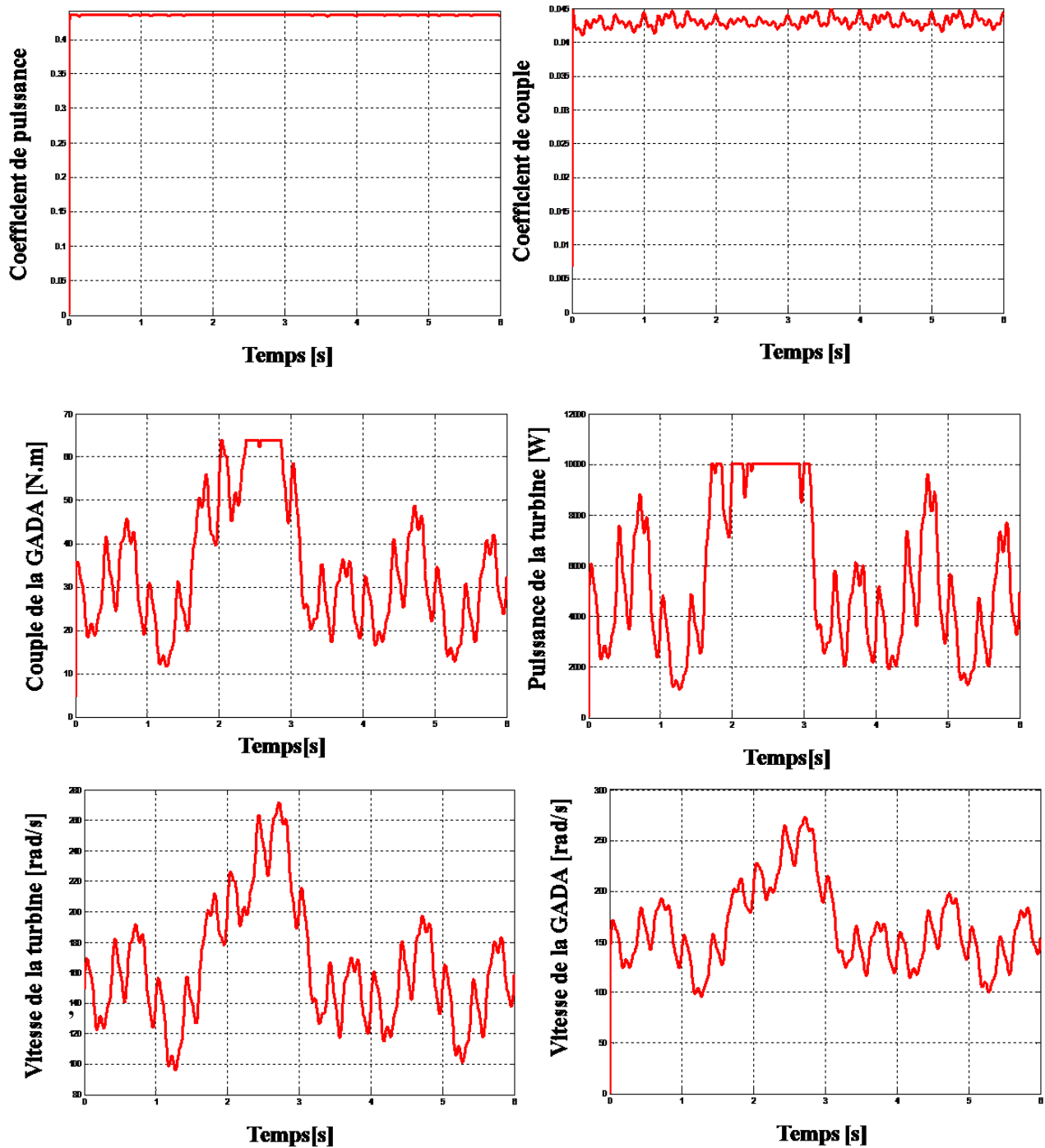


Figure II.29 : Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse mécanique

La Figures II.29 représente la régulation de la vitesse mécanique utilisant un régulateur PI. Lorsque la turbine atteint son régime de fonctionnement permanent, sa vitesse est alors la réplique exacte de la vitesse de référence : ceci indique l'efficacité de la technique de contrôle utilisée.

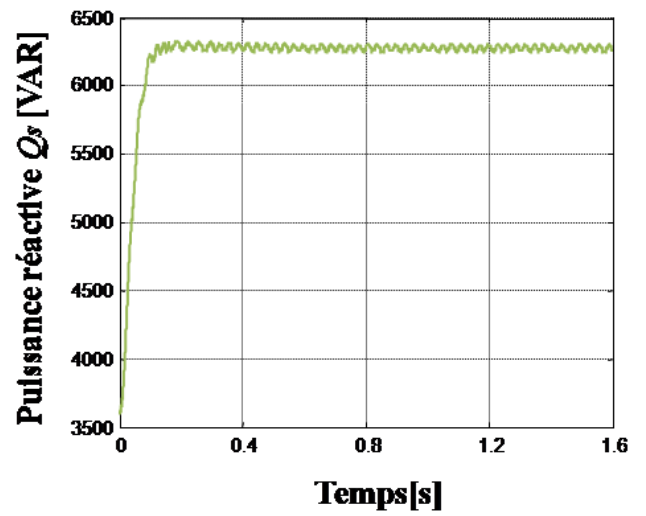
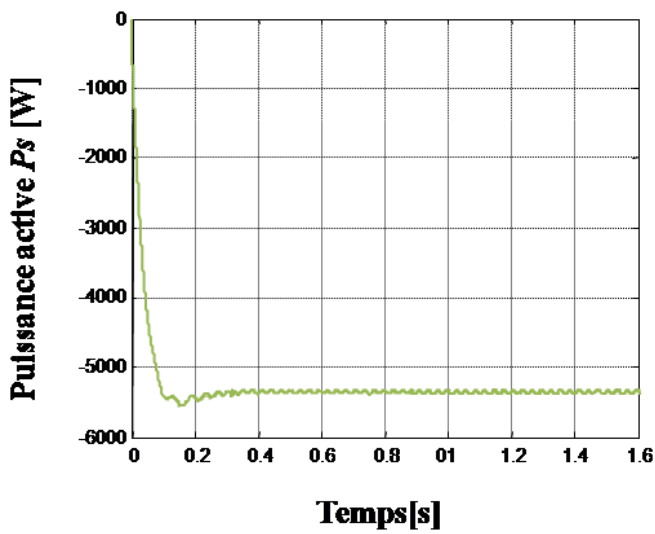
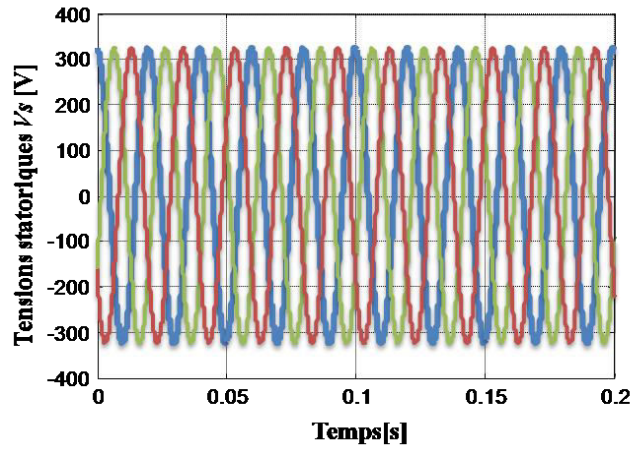
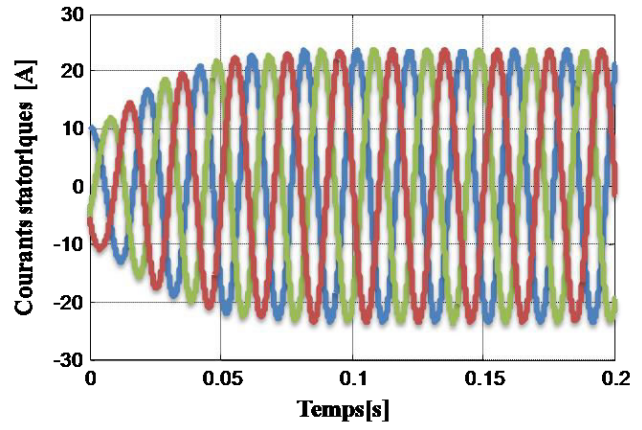
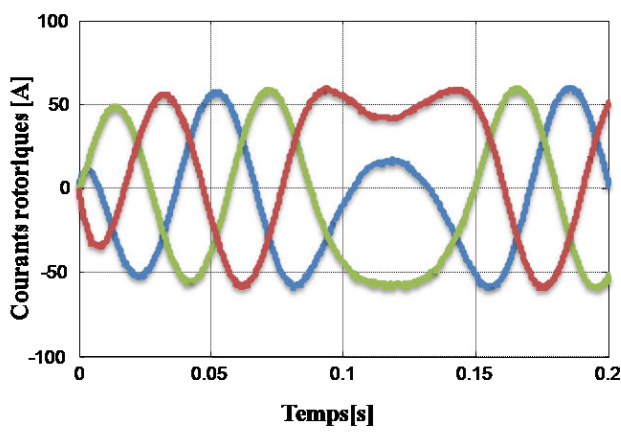
Dans la même figure II.28 et Après l'application de MPPT avec réglage de vitesse, on remarque que la vitesse mécanique est synchronisée avec celle d'une référence qui est l'image de vent mais avec une dynamique lente. Et le coefficient de puissance (C_p) et ration de vitesse sont ajustés à leur valeur optimale et prennent des valeurs constant 0.44 et 10 respectivement. En conclusion, il apparaît que les deux techniques de commande MPPT, avec ou sans asservissement de la vitesse mécanique de la machine, sont adaptées aux fluctuations de la vitesse du vent, ce qui justifie l'adoption de cette méthode pour le contrôle des aérogénérateurs.

j) la GADA couplée à la turbine éolienne :

Le système global a été modélisé et simulé dans un environnement Matlab / SimPower en utilisant les paramètres spécifiés dans l'annexe. Cette section présente une analyse de simulation destinée à évaluer la structure de contrôle proposée pour la chaîne de conversion éolienne basée sur la GADA.

La simulation a été réalisée en prenant en compte un profil de vitesse du vent variable, d'environ 8 m/s. Les résultats obtenus illustrent clairement que les dynamiques du couple électromagnétique (puissances actives) et de la puissance réactive réagissent rapidement. Les trajectoires des références sont bien suivies, avec une erreur quasiment inexistante. De plus, l'évolution des courants du rotor suit de manière précise leurs références, sans erreur statique. Ainsi, ils représentent respectivement les puissances réactive et active. Il est également observé que le couple électromagnétique réagit immédiatement à toute variation de la demande en puissance active, tout en restant indépendant de la puissance réactive.

Les résultats de simulation révèlent que, lors de la phase de démarrage, les courants de phase statorique présentent un pic négatif et génèrent d'importantes oscillations. En revanche, les courants de phase rotorique atteignent un pic positif avant de se stabiliser à une valeur en régime permanent. Le couple électromagnétique est négatif au démarrage, atteignant une valeur maximale de -33 N.m. Les résultats soulignent également l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant la période de démarrage : après environ 0,05 s, ces courants se stabilisent et adoptent une forme sinusoïdale. Enfin, il est à noter que la tension et la fréquence du rotor ont une influence sur les grandeurs de la génératrice, affectant ainsi la puissance au niveau du stator.



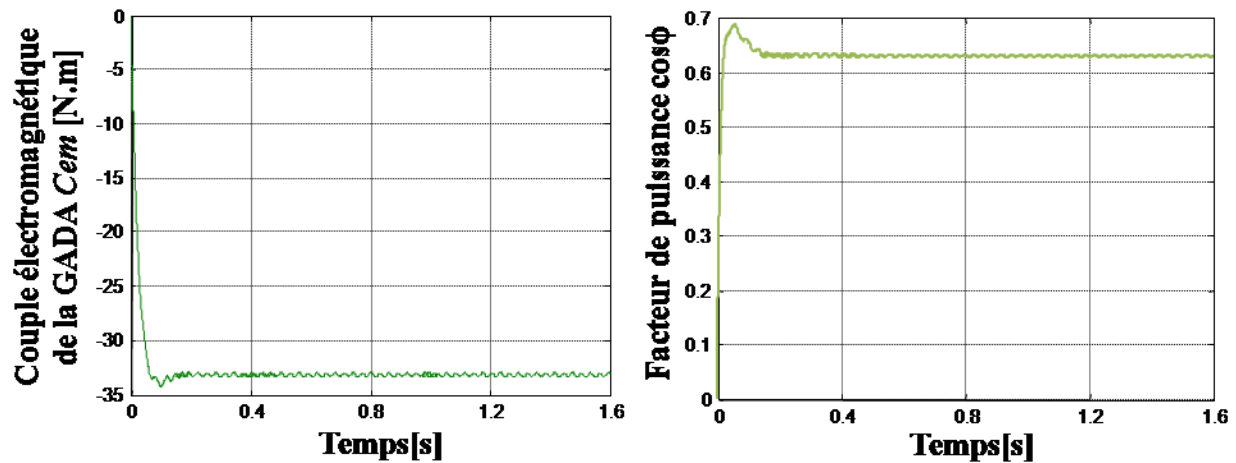


Figure II.30 : Résultats de simulation du MPPT de la GADA couplée à la turbine.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la description et la modélisation d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur GADA. Faisant suite à une modélisation analytique :

La modélisation de la turbine éolienne avec la stratégie MPPT

- Sans asservissement de vitesse.
- Avec asservissement de vitesse.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, dans le repère triphasé et le repère de Park.

Dans un premier temps, nous avons fait la simulation du modèle théorique de la turbine prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de décalage; une fois qu'on a confirmé que le block de la turbine fonctionne, nous avons composé le modèle de tout le système qui inclut la turbine à vent et la génératrice asynchrone, ainsi que le système mécanique que nous avons pu le valider, ce qui nous permettra de l'utiliser dans le chapitre suivant.



CHAPITRE III
La Commande Vectorielle

Eolienne de Brush (188)

III.1 Introduction

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant une commande vectorielle par orientation du flux statorique [10]

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [20].

