



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



Université'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité : machines Électriques

Thème

*Etude et Modélisation d'un système éolien
par régulateur logique floue
base de GADA*

Dirigé par:

Dr : Guediri abdelkarim

Réalisé par:

Labbi imad

Hechifa zine el abidine

Rehouma mohamed

Messai oun abbas

Devant le jury composé de :

Dr. Serhoud Hicham

Dr. Guediri Abdelkarim

Dr. Touil Slimane

Maitre de conférences

Maitre de conférences

Maitre de conférences

Président

Rapporteur

Examineur

Soutenu- septembre 2022

Remerciements

Au nom d'Allah ,le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux

La louange est à **Allah** l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Dr. Guediri abdelkarim, Enseignant l'Université d'El Oued, pour ces conseils précieux, les orientations ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordée pour mener ce travail à terme.

Je voudrais aussi remercier mes parents, tous les membres de ma famille , mes Frère et mes chères sœurs.

Mes remerciements vont également à mes amis, mes collègues et mes enseignants.

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction	3
I.2 Historique de l'énergie éolienne	3
I.3 Définition de l'énergie éolienne	4
I.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	5
I.2.1.1 Avantages	5
I.2.1.2 Inconvénients	6
I.2.2 Contexte actuel en Algérie	6
I.4 Principales composantes d'éolienne	7
I.4.2 Principe de fonctionnement	10
I.4.3 Conversion de l'énergie éolienne	10
I.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	10
I.5 Types des turbines éoliennes	12
I.5.1 Eolienne à axe vertical	12
I.5.2 Eoliennes à axe horizontal	12
I.5.3 Constitution d'une éolienne moderne	13
I.6 Structures des systèmes éoliens	14
I.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe	14
I.6.2 Fonctionnement à vitesse variable	14
I.6.3 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation	15
I.7 Machines électriques utilisées	16
I.7.1 Machines asynchrones	16
I.7.2 Machine asynchrone à double alimentation (GADA)	16
I.7.3 Machines synchrones	16
I.7.4 Machine à reluctance variable (MRV)	17
I.7.5 Machine à aimants permanents	17
I.8 Conclusion	18

Chapitre II : MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINEE

<i>OLIENNE...</i>	20
II.1 Introduction.....	21
II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA.....	21
II.3 Modélisation de la turbine éolienne.....	21
II.3.1 Modèle du vent appliqué au système.	22
II.3.2 Modèle aérodynamique	22
II.3.3 Modèle de la partie mécanique.....	24
II.4 Modes d'opération du système éolien à vitesse variable.	26
II.4.1 Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT).	28
II.4.1.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation	28
II.4.1.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	31
II.4.1.2.1 Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI	31
II.4.2 Zone III : Contrôle des variations du pas des pales (limitation de la vitesse et la puissance).	33
II.4.3 Résultats de simulation.....	34
II.4.3.1 Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse	34
II.5 Conclusion.....	38

Chapitre III : Commande d'un système éolien par logique floue base de GADA

III .1 Introduction	40
III.2 Principe et Historique de la Logique Floue	40
III.3 Opérateurs de la logique floue	41
III.4 Variables linguistiques.....	43
III.5 Fonctions d'appartenance.....	43
III.6. Structure de base d'un contrôleur flou.....	44
III.6.1. Base de connaissances.....	45
III.6.2. Fuzzification.....	45
III.6.3. Règles d'inférence floue	46
III.6.4. Défuzzification :	46

III.7. Développement du contrôleur flou.....	47
III.7.1 Description du contrôleur.....	47
III.8. Réglage des courants rotoriques de la GADA.....	49
III.9. Résultats de simulation.....	51
Conclusion	54
Conclusion.Générale.....	55
Annexe.....	XII
Bibliographie.....	XV

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Tableau II-1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques.....	42
Tableau. III.1. Matrice d'inférence du régulateur flou.....	.56

Liste de figures

CHAPITRE I :

Figure (I.1) : Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite)	5
Figure (I.2) : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure (I.2.1) : Principaux organes du système de conversion éolien	6
Figure (I.2.2) : carte du potentiel éolien en Algérie	8
Figure (I.3) : 1 ère ferme éolienne en Algérie	8
Figure (I.2.3) : composant d'une éolienne à axe horizontal	9
Figure (I.5) : monte la nacelle et ces éléments	10
Figure (I.6) : conversion de l'énergie cinétique du vent	11
Figure (I.9) : technologie éolienne à axe vertical	13
Figure (I.10) : technologie éolienne à axe horizontale	14
Figure (I.11) : constituants de la turbine	14
Figure (I.12) : éolienne à vitesse fixe	15
Figure (I.13) : Eolienne à MAS pilotée au stator	16
Figure (I.14) : Eolienne à MADA pilotée au rotor	17

CHAPITRE II :

Figure (II.1) : Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.....	22
Figure (II.2) : Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas régulé de 1.5 MW, pour différents angles β	25
Figure (II.3) : Modèle mécanique du système éolien.....	25
Figure (II.4) : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	27
Figure (II.5) : Variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique.....	28
Figure (II.6) : Zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	29
Figure (II.7) :Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation...	31
Figure (II.8) : Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation de la GADA.....	33

Notations et Symboles

LISTE DES SYMBOLES

V_v	<i>Vitesse du vent</i>
P_{aer}	Puissance aérodynamique
λ	Ration de Vitesse
C_p (λ, β)	Coefficient de puissance
β	Angle d'orientation des pales
ρ	Masse volumique de l'air
S	Surface circulaire balayée par la turbine
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
R_t	Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.
C_t	Couple de la turbine.
J	Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne.
J_t	Moment d'inertie de la turbine.
J_m	Moment d'inertie de la GADA.
f_v	Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la GADA
C_{em}	Couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA
G	Gain du multiplicateur
Ω_m	Vitesse de rotation de la GADA
N_r et N_s	Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique
g	Glissement
p	Nombre de paires de pôles
u	Rapport de transformation rotor/stator
ω_s et ω_r	Pulsations statorique et rotorique de la GADA.
R_s, R_r	Résistance statorique et rotorique
i_{as}(t), i_{bs}(t) et i_{cs}(t)	Courants statoriques des phases a, b et c
v_{as}(t), v_{bs}(t) et v_{cs}(t)	Tensions statoriques.
φ_{as}(t), φ_{bs}(t) et φ_{cs}(t)	Flux de stator
i_{ar}(t), i_{br}(t) et i_{cr}(t)	Courants rotoriques des phases a, b et c
v_{ar}(t), v_{br}(t) et v_{cr}(t)	Tensions rotoriques.
φ_{ar}(t), φ_{br}(t) et φ_{cr}(t)	Flux de rotor
L_s, L_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques
V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq},	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq},	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.

ABREVIATIONS

GADA	Génératrice Asynchrone Double Alimentation
TE	Turbine Eolienne
TEVV	Turbines Eoliennes à Vitesse Variable.
GS	Générateur synchrone
CC	Courant continu.
CA	Courant alternatif.

Introduction générale

en utilise l'énergie éolienne depuis des milliers d'années. Les Perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord. Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau. Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire [01].

Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate et viable des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. Cependant ces énergies ne sont pas considérées comme des énergies propres. Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives pour produire l'électricité tel qu'avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent [02].

De plus, La production d'énergie éolienne utilise des turbines à vitesse fixe ou à vitesse variable. Le système d'éolienne à vitesse variable basé sur GADA est devenu la configuration la plus populaire dans le système de conversion d'énergie éolienne en raison de ses mérites de fonctionnement à une large plage de variation de vitesse vent, contrôle de puissance active/réactive découplé, capacité de capture de puissance maximale, contrainte mécanique réduite, l'utilisation du convertisseur généralement 30 % de la capacité du générateur et une perte de puissance réduite par rapport à d'autres solutions telles que les générateurs à induction à vitesse fixe. Tous les avantages mentionnés ci-dessus du GADA sont possibles grâce au schéma de contrôle qui peut être mis en œuvre dans les convertisseurs de rotor du GADA. Par conséquent, la méthode de contrôle du ce convertisseur joue un rôle important dans l'obtention de meilleures performances de le système GADA [2].

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude d'une turbine éolienne, ou l'objectif est la modélisation et la simulation des ses composantes. basé sur la machine asynchrone double alimentation.

Pour cela, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre est présente des généralités sur les systèmes éoliens consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et les composants qui les constituent de façon générale, incluant les différents générateurs utilisés, Leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans **le deuxième chapitre**, nous présentons une modélisation mathématique de différentes parties de la turbine éolienne. Nous aborderons en détail la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans **le troisième chapitre**, porte sur la commande de la génératrice asynchrone (GADA), en utilisant régulateur floue

nous allons présenter les résultats de simulation obtenus avec leurs discussions.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale récapitulant ce qui a été fait et présente les perspectives de travail.

Chapitre I :

Généralités sur les

systèmes éoliens

I.1 Introduction

Les éoliennes utilisent l'énergie du vent de façon à la transformer en énergie électrique. Leurs pales sont actionnées par le vent. Elles sont reliées à un axe qui entraîné par leur mouvement actionne un moteur permettant ainsi de créer de l'énergie électrique. Le vent est le mouvement des masses d'air résultant du réchauffement inégal de la surface de la terre par le soleil. Dans l'Antiquité, le vent était utilisé, plus particulièrement en agriculture avec les moulins à vent pour moudre le blé [02].

Dans le présent chapitre, on va présenter une description des turbines éoliennes ainsi que les différents composants constituant ses systèmes énergétiques.

I.2 Historique de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle. L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, HAMMURABI, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne. Trois siècles A.J.C, L'Egyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes. Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain. Ce type de moulins à vent va se répandre dans le monde arabe. Par la suite, les croisées les ramenèrent en Orient. D'abord le système éolien est utilisé pour le pompage d'eau (POLDER), elles servirent par la suite au seizième siècle à d'autres fonctions, tel que couper le bois. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [02].

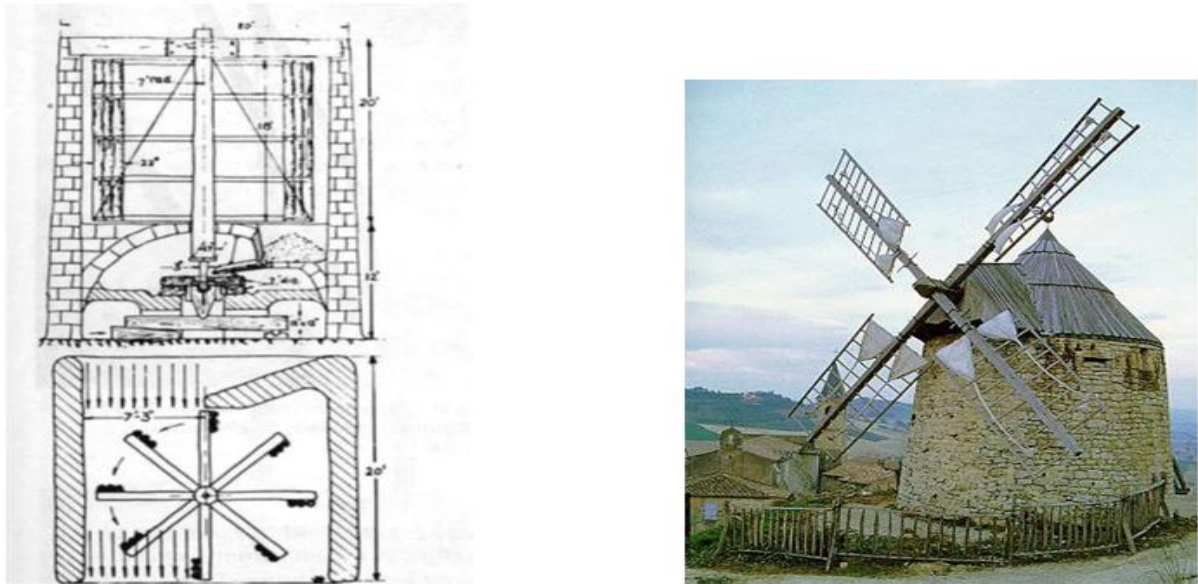


Figure I.1 : Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite) [02].

I.3 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.2) [03].



Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [03].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. I.3 [04].

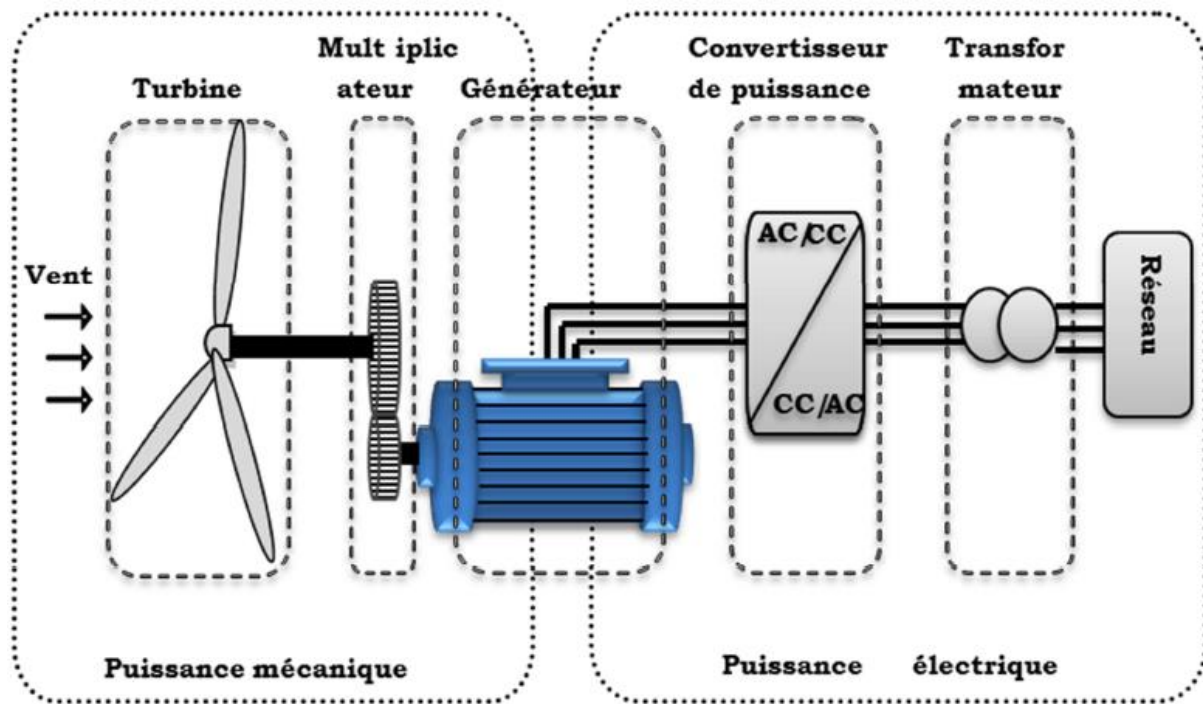


Figure I.3 : Principaux organes du système de conversion éolien [04].

I.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

I.2.1.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [05].

I.2.1.2 Inconvénients :

- *L'impact visuel*, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- *Le bruit* : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée.
- *L'impact sur les oiseaux* : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- *La qualité de la puissance électrique* : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent
- *Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques* : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [05].

I.2.2 Contexte actuel en Algérie :

L'Algérie à l'instar des autre pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays.

La carte représentée dans la figure (I.4) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar [06] [10].