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la GADA basée sur l'orientation du flux statorique. On considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles. Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

III.2 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode de contrôle des machines à courant alternatif, son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} et I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_{ds}) commande le flux. Ceci permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [13].

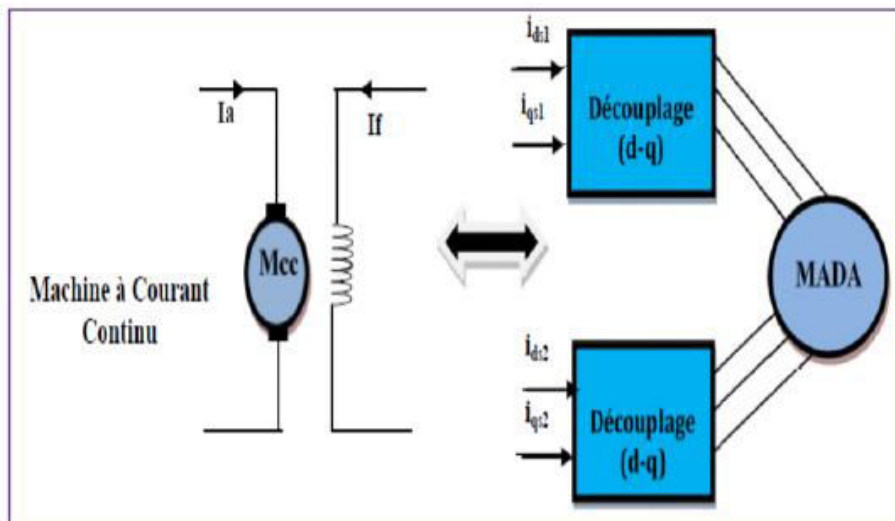


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle [13].

III.3 Schéma de commande

La figure (III.2) représente le schéma de principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation. La consigne de puissance active correspond à la puissance maximale extraite du vent [4].

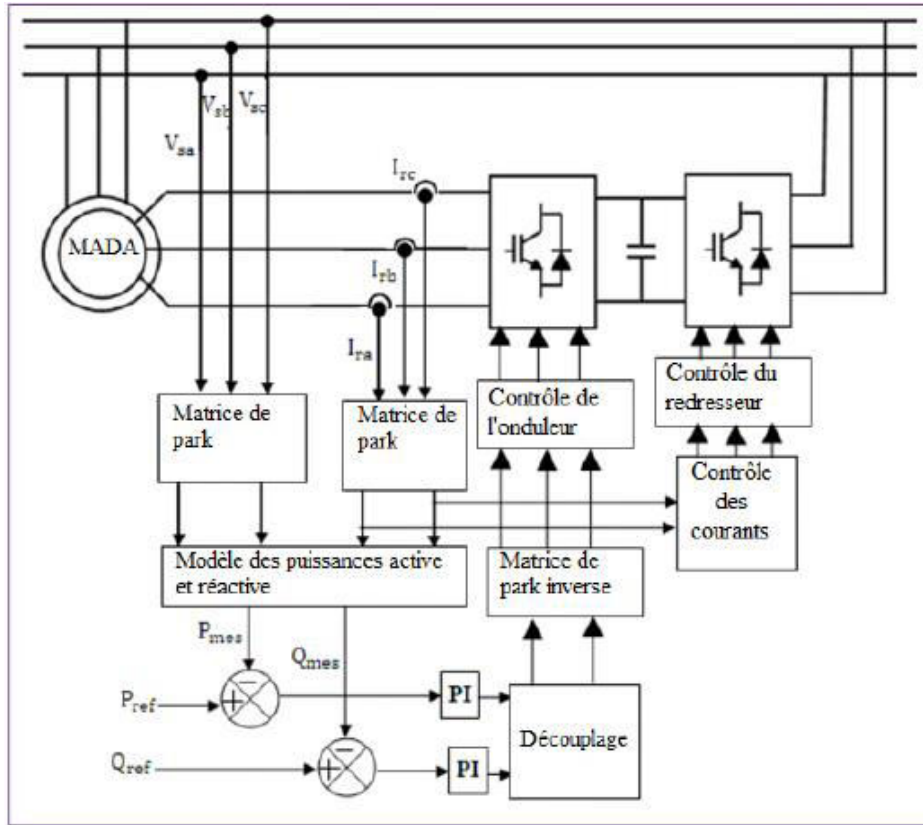


Figure III. 2 : Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA [4].

III.4 Choix du référentiel et principe de la commande

La commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe « d » du référentiel tournant, [15]. On a donc: $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{qs} = 0$.

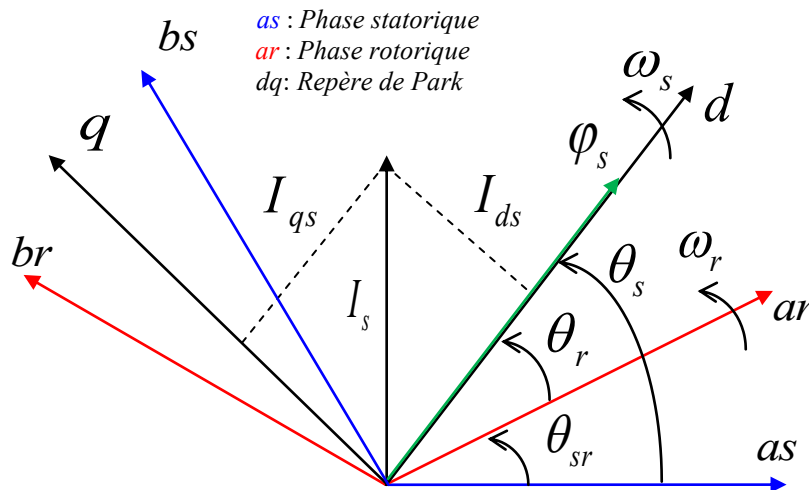


Figure III.3:Orientation de l'axe d sur le flux statorique [3].

Le couple électromagnétique de l'équation s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (III.1)$$

Et l'équation des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (III.2)$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [3] :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (III.3)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (III.4)$$

A l'aide de l'équation (III.2), on peut établir le lien entre les courants statorique et rotorique :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (III.5)$$

Les puissances active et réactive statorique s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (III.6)$$

Ou bien encore, d'après l'équation (III.4) par :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (III.7)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotorique, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (III.5):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.8)$$

A partir des équations (III.3) et (III.4), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (III.9)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

En remplaçant dans l'équation des flux, les courants statorique par l'expression (III.5) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (III.11)$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotorique qui lui seront appliquées.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.12)$$

Où g correspond au glissement de la machine.

III.5 Relation entre tensions et courants

Les expressions trouvées nous renseignent sur l'existence d'un couplage entre les deux axes d et q. Afin d'aboutir à une commande performante, il faut au préalable réaliser un découplage entre les deux axes.

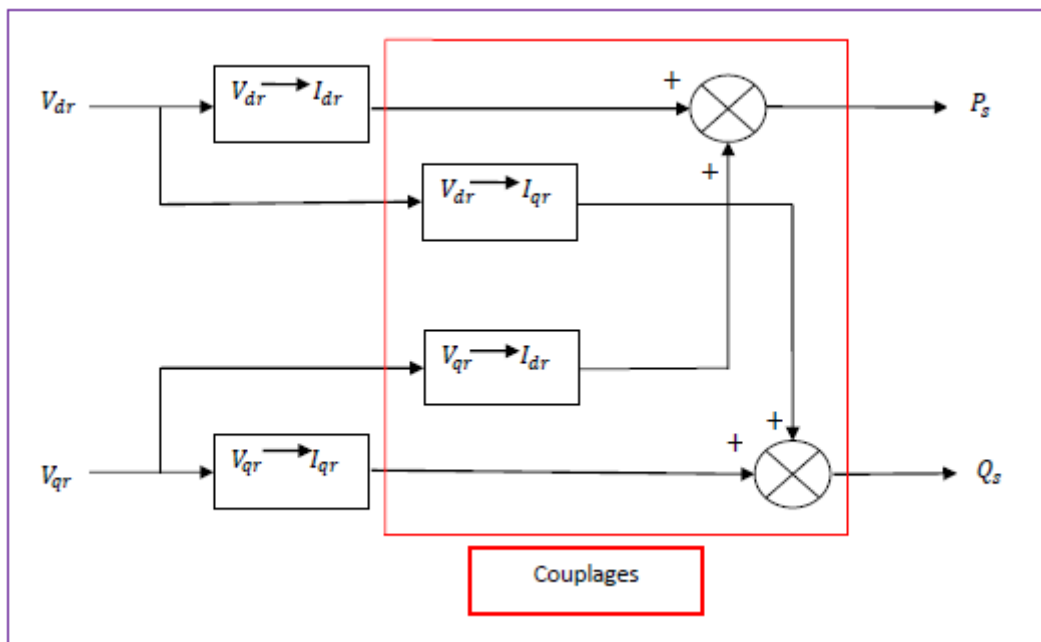


Figure III.4 : Description des couplages [5].

III.6 Découplage entre les tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature

Il existe plusieurs techniques pour éliminer l'effet de l'entrée à une sortie

- Découplage par compensation.
- Découplage utilisant un régulateur.
- Découplage par retour d'état.

Nous nous intéressons au découplage par compensation pour cela on définit deux nouvelles variables de commande.

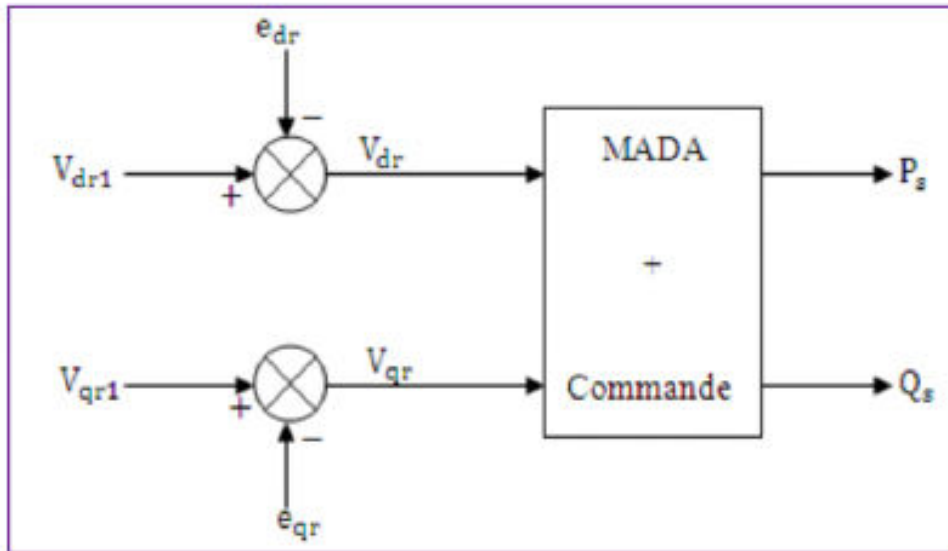


Figure III.5 : commande de MADA [5].

III.7 Description GADA

Les équations permettent d'établir le schéma bloc du système à réguler ;

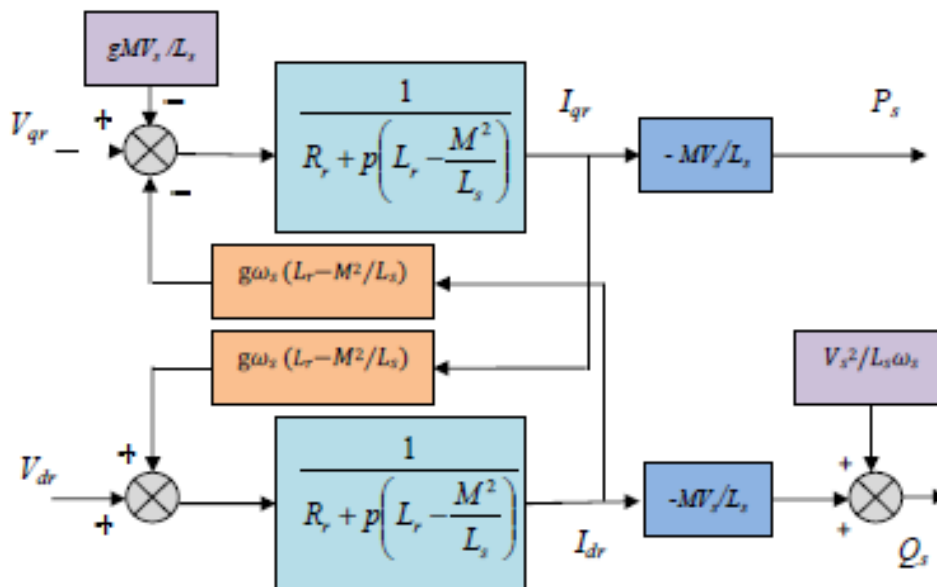


Figure III.6 : Schéma bloc du système GADA [13].

Ainsi, il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [6].

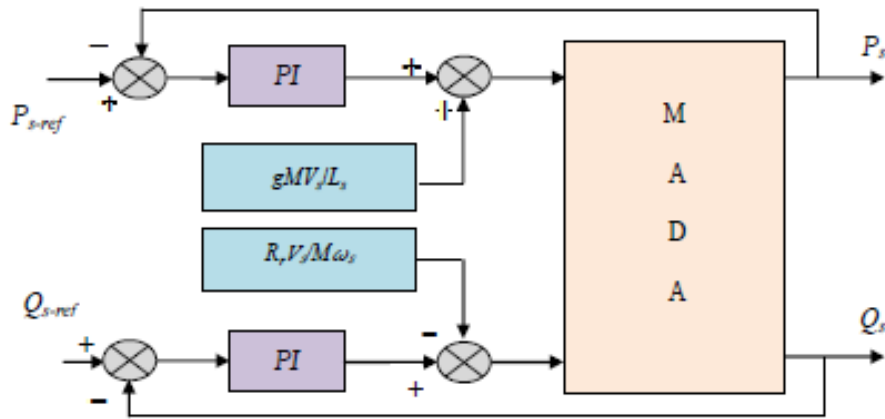


Figure III. 7 : commande vectorielle direct [13].

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte [6].

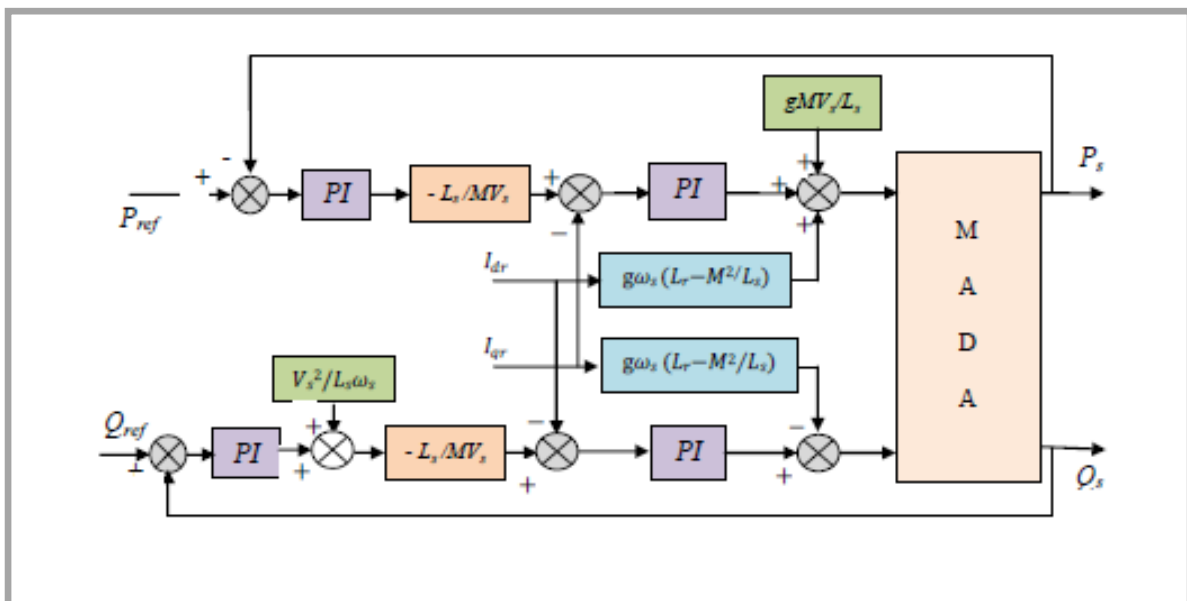


Figure III. 8 : Commande vectorielle indirect [1].

III.8 Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) »

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base de modèle simplifié de la Figure (III.6) Nous avons opté pour le choix des PI vue leur simplicité et la facilité de mise en œuvre tout en offrant des performances acceptables [13] [1].

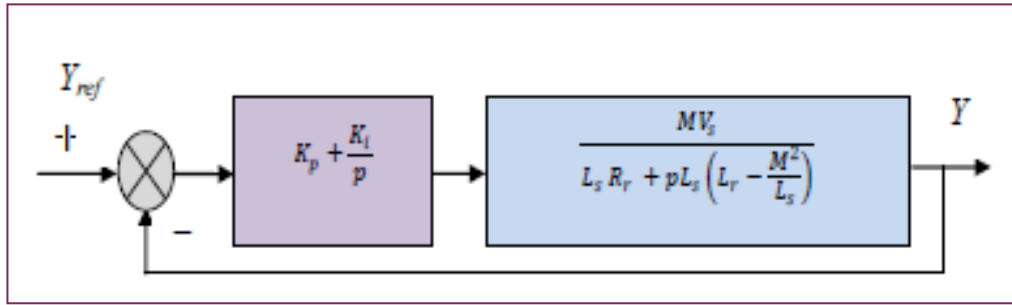


Figure III.9 : Schéma bloc du système régulé par un PI [1].

La Figure III.9 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) s'écrit [3]:

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{k_p} \cdot \frac{L_s R_r}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}} \quad (III.13)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III.14)$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \cdot \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (III.15)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p\tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (III.16)$$

Avec « τ_r » le temps de réponse du système qui d'après des études effectuées par de nombreux chercheurs sur ce type de régulations l'ont fixés à l'ordre de 10ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse [3]:

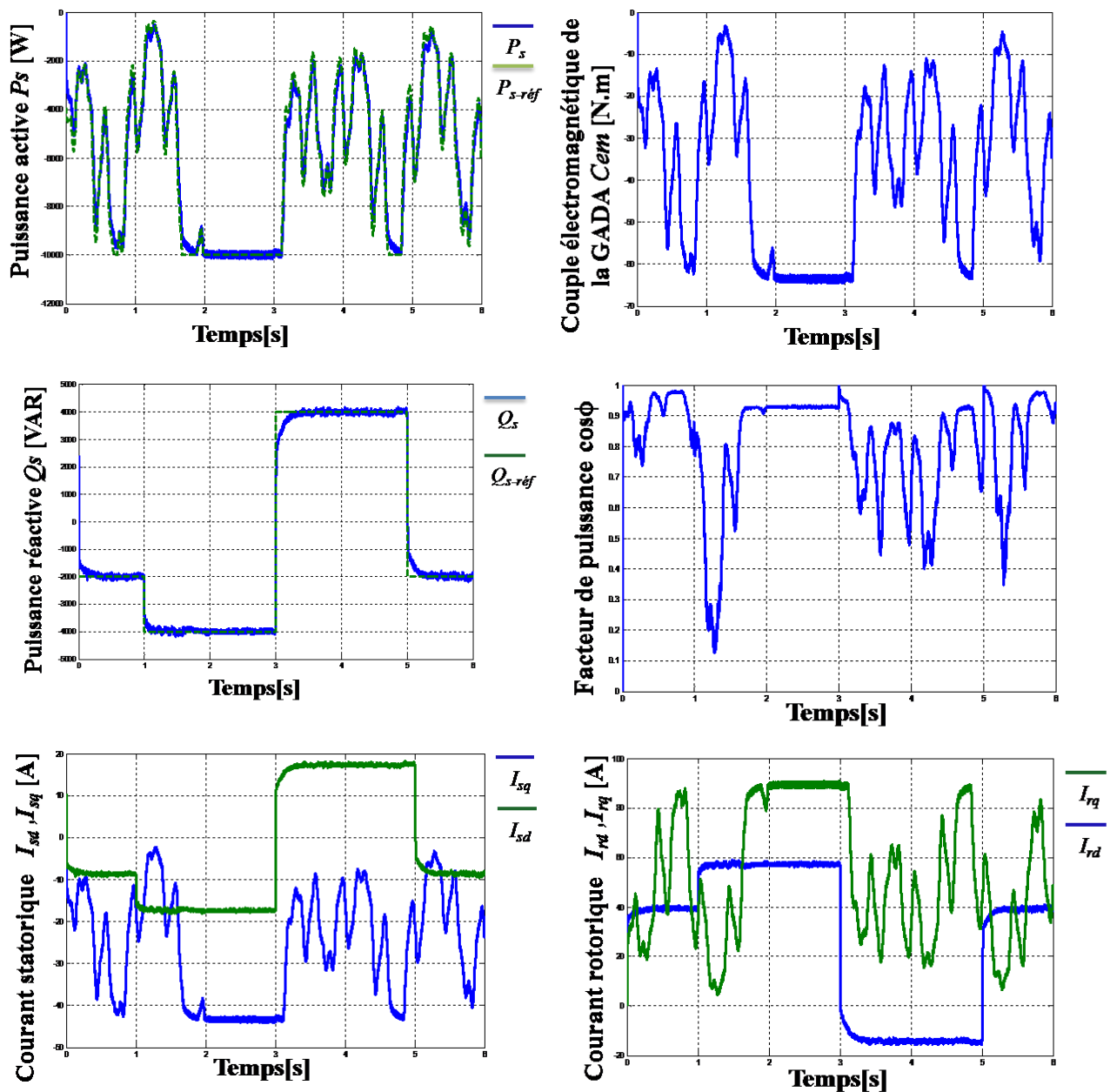
$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}; K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (III.17)$$

III.9 Simulation et interprétation des résultats

Les deux commande vectorielle directe (CVD) et indirecte (CVI) appliquées à la gestion de la puissance de la GADA ont été validées par simulation numérique à l'aide de l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les caractéristiques électromécaniques de la génératrice employée pour la modélisation sont détaillées en annexe. Dans le but d'évaluer de manière rigoureuse les performances dynamiques et statiques des deux approches de commande, trois campagnes de tests ont été réalisées : le suivi de consignes de puissance active et réactive, le pilotage du facteur de puissance, ainsi que l'analyse de la robustesse des algorithmes face aux variations paramétriques de la machine synchrone.

III.9.1 Commande vectorielle direct

❖ Test de suivi de consigne :



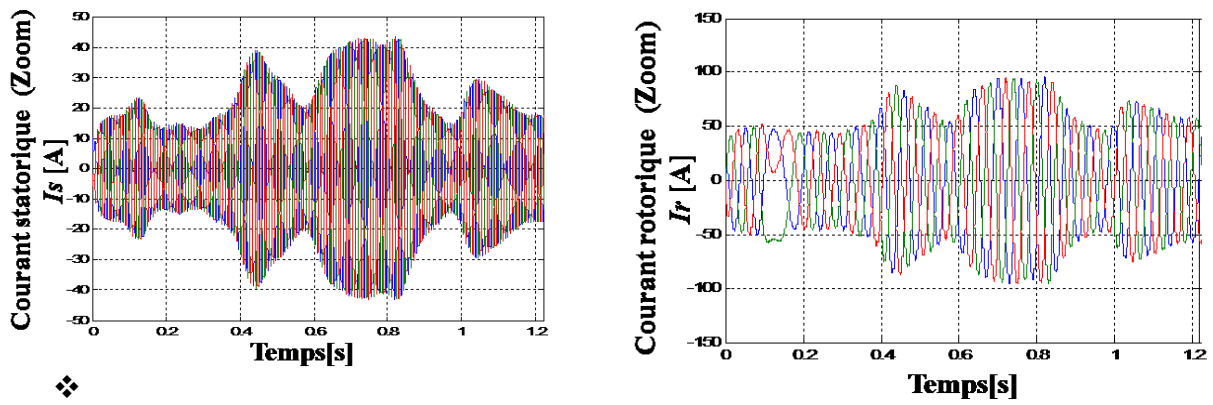


Figure III.10 : Résultats de simulation de la CVD à vitesse variable de la GADA.

❖ Contrôle de facteur de puissance

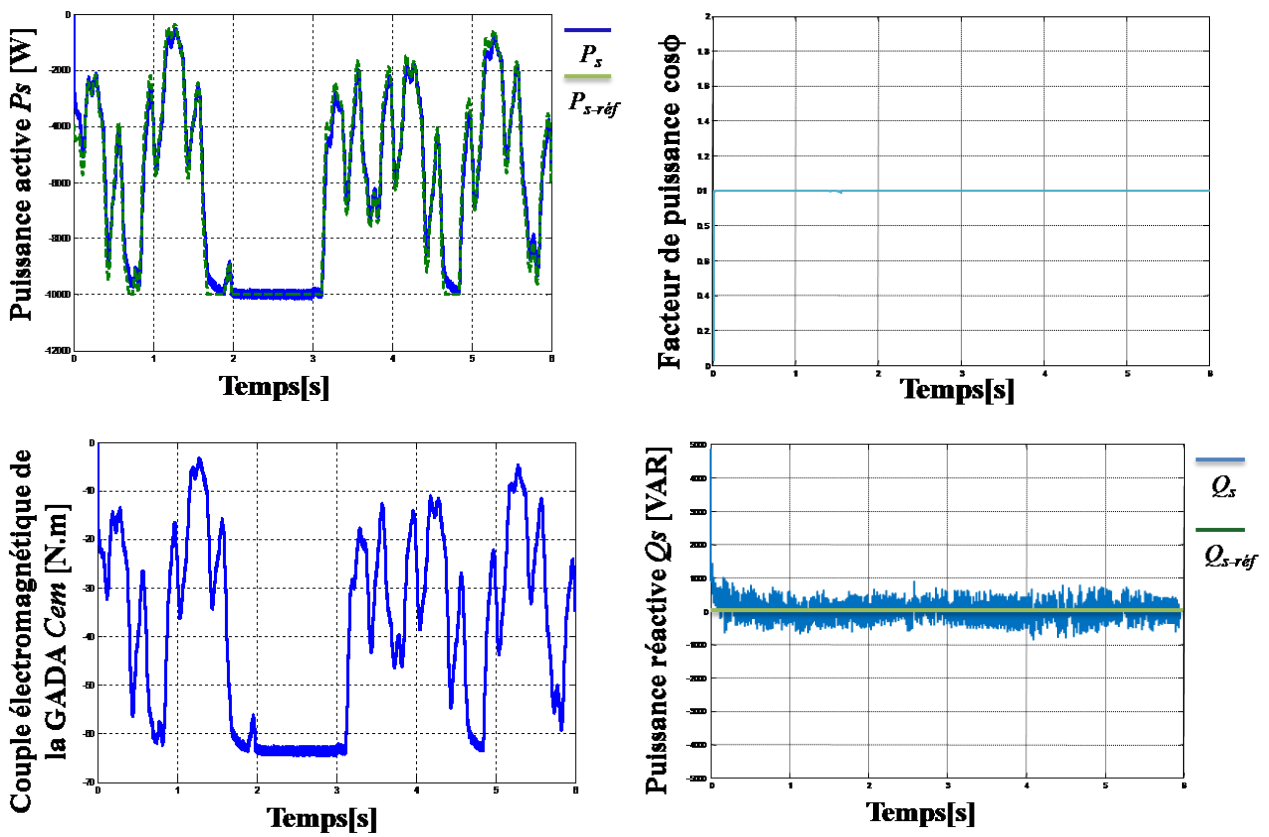


Figure III.11 : Commande vectorielle de la GADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable.