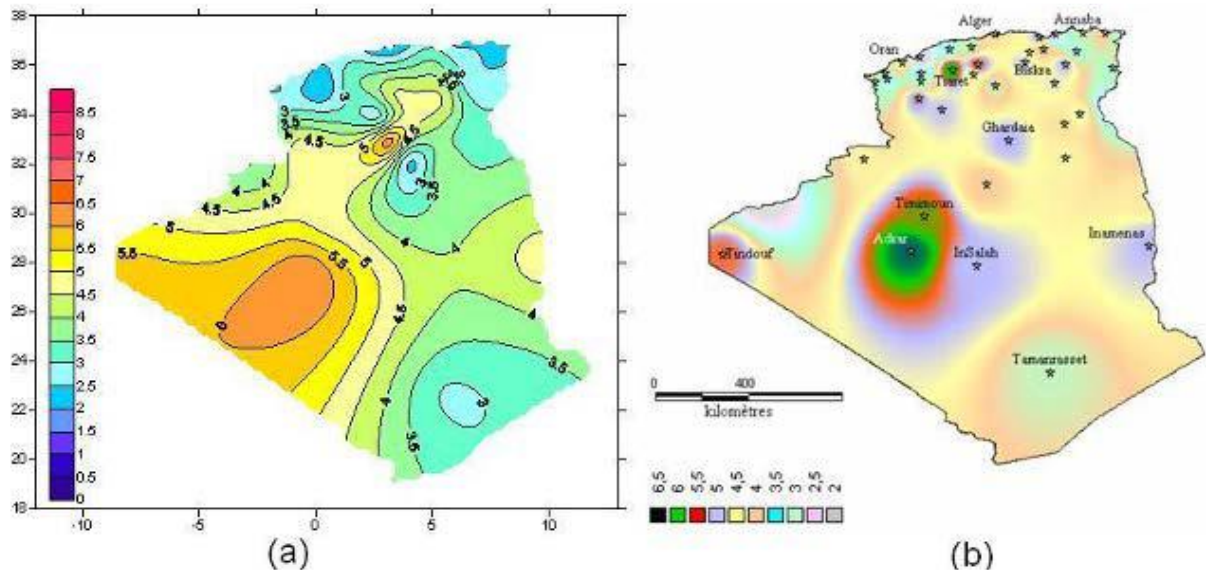


Figure I.4 : carte du potentiel éolien en Algérie



Figure I.5 : 1^{er} ferme éolienne en Algérie (adarr) [06]

I.4 Principales composantes d'éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux : comme illustré sur la figure I.6 [06].

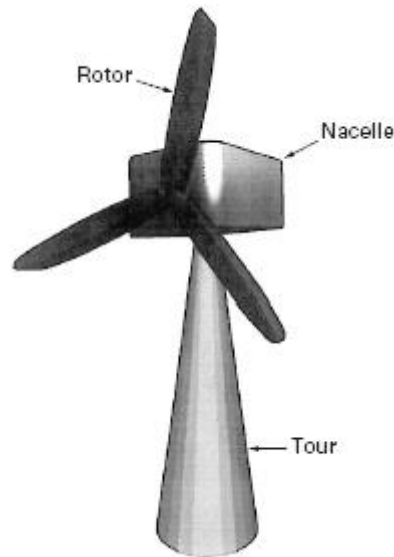


Figure I.6 : Composant d'une éolienne à axe horizontal [08].

- **Rotor :** Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, il fait tourner le mécanisme d'entraînement construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

Le nombre de pales varie de un à trois, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, l'impact visuel et le bruit. On distingue deux types de rotors :

- **Rotors à pas fixe :** Ils sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant une connexion directe au réseau ou à la charge sans dispositif d'électronique de puissance, c'est un mécanisme presque idéal assurant une optimisation de la vitesse disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux.
- **Rotors à pas variable :** Ils sont coûteux car le dispositif d'orientation des pales est dans la plupart des cas supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.
- **Mât :** Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor + nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la capture de l'énergie. Le mât est généralement un tube d'acier d'une hauteur comprise entre 60 à 100m, à

l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.

- **Nacelle** : Elle est située en haut du mât, elle comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le générateur, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. La figure I.7 montre la nacelle et ces éléments [09].

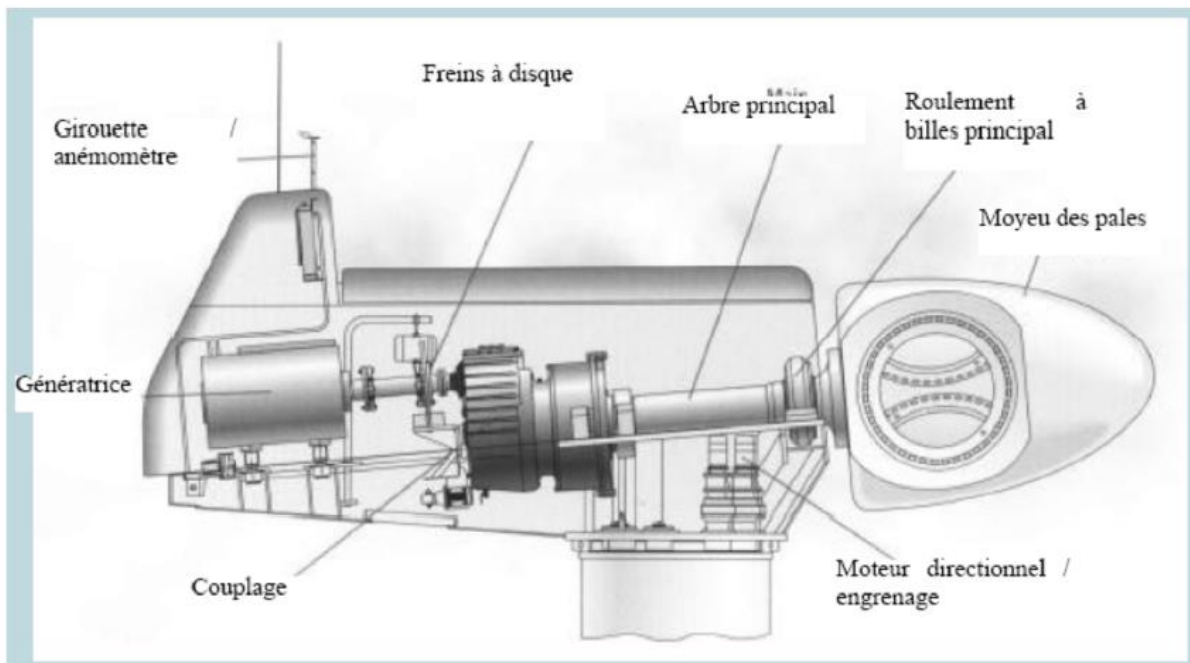


Figure (I-7) : montage de la nacelle et ses éléments

- **Arbre** : Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Multiplicateur** : Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

- **Système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) pour le multiplicateur [09].
- **Génératrice (ou alternateur)** : C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés [09].

I.4.2 Principe de fonctionnement :

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'un générateur [11].

I.4.3 Conversion de l'énergie éolienne :

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique (figure I.8) [08].

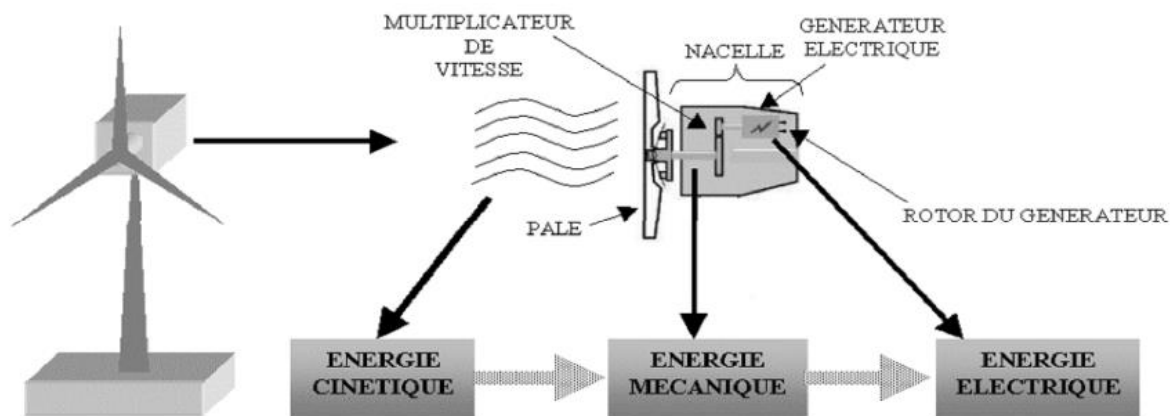


Figure I.8 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [08].