III.9.2 Commande vectorielle indirect

❖ Test de suivi de consigne :

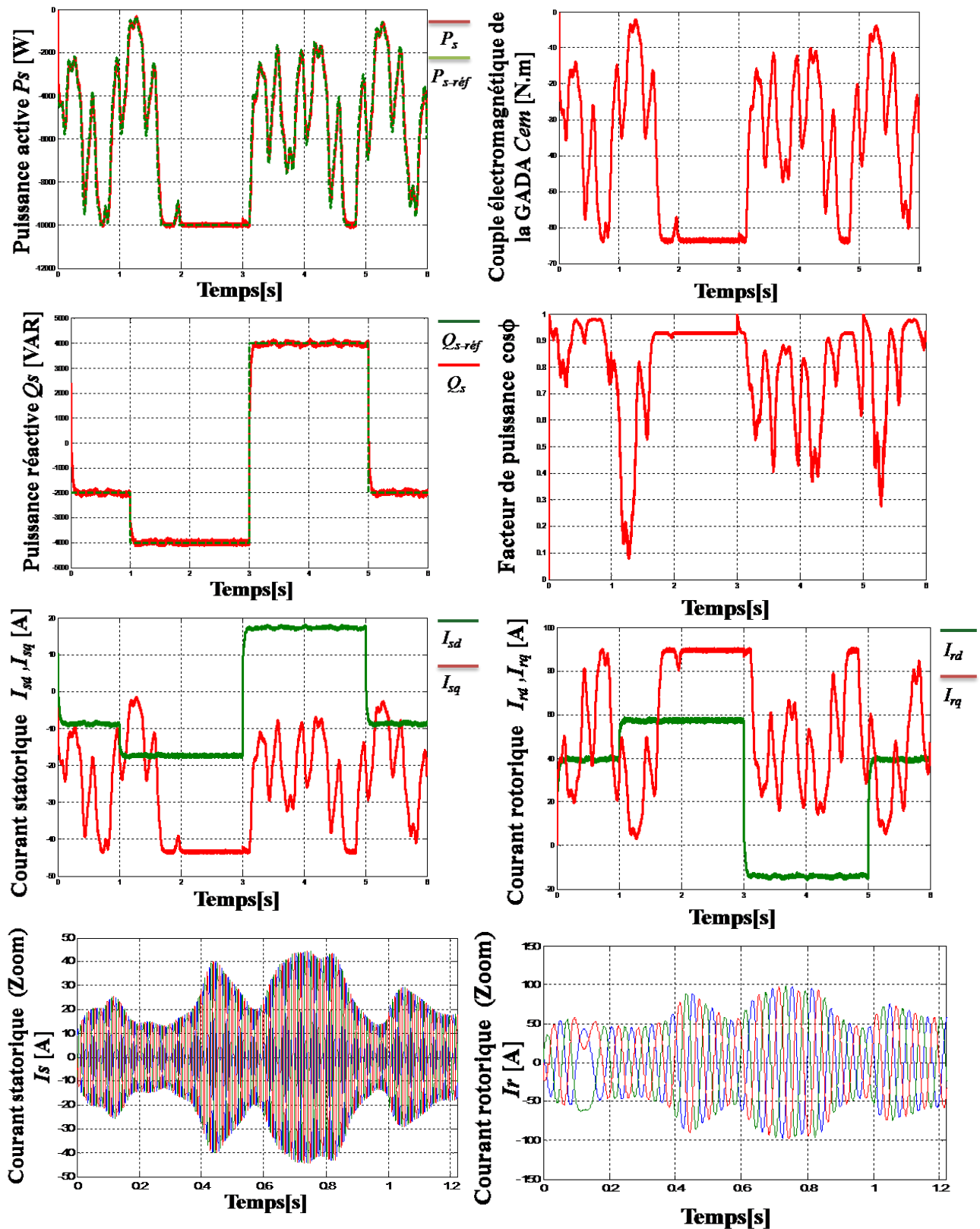


Figure III.12 : Résultats de simulation de la CVI à vitesse variable de la GADA.

❖ Contrôle de facteur de puissance

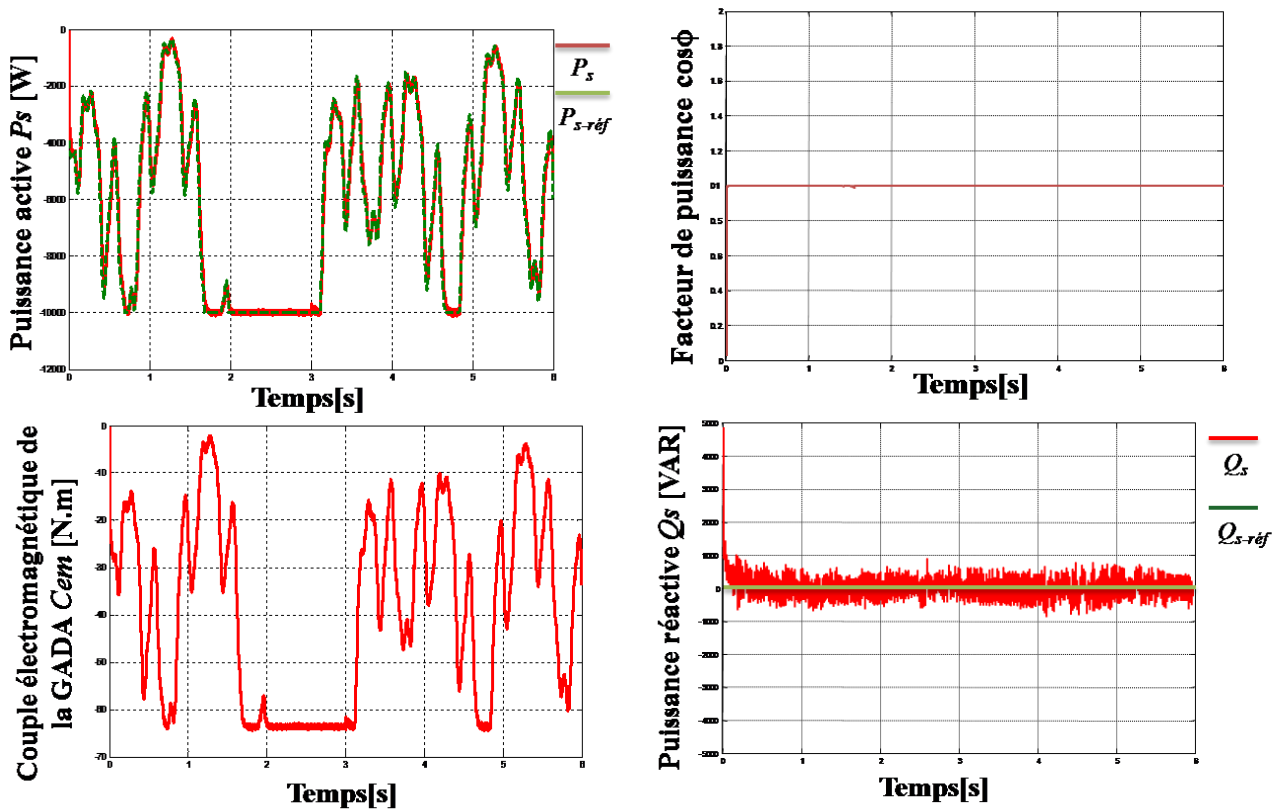


Figure III.13 : Commande vectorielle de la GADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable.

Interprétation des résultats

❖ Test de suivi de consigne :

Les résultats obtenus à partir des figures mettent en évidence la performance des stratégies de commande appliquées à la GADA. Dans les deux cas, on observe que les consignes de puissance, tant active que réactive, sont correctement suivies, ce qui témoigne de la précision et de la stabilité du système. Le comportement dynamique est jugé satisfaisant : la réponse du système est rapide, sans dépassement notable, et l'erreur statique est quasi nulle, ce qui valide l'efficacité des régulateurs utilisés.

D'un point de vue électromagnétique, les résultats confirment également la décorrélation partielle entre les axes de commande d et q , bien que l'effet du couplage reste perceptible. On observe que la puissance active statorique P_s est principalement influencée par le courant rotorique en quadrature I_{qr} , tandis que la puissance réactive statorique Q_s dépend du courant direct I_{dr} . Ce découplage permet un contrôle indépendant des puissances active et réactive, bien que le couplage résiduel reste faible et sans impact significatif sur la qualité de régulation.

Enfin, l'analyse montre que la puissance échangée avec le réseau peut être ajustée selon les besoins : une puissance active négative indique que le réseau reçoit de l'énergie produite par la GADA, ce qui confirme sa capacité à fonctionner en mode générateur. L'ensemble des

résultats valide donc la robustesse et la pertinence des deux méthodes de commande vectorielle étudiées, directe et indirecte, dans le cadre d'une exploitation réaliste du système.

❖ Contrôle de facteur de puissance :

Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

On peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé un facteur de puissance unitaire ($\cos\varphi = 1$).

❖ Tests de robustesse :

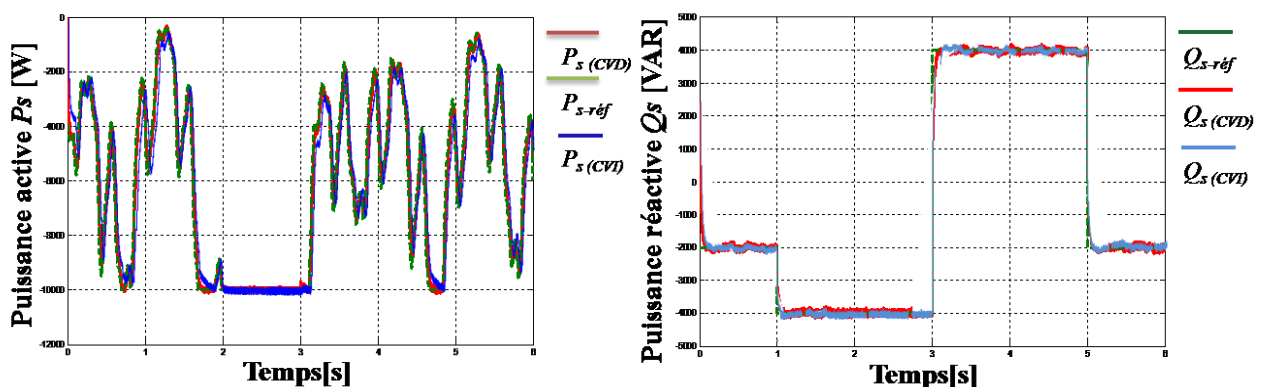


Figure III.14 : Résultats de simulation des tests de robustesse à vitesse variable de la GADA.

Le régulateur PI perd sa robustesse particulièrement face aux variations des inductances car le calcul des gains k_p et k_i du régulateur repose essentiellement sur ces paramètres. Si plusieurs paramètres varient en même temps dans de grandes proportions, il est sûr que les régulateurs n'arriveront plus à faire fonctionner le système convenablement.

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations des paramètres. L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la GADA utilisé.

Commande directe ; Si l'on avait changé un paramètre de la machine pour la commande directe les références de la puissance active et réactive ne suivent pas parfaitement les consignes et provoquent des erreurs statiques sur les puissances. L'influence des variations des paramètres de la machine sur la commande directe est présentée à la figure.

Pour une variation de la résistance rotorique de +50 % qui correspond au cas d'échauffement du bobinage rotorique, les puissances active et réactive viennent à suivre leurs consignes correctement. Cependant une variation de ± 10 % sur les inductances détériore les performances de la commande directe.

Commande indirecte ; Nous avons fait plusieurs essais avec la commande indirecte sur la variation de paramètres électriques de la machine et, on note donc que la variation de la résistance rotorique de +50 % de sa valeur nominale n'affecte pas le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle de puissance. Cette variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles de

régulations nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance. Vis-à-vis des variations des inductances la commande perd ses performances. Les résultats des simulations obtenus sont donnés à la figure.

	$t_r(P_s)$	$t_r(Q_s)$
CVD	0.1 s	0.2 s
CVI	0.03 s	0.04 s

Tableau III.1: Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle directe et indirecte.

	ΔP_s	ΔQ_s
CVD	4.15 %	3.65 %
CVI	2.25 %	1.75 %

Tableau III. 2: Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle directe et indirecte.

L'analyse comparative des performances dynamiques et statiques des deux stratégies de commande vectorielle — directe (CVD) et indirecte (CVI) — est résumée dans les tableaux III.1 et III.2. On constate que la commande vectorielle indirecte (CVI) surpasse nettement la commande directe (CVD) en termes de temps de réponse. En effet, le temps de réponse pour la puissance active est réduit à 0.03 s en CVI contre 0.1 s en CVD, tandis que celui de la puissance réactive passe de 0.2 s (CVD) à seulement 0.04 s (CVI). Cette réactivité accrue traduit une meilleure capacité de la stratégie indirecte à s'adapter rapidement aux variations des consignes, ce qui est crucial pour les applications en réseau intelligent ou en micro-réseaux nécessitant une réponse rapide.

En ce qui concerne les performances statiques, la CVI présente également des résultats supérieurs. L'erreur statique relative sur la puissance active est réduite à 2.25 % (soit 225 W) pour la commande indirecte, contre 4.15 % (415 W) pour la commande directe. De même, l'erreur sur la puissance réactive passe de 3.65 % (365 VAR) en CVD à seulement 1.75 % (175 VAR) en CVI. Ces résultats montrent que la CVI assure non seulement une meilleure précision dans le suivi des consignes mais réduit également les écarts résiduels à l'état stationnaire.

En conclusion, la commande vectorielle indirecte se distingue par ses meilleures performances tant du point de vue dynamique que statique, la rendant plus adaptée aux systèmes exigeant une régulation fine et rapide des puissances active et réactive

III.10 Conclusion

La méthode du flux orienté appliquée depuis quelques années à la machine asynchrone à double alimentation reste la méthode la plus répondeuse. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

La commande vectorielle que nous avons développée présente une poursuite satisfaisante de la référence. Il faut signaler que le régulateur PI ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine.

Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes.

Notre prochain chapitre est consacré à l'une de ces commandes qui occupe une large place dans la littérature de la commande des systèmes intelligents.