I.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

Avantage :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement. Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puis que les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.

- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [05].

Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence,

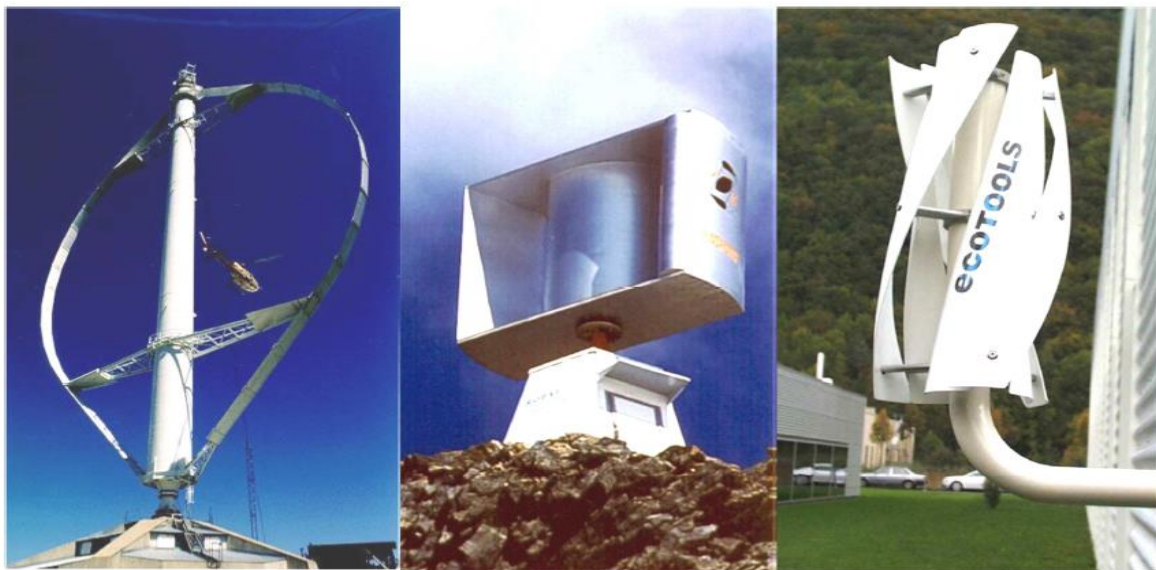
mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [05].

I.5 Types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe Capteur d'énergie à savoir l'aérotrain. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

I.5.1 Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [09].



Darrieux

Darrieux de type H

Savonius

Figure I.9 : technologie éolienne à axe vertical [09].

I.5.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [09].

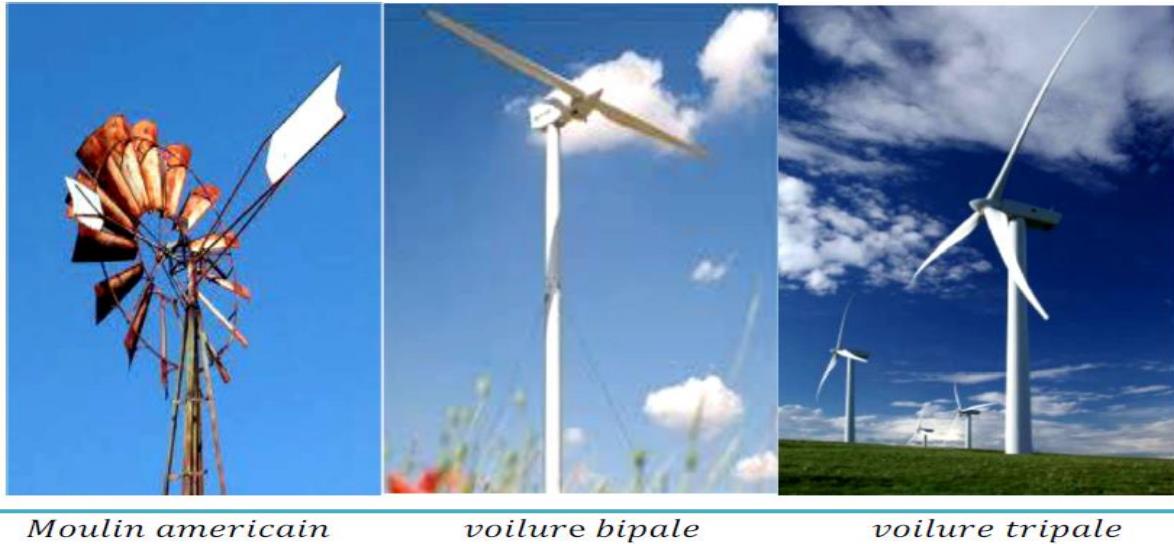


Figure I.10 : technologie éolienne à axe horizontale

I.5.3 Constitution d'une éolienne moderne :

Cette figure résume les différents constituants de la turbine :

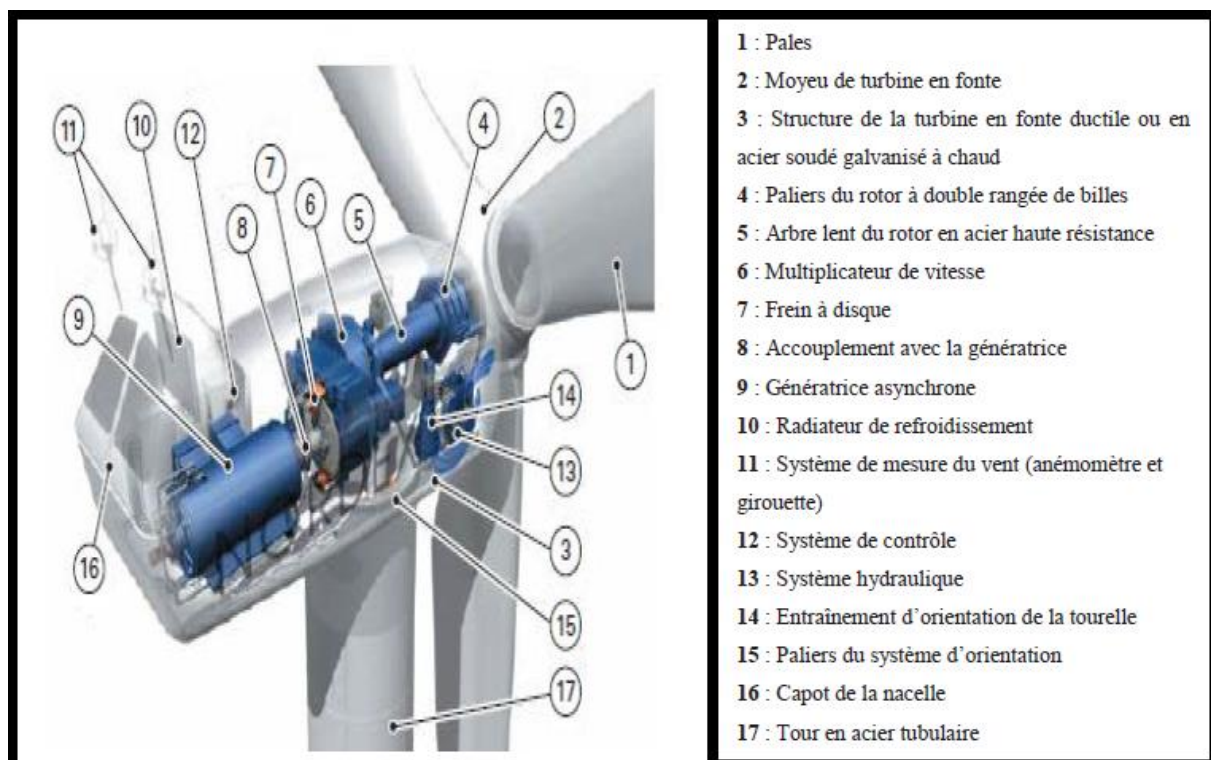


Figure I.11 : constituants de la turbine [09].

I.6 Structures des systèmes éoliens :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [10]:

I.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (figure 1.12). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

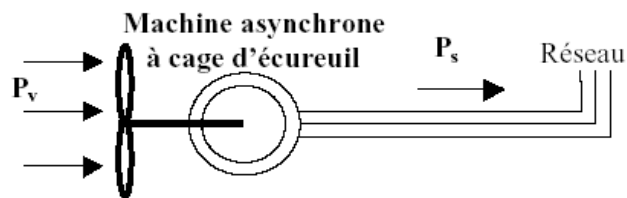


Figure I.12 : éolienne à vitesse fixe

I.6.2 Fonctionnement à vitesse variable :

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique synchrone ou asynchrone. Les machines synchrones : elles sont utilisées dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de même taille. La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines asynchrones. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné) [10].

Eolienne à machine asynchrone à cage :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la figure (1.13) [12].

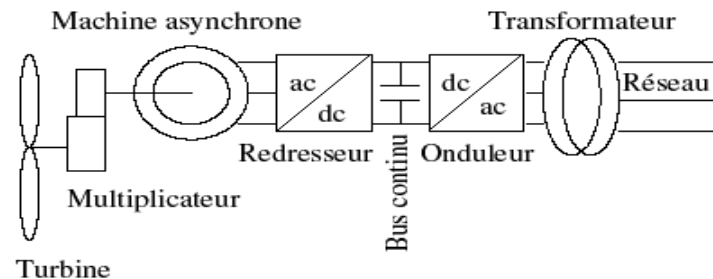


Figure I. 13: Eolienne à MAS pilotée au stator

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes.

I.6.3 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique. Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la 1ère configuration [12].

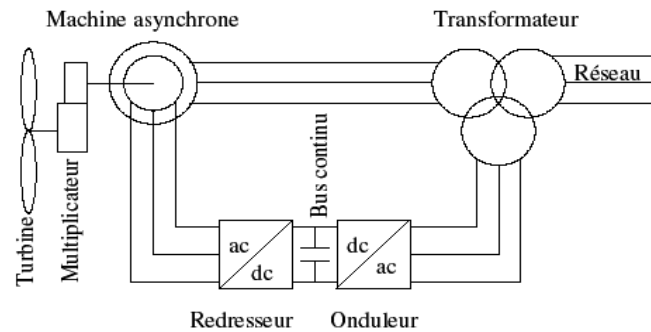


Figure I.14: Eolienne à MADA pilotée au rotor

I.7 Machines électriques utilisées :

I.7.1 Machines asynchrones :

Les machines asynchrones sont robustes, simple à fabriquer et moins coûteuses. Les aérogénérateurs de forte puissance tournent à des vitesses de rotations relativement faibles, d'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse mécanique entre la turbine et la machine asynchrone. Lorsque cette dernière est directement connectée au réseau, et pour qu'elle lui fournisse de l'énergie ; elle doit être entraînée à une vitesse de rotation légèrement supérieur à celle de synchronisme [12].

I.7.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

La constitution du stator de la MADA est la même pour la machine synchrone ou asynchrone à cage d'écureuil. L'originalité de la MADA provient du fait que le rotor n'est plus à cage, ce dernier est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités reliées à des bagues conductrices. Cette machine nous offre l'avantage de passer d'un fonctionnement à un autre tout à fait acceptable. Effectivement la MADA est une machine généralisée (peut fonctionner en asynchrone ou synchrone).

I.7.3 Machines synchrones :

La machine synchrone est constituée d'un stator comportant des enroulements induit et d'un rotor porte un inducteur (bobine ou à aimants permanents).

L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée au bout d'arbre (excitatrice). (Absence du système balais-collecteurs). La tension statorique est proportionnelle au courant d'excitation et la vitesse de rotation de la turbine, la fréquence de la tension de sortie dépend aussi de la vitesse de rotation de cette dernière [12].

I.7.4 Machine à reluctance variable (MRV) :

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionnant exclusivement sur le couple de reluctance. Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse Suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories [12].

- Machine à stator lisse
- Machine à double denture

I.7.5 Machine à aimants permanents :

La machine à aimants permanents est un système permettant de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Elle est constituée d'un rotor et d'un stator dont l'un porte des aimants permanents. Ce type de machine est utilisé dans les grandes éoliennes à attaque directe [12].

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a abordé les différents types des éoliens, leurs caractéristiques, et les éléments constitutifs. Nous avons présenté les différents constituants de la turbine éolienne, ainsi les différentes machines utilisées.

Dans le prochain chapitre, on va faire la modélisation mathématique d'un type de ces turbines éolien.

Chapitre II :

MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

II.1 Introduction

Parmi les différentes technologies de production éolienne disponibles, les éoliennes à vitesse variable et à calage variable c.-à-d. à des pales orientables utilisant des génératrices asynchrone double alimentation sont les plus populaires dans le secteur d'énergie éolienne, en particulier pour les générateurs éoliens de grandes puissances [31], [40].

L'objectif de ce deuxième chapitre sera consacré à l'étude de modélisation et de la commande de la turbine éolienne. Dans un premier temps, nous allons présenter le modèle du vent qui sera appliqué à la turbine, le modèle aérodynamique, mécanique de la turbine. Ensuite, les différentes commandes appliquées afin d'extraire le maximum de puissance électrique pendant les faibles vitesses et la commande pour limiter la puissance pendant les fortes vitesses du vent seront examinées également. Enfin, des résultats de simulation seront présentés afin de valider les commandes étudiées.

II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA

Le système de conversion d'énergie éolienne basé sur une GADA se compose essentiellement d'une génératrice, d'une turbine à calage variable avec système de transmission (Multiplicateur de vitesse), d'un Convertisseur Coté Réseau, d'un Convertisseur Coté Génératrice, d'un condensateur de bus continu, d'un transformateur de couplage et d'un système de contrôle et de protection comme indiqué à la figure I.9 [40], [41].

La GADA est une génératrice à induction à rotor bobiné dont les bornes de son stator sont connectées directement au réseau électrique et les bornes de son rotor sont connectées au même réseau par l'intermédiaire des deux convertisseurs statiques triphasés à IGBT ou à MOSFET à fréquence variable. Ces convertisseurs ne doivent traiter qu'une fraction (25 - 30 %) de la puissance totale pour assurer le contrôle complet du générateur. Grâce à la bidirectionnalité de ces convertisseurs la GADA peut fonctionner en mode hypo ou hyper synchrone [41], donc elle fonctionne sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent (Commande MPPT) et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées (pitch Control).

II.3 Modélisation de la turbine éolienne.

Le rôle principal des éoliennes est d'extraire une partie de la puissance disponible dans le vent est la convertir par ses pales en puissance mécanique agissant sur l'arbre lent du rotor de la turbine Eolienne

Ensuite le multiplicateur de vitesse transforme la faible vitesse de rotation de l'éolienne en une vitesse de rotation élevée du côté du GADA afin d'atteindre une vitesse appropriée pour le rotor.

Une éolienne parfaite ne peut pas extraire toute l'énergie disponible dans le vent. La puissance effectivement captée par le rotor de l'éolienne (P_{aer}) est définie par le coefficient de puissance C_p (ou le rendement) qui est le rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible dans le vent.

II.3.1 Modèle du vent appliqué au système.

Afin que la chaîne éolienne fonctionne et produit des puissances utilisables, elle avait besoin d'une source primaire et fondamentale c'est l'énergie cinétique du vent. Le vent joue un rôle primordial pour l'étude du système de conversion d'énergie éolienne car la puissance éolienne est en fonction de sa vitesse.