CHAPITRE IV
La Commande Floue

Eolienne de la cour (1890)

IV.1 Introduction

La logique floue constitue une méthode de commande innovante, largement adoptée au Japon dans un premier temps. Plus récemment, son utilisation s'est progressivement étendue à l'Europe. Contrairement aux méthodes de réglage conventionnelles, qui reposent sur une modélisation rigoureuse du système à l'aide de fonctions de transfert ou d'équations d'état, la commande par logique floue adopte une approche plus heuristique et programmatique. Elle permet notamment d'intégrer l'expérience et le savoir-faire des opérateurs humains[11].

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre présentera les notions fondamentales de la logique floue. La seconde partie décrira la structure d'une commande floue, à travers ses différentes étapes : fuzzification, inférence et défuzzification. Cette commande sera ensuite appliquée au GADA (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation). Les performances de cette commande seront illustrées à l'aide de résultats de simulation.

IV.2 Un peu d'histoire

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0,1\}$. Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs. Il a dessiné la première fonction d'appartenance [2]. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automaticien de réputation internationale, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985 [9,5].

Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et utilisée dans de nombreuses applications industrielles et gestionnaires. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement [13,4].

IV.3 Domaines d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [14,6] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...) ; Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.) ;
- Systèmes autonomes mobiles ;
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...) ;
- Systèmes de conditionnement d'ambiance ;

IV.4 Rappels des principes de la logique floue

Les systèmes réels sont généralement non linéaires. Leurs modèles sont exprimés sous forme d'un produit de fonctions non linéaires connues à l'aide de paramètres (constants et/ou lentement variables) inconnus. Malheureusement, il est souvent difficile, voire impossible de décrire tous les phénomènes mis en jeu dans un système à partir de fonctions non linéaires connues, notamment pour un système physique complexe. Une solution à ce problème peut être envisagée à partir d'une représentation de la dynamique du système non linéaire par un système flou ou les relations entre les entrées, les sorties et les états sont exprimées par des règles floues de type [4] :

SI (condition) ALORS (action)

Les systèmes flous sont des systèmes à base de connaissances construits à partir des opérateurs de la logique floue. La formulation mathématique de la logique floue donne naissance à une théorie dite théorie des ensembles flous. Cette théorie n'est qu'une extension de la théorie classique des ensembles, sauf que la logique floue est caractérisée par la notion des valeurs intermédiaires, d'où la nécessité de mettre en évidence certaines notions de cette théorie. La logique floue permet de traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel [5].

La technique de commande floue est souvent présentée comme une technique robuste capable de compenser quasi naturellement les incertitudes et / ou le manque de connaissances précises quant au processus à commander.

IV.5 Théorie des ensembles flous

Un ensemble flou A sur un univers de discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs sur l'intervalle $[0, 1]$. Un ensemble flou est une généralisation d'un sous ensemble ordinaire qui sa fonction d'appartenance prend que les deux valeurs 0 ou 1 [1].

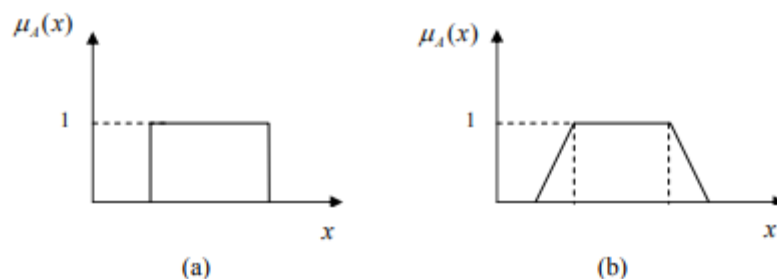


Figure IV.1: Fonction d'appartenance : (a) logique classique : (b) logique floue [10]

En logique floue un élément peut résider dans plus qu'un ensemble à des degrés d'appartenances différents. Ceci ne peut se produire dans la théorie des ensembles ordinaires. Un ensemble flou A dans U peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique x et son niveau (degré) d'appartenance :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}, \tag{IV.1}$$

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu (Exp : nombres réels), le sous ensemble flou A est écrit comme suit IV.2 [12] [3] [4] :

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x} \tag{IV.2}$$

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x_i)}{x} \tag{IV.3}$$

Quand U est discret, A s'est écrit comme IV.3.

IV.6 Variables Linguistique

Une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue [10] [4] [5].

Définition 1 : Une variable linguistique est un triplé dans lequel x est une variable définie sur un ensemble de référence U. T_x l'ensemble des noms des valeurs linguistiques de x, contient des sous ensembles flous de U, utilisable pour caractériser x [5].

Exemple 1 : Soit la pression interprétée comme une variable linguistique. Elle peut être décomposée à l'ensemble des termes suivants :

Faible OK Forte Enorme Moyenne

Où chaque terme est caractérisé par un ensemble flou dans l'univers de discours U = [100,2300]. Ces termes peuvent être caractérisés comme des ensembles flous pour lesquels les fonctions d'appartenance sont illustrées.

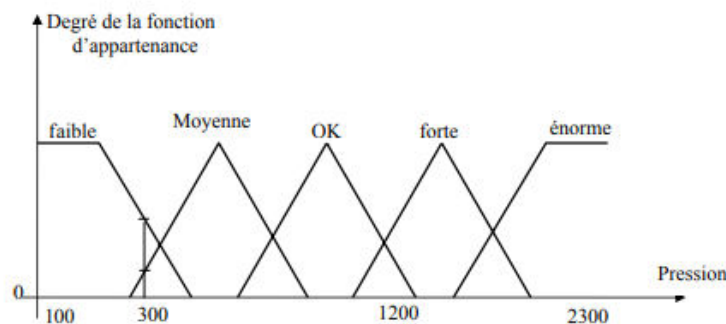


Figure IV.2: Fonctions d'appartenance de pression (T) [10].

IV.7 Les fonctions d'appartenance

Pour le traitement numérique en logique floue, il est nécessaire d'associer pour chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance qui prend différentes formes suivantes [6] [7] [8] :

- **la fonction triangulaire**, définie par trois paramètres a , b et c , soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{IV.4})$$

- **la fonction trapézoïdale**, définie par quatre paramètres a , b , c et d soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{IV.5})$$

- **la fonction en cloche**, définie par deux paramètres, x_0 qui détermine la position du sommet ($\mu = 1$) et a qui impose la largeur du domaine, soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2} \quad (\text{IV.6})$$

- **la fonction gaussienne**, définie par deux paramètres σ , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (\text{IV.7})$$

- **la fonction sigmoïde**, définie par deux paramètres a , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x - x_0))} \quad (\text{IV.8})$$

Les fonctions d'appartenance sont choisies arbitrairement par l'utilisateur, en se basant sur son expérience, donc les fonctions d'appartenance pour deux utilisateurs doivent être assez différentes à cause de leurs expériences, perspectives, cultures.... Les formes les plus couramment utilisées pour les fonctions d'appartenance sont les formes triangulaires, trapézoïdales ou Gaussiennes [4].

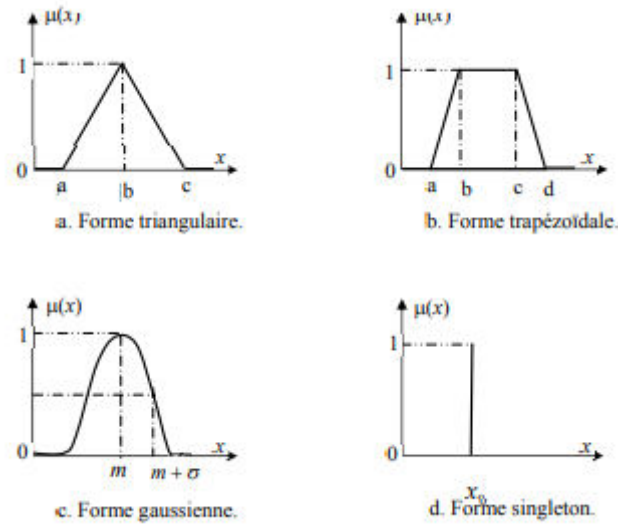


Figure IV.3: Fonctions d'appartenance [10]

IV.8 Opération sur les ensembles flous

En logique floue, l'union, l'intersection et la complémentation sont définies en termes de leurs fonctions d'appartenance. Soient les ensembles flous A et B définis par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$.

Une définition de l'union floue mène à la fonction d'appartenance [1] [6] :

$$C = A \cup B \text{ (A ou B), tel que :}$$

$$\forall x \in U \quad \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{IV.9}$$

Une autre définition de l'intersection floue mène à la fonction d'appartenance :

$$D = A \cap B \text{ (A et B), tel que :}$$

$$\forall x \in U \quad \mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{IV.10}$$

L'opérateur min est commutatif :

$$\mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_B(x), \mu_A(x)) \tag{IV.11}$$

Et pour la complémentation on a :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{IV.12}$$

Exemple 2 : Considérons les deux ensembles flous A et B représentés sur la Figure IV.4. On observe que le point (élément) $x = 0.5$ existe dans les deux ensembles simultanément, mais à des degrés différents.

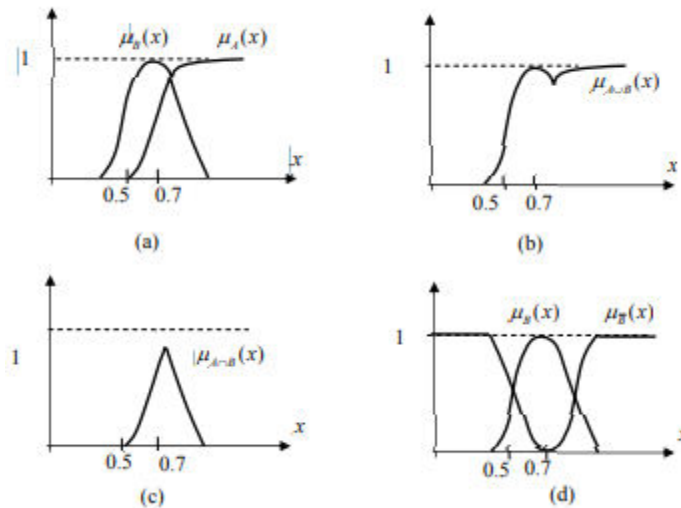


Figure IV.4: Fonctions d'appartenance associées à A et B

Les opérations « max » et « min » ne sont pas les seules opérations qui peuvent modéliser l'union et l'intersection floues. Zadeh dans son premier article pionnier, a défini deux opérations, un pour l'union floue et l'autre pour l'intersection floue [1] [6] :

- Union floue: (maximum and algebraic sum)
- Intersection floue: (minimum and algebraic product)

IV.9 Réglage et Commande par la logique floue

La conception d'un régulateur classique (par exemple un PI) préconise la connaissance précise du modèle du système à contrôler. Les valeurs d'entrée doivent être mesurées avec exactitude afin d'éviter les erreurs, contrairement au régulateur flou qui ne demande aucune de ces deux spécifications. Le but de La commande par logique floue est de traiter des problèmes de commande de processus. Elle se diffère cependant sur les points suivants [2] [6] [8]:

- La connaissance mathématique de la fonction du processus n'est pas nécessaire ;
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser) ;
- Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié « expert » ;
- Le régulateur par la logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage) mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

IV.9.1 Principe d'un régulateur flou

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la fuzzification, la base de règles, mécanisme d'inférence et la défuzzification comme il est montré par la figure (IV.6) [2] [6] [7] [8]:

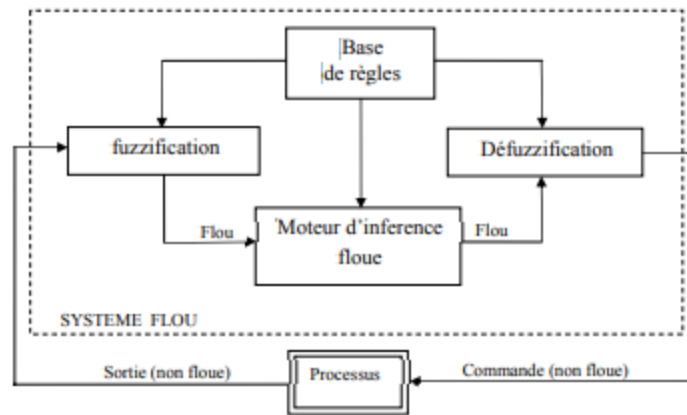


Figure IV.5 : Schéma synoptique général d'un système flou

IV.9.1.1 Base de règles

La base de règles floues contient des règles floues décrivant le comportement du système, elle représente le cœur du régulateur, et permet d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrée du régulateur aux variables de commande du système. Une base de règles floues est une collection de règles SI-ALORS.

Une représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou table des règles, permet de synthétiser le cœur de régulateur flou.

IV.9.1.2 Moteur d'inférence floue

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. En fait, le moteur d'inférence combine les règles floues, en utilisant le principe de la logique floue, pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie [6] [2].

Pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani) :

La méthode d'inférence max-min est réalisée, au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de

sortie est réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [2].

- Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen) :

La méthode d'inférence max-produit est réalisée, au niveau de la condition, l'opérateur « ET » par la formation du produit. La condition dans chaque règle, introduite par « ALORS » est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU », qui lie les différentes règles, est réalisé par la formation du maximum [8].

- Méthode de Sugeno

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [20].

IV.9.1.3 Fuzzification

La fuzzification transforme la grandeur physique d'entrée en une grandeur floue, utilisée pour activer les règles [2]. Il existe deux types de fuzzificateur généralement utilisés à savoir : La fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton.

IV.9.1.4 Défuzzification

La défuzzification est la dernière étape dans la commande floue. Elle consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou [6]. Autrement dit, elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus [3] [4] [5] [2].

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont [6] :

- Méthode du maximum ;
- Méthode de la moyenne des maximas ;
- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode de hauteurs pondérées.
- Méthode du maxima

IV.10 Application de la logique floue à la commande de la GADA

Dans cette section, nous nous intéressons à l'application de la logique floue pour le réglage de la GADA. On distingue souvent deux types de résultats de défuzzification, le premier est de type Mamdani et l'autre de type Sugeno. Dans notre cas, nous étudions celui de Mamdani.