Dans cette étude, afin que notre GADA fonctionne en hypo et hyper synchrone et qu'on puisse aussi valider le contrôle d'orientation des pales (pitch control) nous avons choisi un profil de la vitesse du vent représenté par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [42], [43] :

$$V_v(t) = 9.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25 \sin(100\omega t) \quad (II.1)$$

Avec : $\omega = \pi/20$

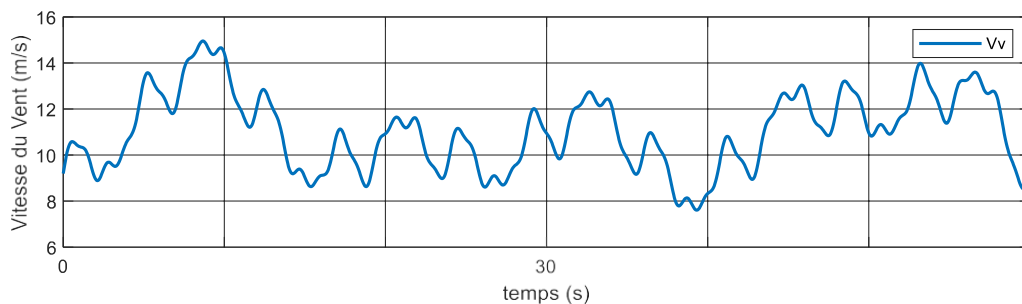


Figure II-1: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.

II.3.2 Modèle aérodynamique

La puissance aérodynamique d'une éolienne P_{aer} , en régime permanent selon la théorie de Betz peut être déterminée par [44]:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 2})$$

Où :

- ρ : Masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).
- S : Surface circulaire balayée par la turbine.
- V_v : Vitesse du vent.
- $C_p(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

- Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine ;
- R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Généralement, le coefficient de puissance est fonction du rapport de vitesse de pointe et de l'angle de pas des pales. Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons une expression pour une éolienne de 2 MW, qui est donnée dans les travaux de recherche de [45]–[48]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58 \beta - 0.002 \beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{-18.4}{\lambda_i}} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.02 \beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 5})$$

la figure II-2 montre la relation entre C_p , β et λ

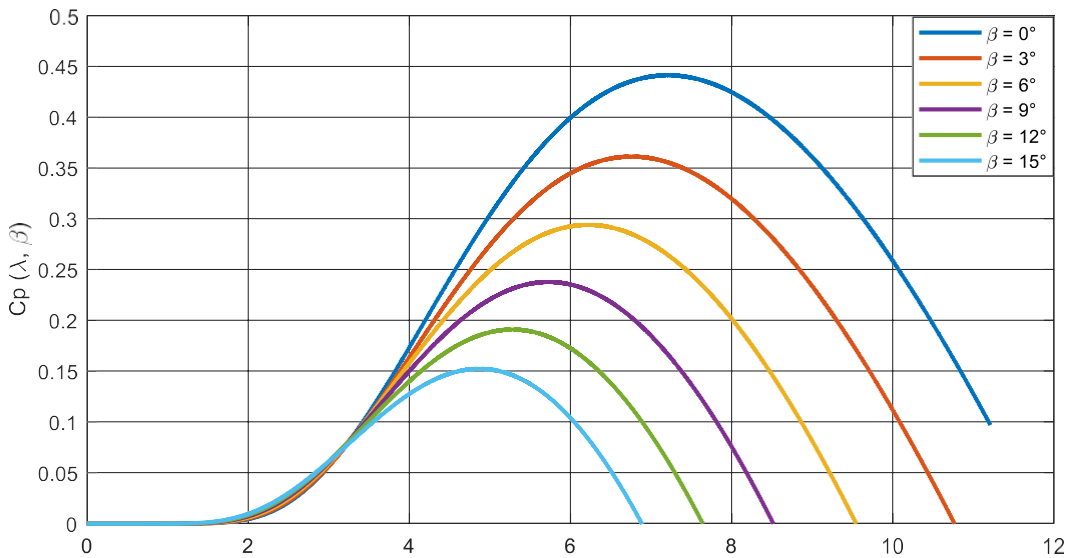


Figure II-2 : Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas réglé de 1.5 MW, pour différents angles β .

À partir de la vitesse de rotation de la turbine, nous pouvons définir le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine par l'équation suivante [49]:

$$C_t = \frac{p_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V_v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 6})$$

II.3.3 Modèle de la partie mécanique.

La génératrice d'un système éolien est entraînée par la turbine éolienne qui comprend trois pales orientables de longueur R_t tournant à une vitesse de rotation Ω_t via un multiplicateur de gain G . Le but de ce multiplicateur est d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω_m . Ce multiplicateur permet à la génératrice de fonctionner à une vitesse $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisation. La partie mécanique d'un SCEE se compose d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Le modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure II.3 est obtenu à base des hypothèses suivantes [45]:

- Les trois pales de la turbine sont considérées identiques.
- La répartition de la vitesse du vent sur toutes les pales est considérée uniforme donc une égalité de toutes les forces de poussée.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- Les pertes de frottement de l'arbre de la turbine seront négligeables devant les pertes par frottement de l'arbre de la génératrice

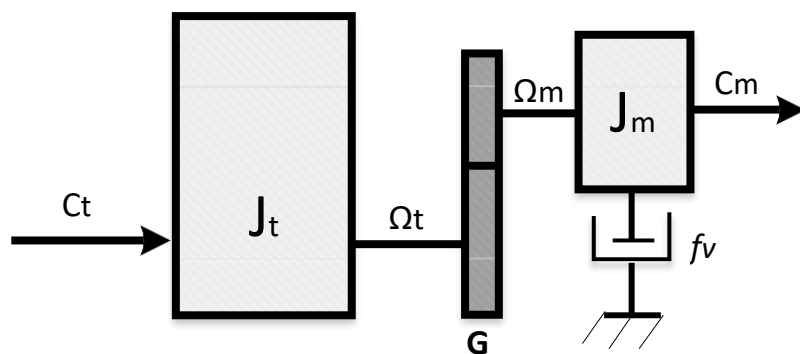


Figure II-3 : Modèle mécanique du système éolien.

D'après la figure II-4 le multiplicateur est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II. 7})$$

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II. 8})$$

Et d'après la même figure, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la GADA peut être donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f_v \Omega_m \quad (\text{II. 9})$$

On pose : $J = \frac{J_t}{G^2} + J_m$

Avec :

- J : Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolien ;
- J_t : Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;
- J_m : Moment d'inertie de la GADA ;
- f_v : Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA ;
- C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la GADA ;
- C_{em} : Couple électromagnétique généré par la GADA ;
- G : Gain du multiplicateur ;
- Ω_m : Vitesse mécanique de rotation de la GADA .
- $C_f = f \Omega_{mec}$: Couple de frottement visqueux de la GADA .

A partir des équations précédentes le schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne est représenté par la figure suivante :

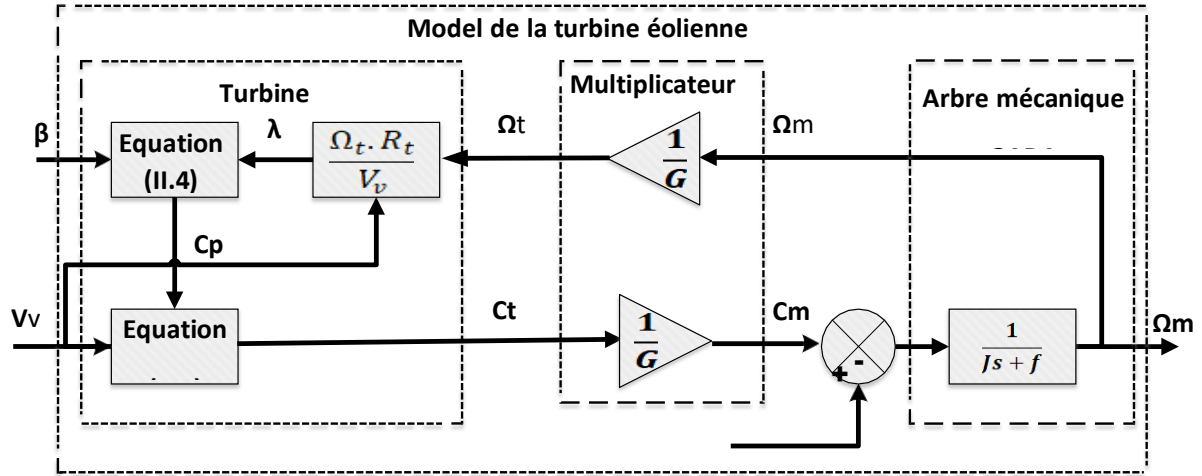


Figure II-4 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

D'après le schéma bloc de la figure II-4, la vitesse mécanique de l'arbre de la GADA résulte de l'application du couple mécanique disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette vitesse peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II.4 Modes d'opération du système éolien à vitesse variable.