IV.10.1 Synthèse du régulateur

La majorité des régulateurs utilisent le schéma simple proposé par Mamdani [7] pour les systèmes MIMO mono-entrée/ mono-sortie. Ce schéma est représenté par la figure (IV.6) suivante :

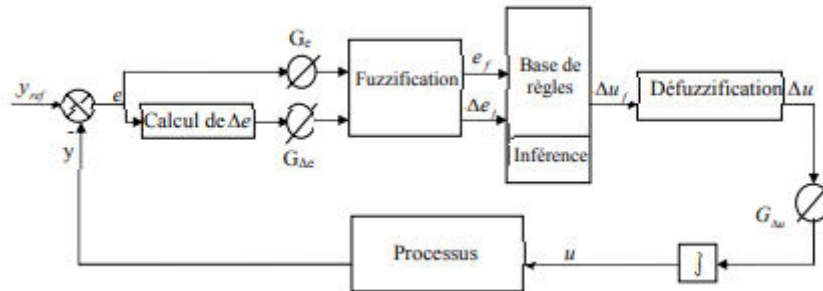


Figure IV.6 : Schéma bloc de régulation par régulateur flou.

D'après ce schéma, le régulateur est composé :

1. D'un bloc de calcul de la variation de l'erreur;
2. Des facteurs d'échelles (normalisation) associé à l'erreur (G_e), à sa variation (ΔG_e) et à la variation de la commande (ΔG_u);
3. D'un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation;
4. Des règles de commande floue;
5. De la logique floue utilisée pour l'évaluation des règles de réglage flou (inférence);
6. D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande floue en une valeur numérique;
7. Un bloc d'intégrateur.

IV.10.2 Loi de commande

Cette loi est en fonction de l'erreur et de sa variation $u = f(e, \Delta e)$ par conséquence, l'activation de l'ensemble des règles de décision donne la variation de la commande (Δu) nécessaire, permettant l'ajustement d'une telle commande u .

IV.10.3 Régulateur

On utilise un régulateur de type Mamdani. En remplaçant le régulateur PI classique par un régulateur floue (RF).

IV.10.3.1 Choix des Entrées / Sorties

Pour la boucle les variables d'entrées sont :

- L'erreur
- La variation de l'erreur Δ

Sortie :

- La commande.

IV.10.3.2 Définition des fonctions d'appartenance

Les régulateurs flous utilisés sont du type Mamdani dont les entrées sont : l'erreur et sa variation pour la boucle. Les différents ensembles flous sont caractérisés par des désignations standards.

Symboles Significations :

NG ; Négatif Grand EZ/EG ; Environ Zéro PG ; Positif Grand

Pour le choix de la forme des fonctions d'appartenance, nous avons opté pour la forme triangulaire et trapézoïdale.

IV.10.3.3 Base de règle

1. If (e is NG) and (d_e is NG) then (c_u is NG) (1)
2. If (e is NG) and (d_e is EZ) then (c_u is NG) (1)
3. If (e is NG) and (d_e is PG) then (c_u is EZ) (1)
4. If (e is EG) and (d_e is NG) then (c_u is NG) (1)
5. If (e is EG) and (d_e is EZ) then (c_u is EZ) (1)
6. If (e is EG) and (d_e is PG) then (c_u is PG) (1)
7. If (e is PG) and (d_e is NG) then (c_u is EZ) (1)
8. If (e is PG) and (d_e is EZ) then (c_u is PG) (1)
9. If (e is PG) and (d_e is PG) then (c_u is PG) (1)

Figure IV.7: les règles de décision.

Les valeurs contenues dans ces cellules ont été déterminées de façon logique en étudiant toutes les combinaisons possibles des variables d'entrée.

Par exemple, il est clair que, si l'erreur est fortement négative et sa variation aussi, le signal de commande doit être également. Au contraire, si l'erreur est environ zéro et sa variation aussi, il en sera de même de la commande. Si l'erreur est environ zéro et sa variation est fortement

négative ou si l'erreur est fortement négative et sa variation est environ zéro, le signal de commande doit être fortement négatif.

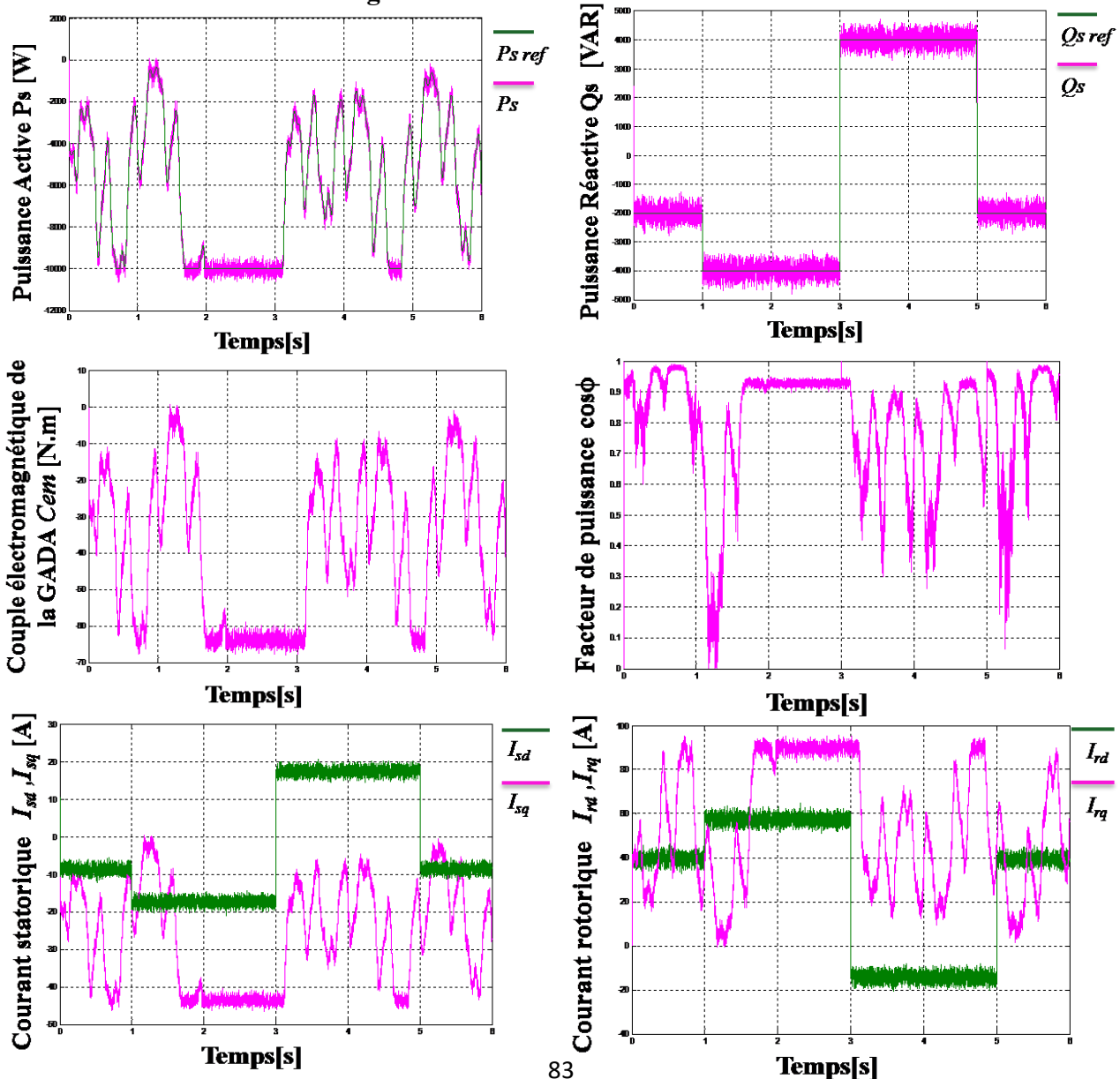
IV.10.3.4 Défuzzification

La sortie du mécanisme d'inférence est une variable floue. L'approximation floue de fonction doit convertir ses variables floues internes en grandeurs réelles de sorte que le système puisse utiliser ces variables. En cette étape, une valeur réelle de la variable de sortie est obtenue en employant la méthode du centre de gravité.

IV.11 Résultats et interprétations :

Notre simulation à été réalisé sous logiciel MATLAB, sous un vent avec vitesse variable et en respectant les 03 critères de configuration : la robustesse, le facteur de puissance unitaire, suivie de la consigne.

❖ Test de suivi de consigne



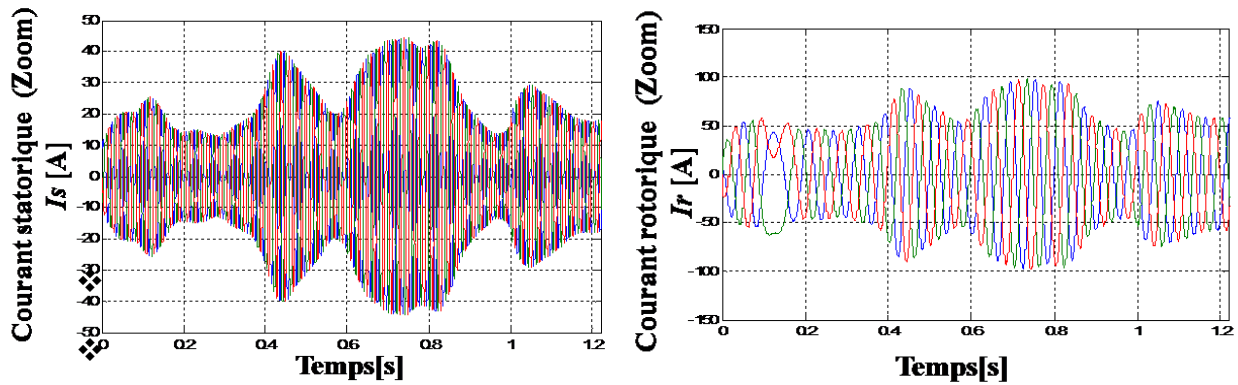


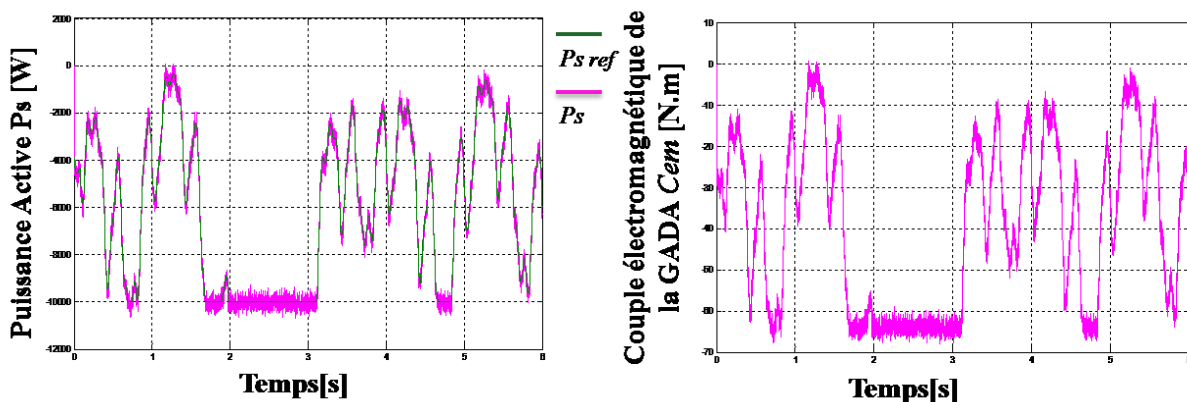
Figure IV.8: Résultats de simulation de la commande floue à vitesse variable de la GADA.

Interprétation :

La simulation de notre système nous donne les résultats suivants :

- Elle démontre que la commande floue adapte efficacement les signaux de consigne de commande pour maintenir le bon échange d'énergie active entre le réseau et la machine.
- La commande floue maintient Q stable proche de zéro, cela montre qu'elle régule correctement le flux magnétique, ce qui est crucial pour un bon fonctionnement avec le réseau.
- Un couple bien régulé que signifie que la commande floue maîtrise bien les flux et courants nécessaires à la production du couple, même en présence de perturbations.
- Des courants bien régulés témoignent de la robustesse de la commande dans le contrôle du flux et du couple. Un courant rotorique bien contrôlé est aussi crucial pour éviter la saturation ou l'échauffement.
- Le facteur de puissance est proche de 1, cela indique que la commande floue régule correctement les échanges de puissance réactive, ce qui est essentiel pour la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

❖ Contrôle de facteur de puissance



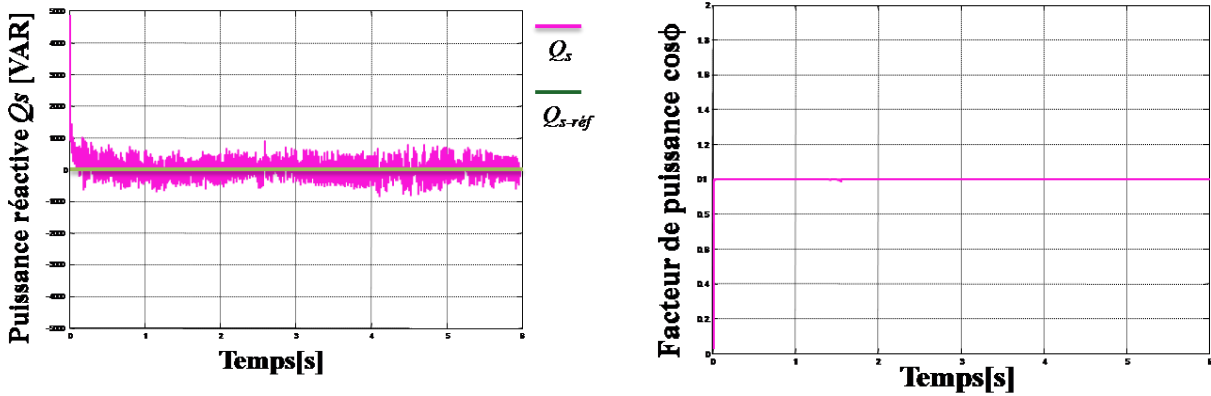


Figure IV.9: Résultats de simulation pour un facteur de puissance unitaire de la commande floue à vitesse variable de la GADA.