Le système de contrôle des éoliennes joue un rôle très important pour contrôler et extraire le maximum d'énergie du vent disponible tout en protégeant les composants de l'éolienne. Dans l'ensemble, la puissance peut être contrôlée en contrôlant la vitesse de la génératrice, l'ajustement de l'angle de pale connu sous le nom de pitch control et la rotation de l'ensemble de l'éolienne [50], [51].

La figure II-5 montre les caractéristiques typiques d'une éolienne fonctionnant à différentes vitesses de vent, où P_m et Ω_m représentent respectivement la puissance mécanique et la vitesse mécanique de l'éolienne. Les courbes sont obtenues avec l'angle d'attaque des pales réglé à sa valeur optimale ($\beta = 0$).

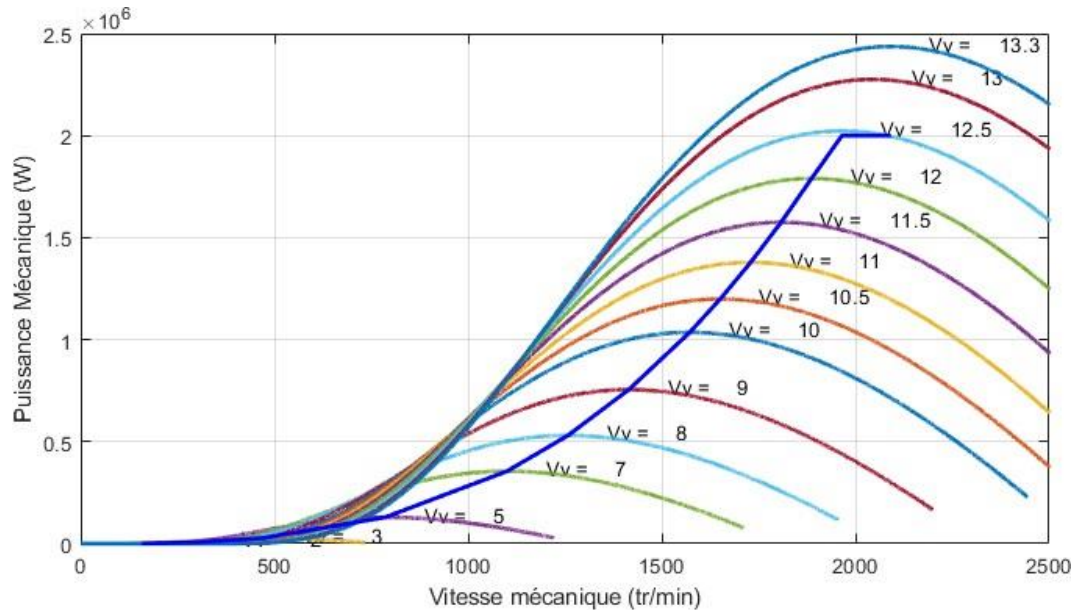


Figure II-5 : Variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique.

Il est possible de définir trois zones de fonctionnement distinctes d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une GADA à pas variable et à vitesse variable en fonction de la vitesse du vent et la puissance requise du GADA. Les trois zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable sont illustrées dans la figure II.6 [50], [52]–[54].

Où :

La zone I : la vitesse du vent est faible et insuffisante pour le démarrage de l'éolienne donc la puissance mécanique est zéro.

La zone II : lorsque la vitesse du vent dépasse une vitesse minimale v_{min} l'éolienne commence à démarrer, une fois ce démarrage atteint 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 III : 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, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (diminution du C_p avec l'augmentation de l'angle de calage des pales β).

Zone IV : dans cette zone généralement, le couple électromagnétique est maintenu à la valeur nominale et l'angle d'orientation des pales a atteint à son maximum donc, on doit arrêter l'éolienne avec des freins hydrauliques ou électriques.

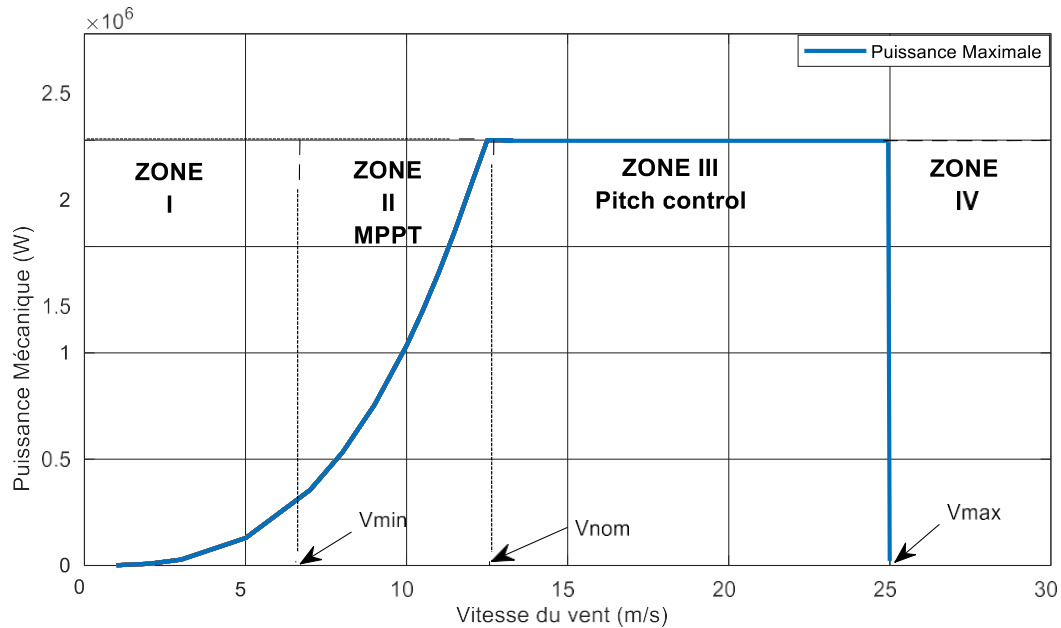


Figure II-6: Zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.

II.4.1 Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT).

Pour mieux exploiter l'énergie disponible dans le vent, les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent produire un maximum de puissance. Donc l'objectif principal de la commande dans la zone II est de maximiser la capture de l'énergie éolienne à différentes vitesses du vent, ce qui peut être obtenu en ajustant la vitesse de rotation de l'éolienne en contrôlant le couple électromagnétique du GADA de telle sorte que le rapport optimal de la vitesse spécifique λ_{opt} est conservé. On peut distinguer deux stratégies de contrôle d'extraction de puissance maximale (MPPT) [52], [55]–[57] :

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

II.4.1.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Dans la pratique, il est très difficile de mesurer la vitesse du vent car l'anémomètre est situé derrière le rotor de l'éolienne et le diamètre balayé par les pales de l'éolienne est très important. Dans ces conditions, on utilise un contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation qui est basé sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les

constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux C_{vis} . L'équation mécanique (II.9) du système éolien peut s'écrire comme suit [58], [59]:

$$\frac{d}{dt}\Omega_m = c_m - c_{em} - c_{vis} = 0 \quad (II.10)$$

$$c_m = c_{em} \quad (II.11)$$

Le principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation est basé sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice, donc à partir de cette mesure on peut estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.12)$$

A partir des équations (II.12) et (II.3), on estime la valeur de la vitesse du vent comme suit :

$$V_{v_est} = \frac{R \Omega_{t_est}}{\lambda} \quad (II.13)$$

Avec la connaissance d'une estimation de la vitesse de rotation de la turbine (Eq. II.12) et l'estimation de la vitesse du vent (Eq. II.13), le couple de la turbine éolienne peut ensuite être s'exprimer par :

$$C_{t_est} = \frac{1}{2\Omega_{t_est}} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{v_est}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.14)$$

A partir des équations (II.8) et (II.11), on peut déterminer le couple électromagnétique de référence ou bien le couple de réglage comme suit :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{t_est}}{G} = \frac{1}{2G \cdot \Omega_{t_est}} \rho \cdot S \cdot V_{v_est}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.15)$$

En remplaçant les équations (II.12) et (II.13) dans (II.15), on obtient une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2G^3 \cdot \lambda^3} \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \Omega_m^2 \quad (II.16)$$

Afin d'obtenir le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} pour obtenir le maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Donc le couple électromagnétique de réglage devient :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2G^3 \lambda_{opt}^3} \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{pmax} \cdot \Omega_m^2 \quad (II.17)$$

Grâce au contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la GADA.