Interprétation :

Ce contrôle est pour :

- Améliorer le rendement énergétique du système (pas de pertes liées à la puissance réactive).
- Réduire les sollicitations du réseau en puissance réactive.
- Optimiser la qualité de l'énergie injectée au réseau (important pour les systèmes de production d'énergie comme l'éolien).
- Réduire la taille et le coût des composants (filtres, convertisseurs, etc.).

On remarque que la commande floue adapte dynamiquement les signaux de commande en fonction des variations non linéaires et incertaines de la machine et du réseau. Elle peut gérer les compromis entre la régulation du couple et de la puissance réactive. Contrairement aux commandes classiques à modèles rigides, elle peut maintenir un facteur de puissance unitaire même en conditions variables.

❖ Robustesse

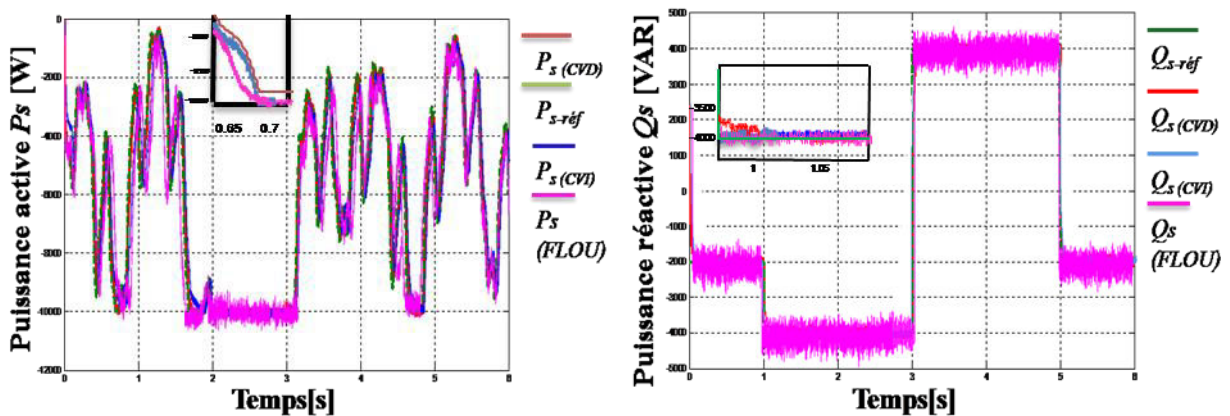


Figure IV.10: Résultats de simulation pour étude de robustesse de la commande floue à vitesse variable de la GADA.

Lorsqu'on observe les résultats simulés, on remarque que la commande floue présente des performances stables même lors de brusques variations de consigne, elle maintient une réponse cohérente, sans instabilité ou dérive significative, ce qui témoigne de sa robustesse face aux perturbations et variations paramétriques.

Cette robustesse s'explique par sa capacité à :

- Ne pas dépendre fortement du modèle du système,
- S'adapter aux incertitudes (variations de charge, défauts mineurs, erreurs de mesure),
- Simplifier la prise de décision grâce à une base de règles floues.

En contrepartie, cette commande peut générer davantage d'ondulations ou un comportement légèrement moins précis en régime permanent, comme on le constate sur les courbes où la réponse floue est plus bruitée que celle des commandes vectorielles.

	$t_r(P_s)$	$t_r(Q_s)$
CVD	0.1 s	0.2 s
CVI	0.03 s	0.04 s
FLOU	0.018 s	0.025

Tableau IV.1: Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle et la commande floue.

	ΔP_s	ΔQ_s
CVD	4.15 %	3.65 %
CVI	2.25 %	1.75 %
FLOU	1.75%	1.15%

Tableau IV. 2: Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle et la commande floue

Les deux tableaux montrent clairement la supériorité de la commande floue sur les commandes vectorielles classique directe et indirecte. D'un côté, elle présente le temps de réponse le plus court, ce qui est crucial pour les systèmes soumis à des variations rapides de charge ou de vent (cas des éoliennes). De l'autre, elle offre également les erreurs statiques les plus faibles, garantissant une excellente précision en régime permanent.

Bien que la commande vectorielle indirecte (CVI) améliore les performances par rapport à la commande directe (CVD), elle reste moins performante que la commande floue sur tous les critères mesurés ici.

Ces résultats confirment que la commande floue constitue un excellent compromis entre rapidité, précision et robustesse, surtout pour les systèmes non linéaires et variables comme les GADA dans les chaînes de conversion éolienne.

❖ Test de THD

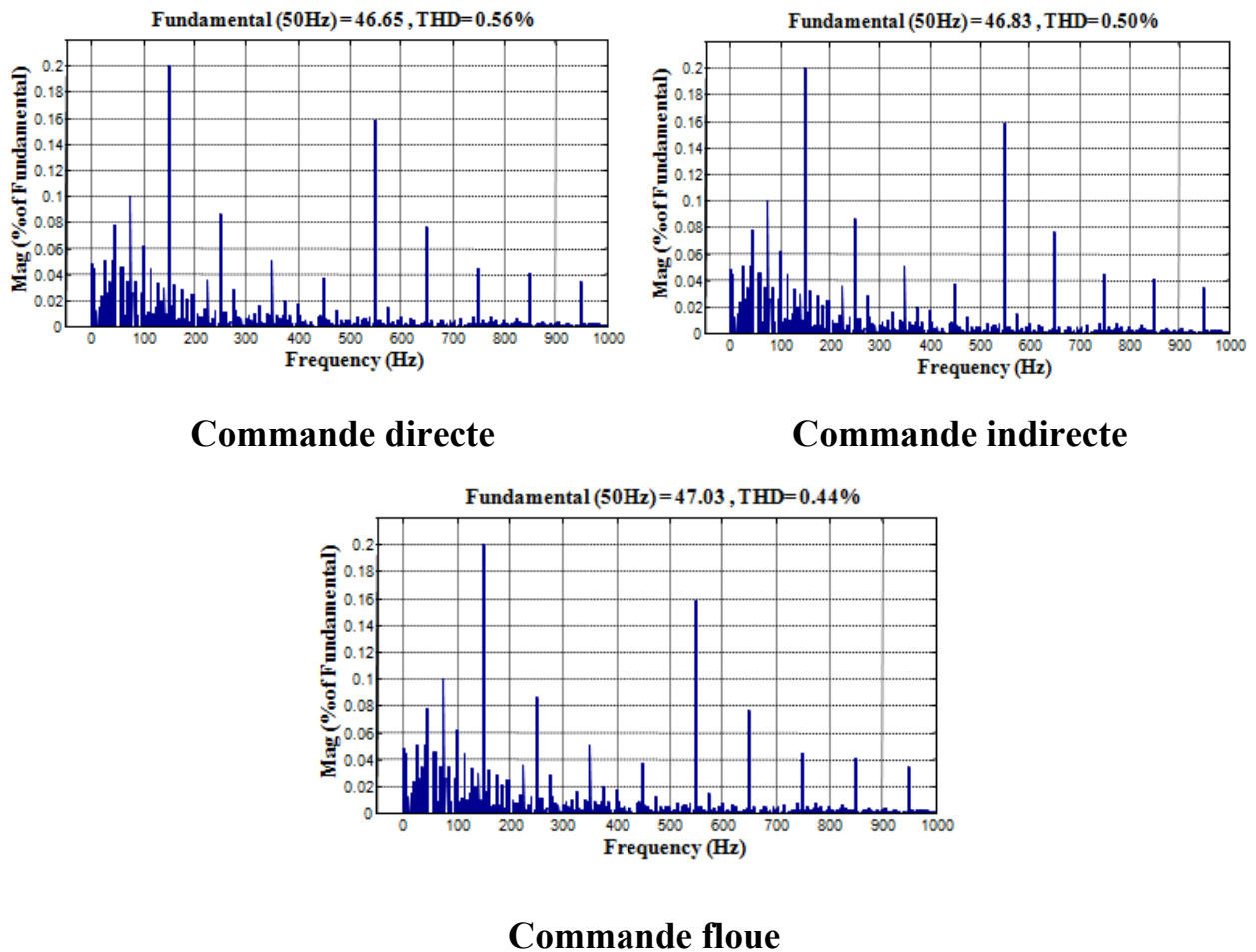


Figure IV.11: Résultats de simulation pour étude de THD de 03 commandes à vitesse variable de la GADA.

Le Total Harmonic Distortion (THD) est un indicateur clé de la qualité du signal électrique, reflétant le niveau de distorsion harmonique dans le système. Un THD plus faible indique un meilleur comportement dynamique, une réduction des pertes et une compatibilité accrue avec le réseau. En termes de qualité de signal et de performance harmonique, la commande floue se distingue comme la plus efficace ce qui signifie qu'elle génère le signal le plus propre, avec une distorsion harmonique minimale. Cela confirme sa robustesse et son aptitude à gérer les variations non linéaires sans nécessiter un modèle précis du système. Suivie par la commande indirecte suit de près avec un THD de 0.50 %, démontrant une bonne capacité de contrôle grâce à une régulation précise basée. Tandis que la commande directe reste légèrement moins performante sur ce critère. Cette hiérarchisation souligne l'intérêt croissant pour les techniques de commande intelligentes dans les systèmes d'énergie renouvelable.

IV.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière succincte les fondements théoriques de la logique floue ainsi que les notions de base relatives à la théorie des ensembles flous. Ces derniers constituent une généralisation des ensembles classiques, permettant de modéliser l'incertitude et l'imprécision inhérentes à de nombreux systèmes réels. Sur cette base, il est possible de concevoir des systèmes de commande flous, qui s'appuient sur un raisonnement approximatif et des règles linguistiques pour la prise de décision.

D'un point de vue structurel, un système de commande flou est constitué de quatre blocs fonctionnels majeurs :

1. La fuzzification, qui convertit les variables d'entrée numériques en valeurs floues (appartenance à des ensembles flous) ;
2. La base de règles, qui contient l'ensemble des règles linguistiques de type "SI...ALORS..." régissant le comportement du système ;
3. Le moteur d'inférence, qui effectue le raisonnement logique à partir des règles et des valeurs floues ;
4. La défuzzification, qui reconvertit la sortie floue en une commande précise utilisable par le système physique.

Dans le cadre de ce travail, nous avons appliqué une stratégie de commande floue non linéaire à une machine asynchrone double alimentation dans le but d'assurer la régulation. Cette commande a été implémentée dans une structure de commande vectorielle, où le régulateur classique de type PI a été substitué par un régulateur flou (RF). Les résultats de simulation numérique, obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink, montrent que le régulateur flou offre de meilleures performances dynamiques que le régulateur PI classique, notamment en termes de rapidité de réponse, de réduction du dépassement et de robustesse face aux perturbations.



Conclusion Générale et perspectives

Eolienne de Gedser (1957)

Dans le cadre de ce mémoire de master, nous avons mené une étude approfondie sur la commande robuste d'un système de conversion d'énergie éolienne, en mettant l'accent sur la modélisation, la commande et la simulation d'une chaîne de conversion à base de Machine Asynchrone à Double Alimentation. Ce type de machine constitue une solution particulièrement intéressante pour les applications éoliennes à vitesse variable, en raison de sa capacité à fonctionner efficacement sur une large plage de vitesses, tout en permettant le contrôle indépendant des puissances active et réactive via l'électronique de puissance côté rotor.

L'approche adoptée dans ce travail repose sur le développement d'un modèle dynamique complet de la chaîne de conversion, intégrant la modélisation aérodynamique de la turbine, les équations électromagnétiques de la GADA, ainsi que les convertisseurs statiques (redresseur, onduleur à MLI). L'ensemble a été implémenté et simulé dans l'environnement MATLAB/Simulink, offrant une plateforme de validation numérique performante.

Afin d'optimiser l'extraction de l'énergie, une stratégie MPPT a été mise en place. Celle-ci s'appuie sur la régulation indirecte de la vitesse de rotation de la turbine en fonction des variations du vent, garantissant ainsi un fonctionnement au point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking). La structure de commande adoptée repose sur une commande orientée flux et autre de floue, offrant une robustesse accrue face aux perturbations et incertitudes du système.

La simulation a permis de démontrer l'efficacité de la GADA en termes de stabilité dynamique, de régulation du couple et de maintien de la tension au point de couplage, même sous des profils de vent variables. Les performances du système ont également mis en évidence un couplage significatif entre la puissance active et réactive, soulignant la nécessité de stratégies de commande avancées pour une gestion fine des flux énergétiques injectés dans le réseau.

Malgré le caractère exclusivement numérique de cette étude, les résultats obtenus sont prometteurs et valident la faisabilité de l'approche proposée pour les systèmes éoliens. Ce travail constitue une base solide pour des recherches expérimentales futures et pour le déploiement de solutions robustes en production d'énergie renouvelable.

Perspectives de recherche

En vue d'élargir les contributions de ce travail et d'approfondir les performances du système, plusieurs axes de recherche peuvent être explorés :

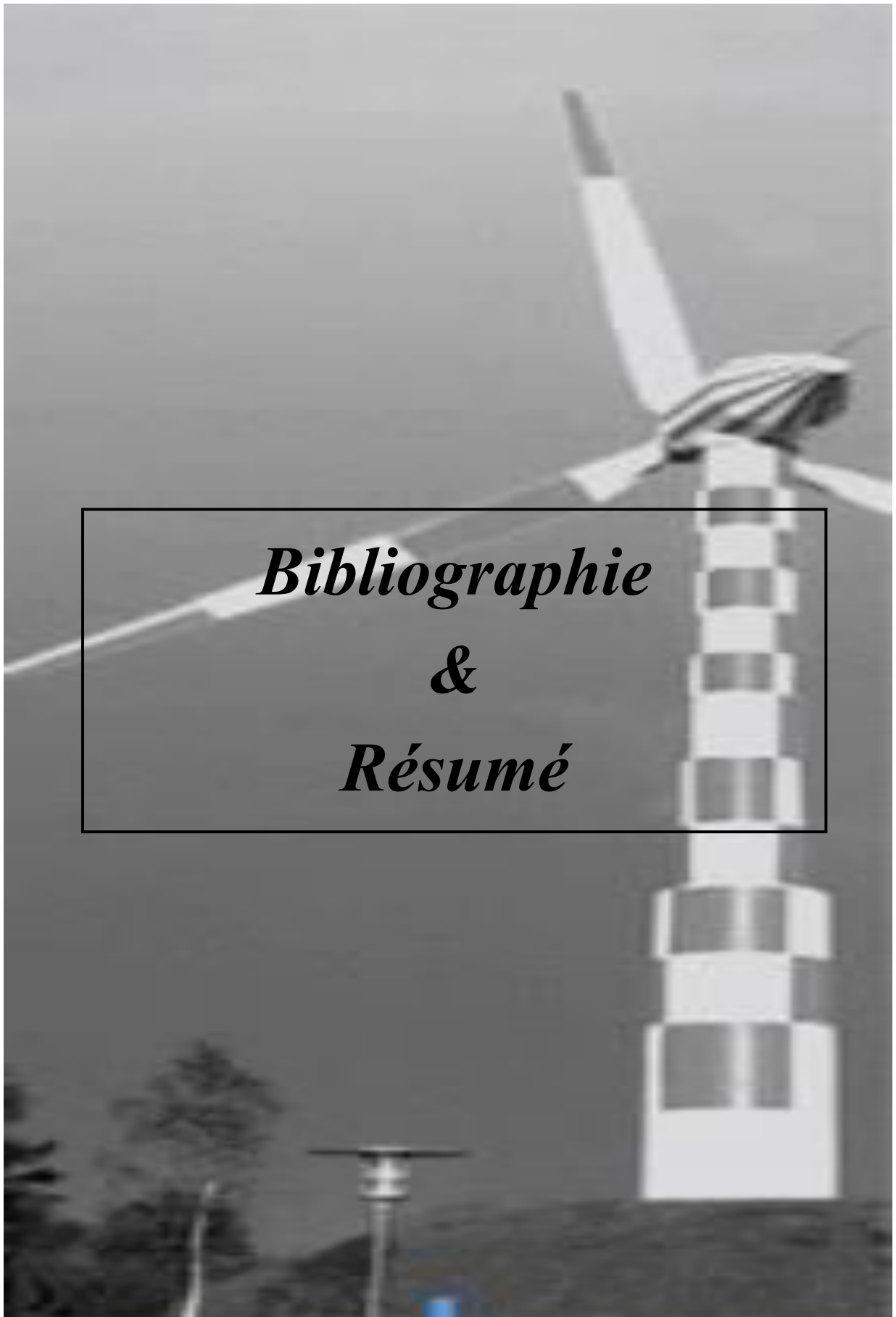
- Étude approfondie et commande avancée des convertisseurs statiques, incluant la mise en œuvre d'une Commande de Courant Réactif (CCR) pour la régulation conjointe des puissances actives et réactives.
- Validation expérimentale sur banc de test, permettant de confronter les résultats simulés aux conditions réelles de fonctionnement.

- Intégration de techniques MPPT intelligentes, telles que celles basées sur l'intelligence artificielle (algorithmes flous, réseaux de neurones, logique adaptative).

À plus long terme, l'étude pourrait être étendue à des architectures de production plus complexes, notamment :

- Systèmes hybrides (éolien-photovoltaïque, éolien-diesel, ou hybrides avec stockage), offrant une plus grande flexibilité d'exploitation et une meilleure autonomie énergétique.
- Commande multi-variable et optimisation multi-objectif, prenant en compte les contraintes économiques, la qualité de l'énergie, et la continuité de service.
- Gestion énergétique globale avec intégration de stockage (batteries, super-condensateurs), et optimisation technico-économique de la chaîne de conversion dans un cadre de production distribuée.

Ces perspectives visent à répondre aux enjeux croissants de l'intégration massive des énergies renouvelables dans les réseaux électriques intelligents de demain.



*Bibliographie
&
Résumé*

Eolienne Tvindkraft (1978)

- [1] www.energiesrenouvelables.org
- [2] S. E. AIMANI « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille 1, France.
- [3] M. ALLAM « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable » thèse en Doctorat , université sidi Belabess. 2016
- [4] M. Rapin, J.M. Noël, « Energie Eolienne, principe - Etude de cas», Dunod, ISBN: 978-2-10-050801-3, 2010.
- [5] Y. Liu, «A large time scale wind velocity simulation method in Computer Design and Applications », International Conference on, 2010, pp. V4-282-V4-286.
- [6] Wu B, Lang Y, Zargari N, Kouro S, «Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. Hoboken », NJ, USA: John Wiley& Sons, 2011.
- [7] H.ATMANIA, mémoire de magister « la stratégie d'implantation des énergies en Algérie cas de la Photovoltaïque", université d'ORAN Mohamed ben Ahmed ,2015.
- [8] Z. Boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi BelAbbès, Algérie, 2015.
- [9] H.SAIDI, « Polycopié de cours, Energies Renouvelables », 2016/2017.
- [10] CH. DARRAS, « Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)», Thèse de Doctorat en Energétique et Génie des Procédés, Université de Corse, France, 2011
- [11]N. KHENGAOUI .N, «Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Master Académique Universié Kasdi Merbeh ,Ouargla, 08/06/2015.
- [12] T. Y. MOUSSAOUI and M. HADA, «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Université d'EL-Oued, 2015
- [13] T. GHENNAM, Thèse de Doctorat, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», N° d'ordre: 162/2012.
- [14] B. Brice « contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice asynchrone double alimentation : on mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, université de Brigande accidentelle, 2010.
- [15] A. MEROUFEL. « Commande scalaire Commande vectorielle Commande directe du couple » Thèse d'ingénieur d'état, Electrotechnique, Université Djilali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2009.
- [16] FERKOUS : « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat, L'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Année 2008.
- [17] B. Sorensen, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Copyright. 2004 by Elsevier Science.
- [18] LABBE .j, « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolé » thèse de doctorat, école des mines de paris, 2006.
- [19] G. Li, J. Zhang, S. Cheng, J. Wen, Y. Pan, « State Space Formulation and Stability Analysis of a Doubly-fed Induction Machine with a Flywheel Energy Storage System », IEEE International Conference on Power System Technology, China, 2006.
- [20] S. El Khil, S. Belkhodja , M. David, B. Fornel, «Design of Rotor and Stator Converters for a Double Fed Induction Machine», In Proceedings of the IEEE, pp. 2485-2491, Montreal, Quebec, Canada, July 9-12, 2006.



Résumé :

Ce projet porte sur le développement de stratégies de commande avancées pour une éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation, afin d'améliorer son rendement, sa stabilité et sa robustesse.

Trois méthodes de commande ont été étudiées :

- **La commande vectorielle directe (DVC)** rapide mais sensible aux erreurs d'estimation du flux.
- **La commande vectorielle indirecte (CVI)** plus stable mais dépendante des paramètres machine.
- **La commande floue** robuste et bien adaptée aux variations rapides du vent.

Les simulations sous MATLAB/Simulink montrent que la commande floue offre les meilleures performances dynamiques et une grande robustesse face aux perturbations.

Mots-clés : Machine Asynchrone à Double Alimentation, Commande vectorielle, régulateur floue, Énergie éolienne, Contrôle robuste, régulateur PID, vitesse variable.



المخلص :

يتناول هذا المشروع تطوير استراتيجيات تحكم متقدمة لنظام طاقة ريحية يعتمد على آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة، بهدف تحسين الكفاءة والاستقرار والصلابة.

تمت دراسة ثلاثة طرق للتحكم :

- **التحكم المتجهي المباشر (DVC)** يتميز بسرعة الاستجابة، لكنه حساس لأخطاء تقدير التدفق.
- **التحكم المتجهي غير المباشر (IVC)** أكثر استقراراً، لكنه يعتمد على دقة معلمات الآلة.
- **التحكم الضبابي** يتمتع بمرونة وصلابة عالية، ويُعد مناسباً لتقلبات الرياح السريعة.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام MATLAB/Simulink أن التحكم الضبابي يوفر أفضل أداء ديناميكي وصلابة مقارنة بالطرق التقليدية.

الكلمات المفتاحية: الآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة ، التحكم الشعاعي ، المنظم الغامض ، الطاقة الريحية، التحكم المتين، منظم PID ، السرعة المتغيرة.



Abstract:

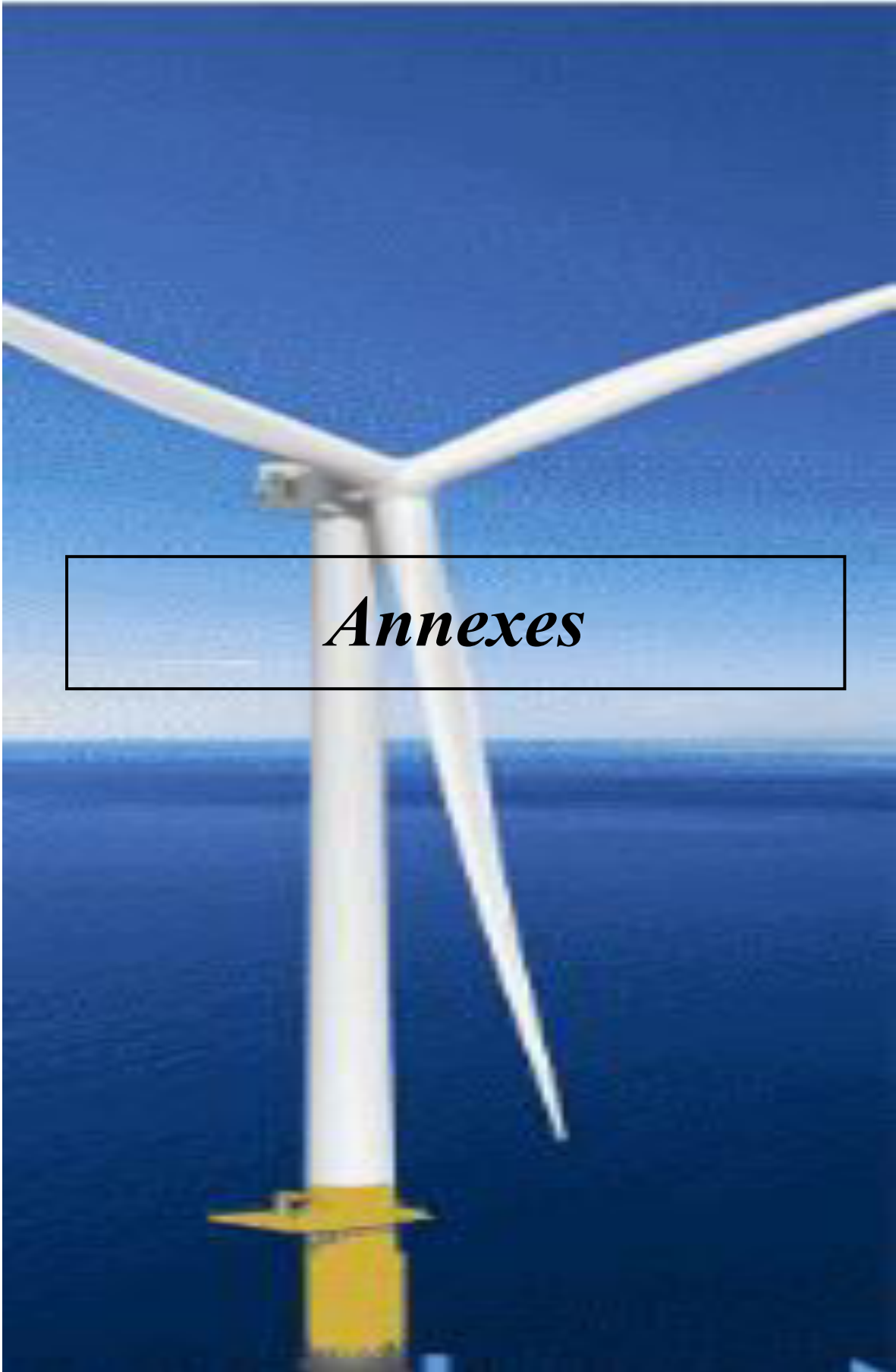
This project focuses on the development of advanced control strategies for a wind energy conversion system based on a Doubly-Fed Induction Machine, aiming to improve efficiency, stability, and robustness.

Three control methods were studied :

- **Direct Vector Control (DVC)** offers fast response but is sensitive to flux estimation errors.
- **Indirect Vector Control (IVC)** more stable but depends on accurate machine parameters.
- **Fuzzy Logic Control** combines flexibility and high robustness, well-suited to rapid wind speed variations.

Simulation results using MATLAB/Simulink show that fuzzy control delivers the best dynamic performance and robustness compared to classical vector control approaches.

Keywords: Doubly-Fed Induction Machine, Vector Control, Fuzzy Controller, Wind Energy, Robust Control, PID Controller, Variable Speed.



Eolienne Haliade X (2023)

Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation :

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	<i>kW</i>
<i>Tension nominale, V_s</i>	230/400	<i>V</i>
<i>Courant nominale, I_s</i>	20/30	<i>A</i>
<i>Vitesse nominale, Ω_n</i>	1420	<i>tr/min</i>
<i>Fréquence nominale, f</i>	50	<i>Hz</i>
<i>Résistance statorique, R_s</i>	0.455	Ω
<i>Résistance rotorique, R_r</i>	0.19	Ω
<i>Inductance statorique, L_s</i>	0.07	<i>H</i>
<i>Inductance rotorique, L_r</i>	0.0213	<i>H</i>
<i>Inductance mutuelle, M</i>	0.034	<i>H</i>
<i>Nombre de paires de pôles, p</i>	2	-

Paramètres de la turbine éolienne :

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	<i>kW</i>
<i>Nombre des pales</i>	3	-
<i>Rayon du rotor, R</i>	3	<i>m</i>
<i>Gain du multiplicateur de vitesse, G</i>	5.4	-
<i>Moment d'inertie total, J_T</i>	0.2	<i>kg.m²</i>
<i>Coefficient de frottement, f_r</i>	0.0016	<i>N.m/s</i>
<i>Vitesse du vent de démarrage, v_d</i>	4	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent nominale, v_n</i>	11	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent maximale, v_m</i>	25	<i>m/s</i>
<i>Masse volumique de l'air, ρ</i>	1.225	<i>kg/m³</i>