Selon les équations précédentes, Le schéma bloc présente le principe du contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation est illustrée par la figure suivante [60], [61].

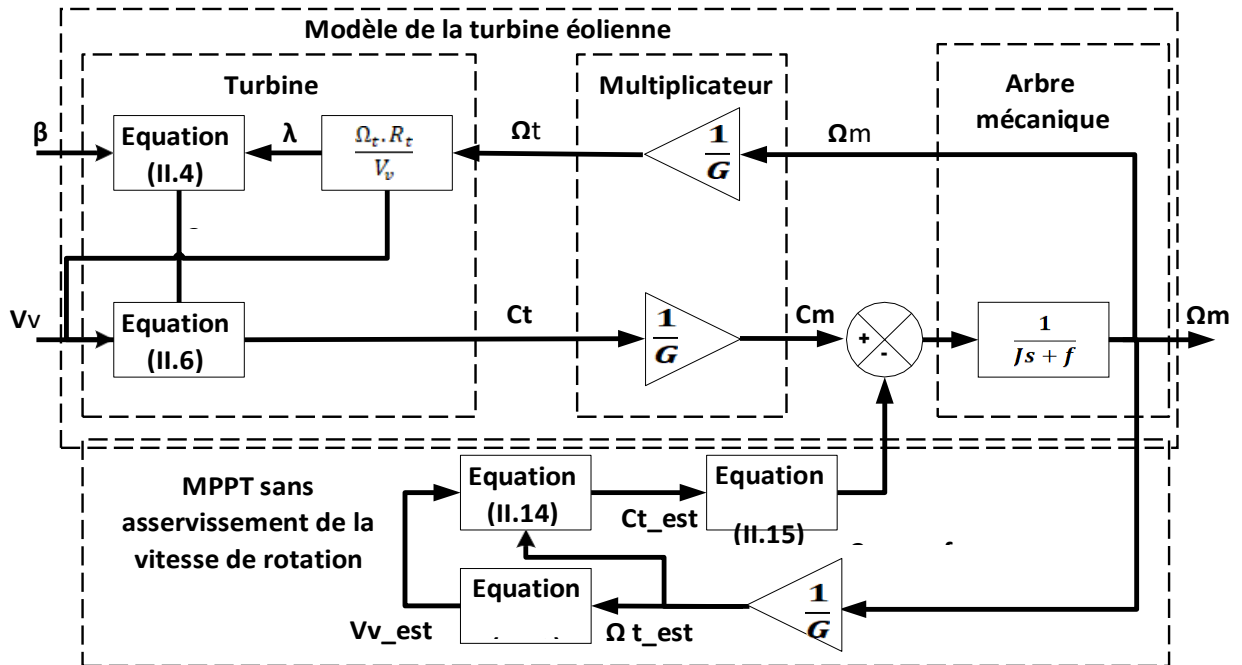


Figure II-7: Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

II.4.1.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Cette méthode de contrôle est basée sur les mesures de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la GADA. Pour extraire le maximum de puissance de la turbine, la vitesse de rotation du GADA doit être fixée à une vitesse de référence. Afin d'obtenir une vitesse de rotation Ω_m égale à sa vitesse de référence Ω_{m_ref} , on doit générer par la génératrice un couple électromagnétique de référence C_{em_ref} opposé au couple mécanique engendré par la turbine et qui est considéré comme

une entrée perturbatrice. Ce couple est obtenu par un asservissement de la vitesse de rotation qui doit accomplir deux rôles dans le système éolien [58], [59] :

- L'asservissement de la vitesse mécanique du rotor à sa vitesse de référence.
- Réduire l'action du couple éolien

Afin que la puissance mécanique soit maximale la valeur du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ doit être maximale. Celle-ci est obtenue avec la fixation de la valeur de la vitesse spécifique à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$).

Selon l'équation II.3, la vitesse de rotation de référence de la turbine est définie comme suit :

$$\Omega_{t_ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R_t} \quad (II.18)$$

En tenant compte du gain du multiplicateur, on peut déduire la référence de la vitesse de rotation de la GADA :

$$\Omega_{m_ref} = G \Omega_{t_ref} \quad (II.19)$$

Le principe de ce schéma de commande est illustré à la figure II-8, où la vitesse du vent mesurée V_v est utilisée pour produire la référence de vitesse du générateur Ω_{m_ref} en fonction du rapport de la vitesse spécifique optimal λ_{opt} . La vitesse du générateur Ω_m est contrôlée par les convertisseurs de puissance et sera égale à sa référence en régime établi, à laquelle le MPPT est atteint.

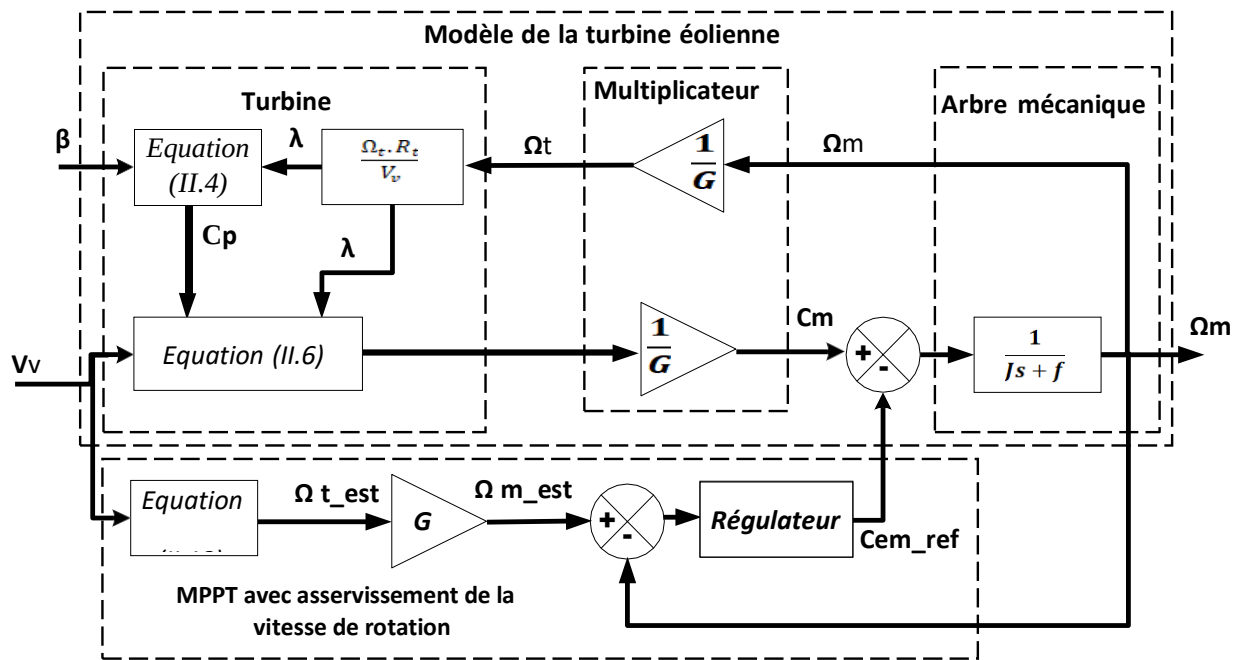


Figure II-8: Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

II.4.2 Zone III : Contrôle des variations du pas des pales (limitation de la vitesse et l'apissance).

Dans cette zone et afin de maintenir la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale, un contrôleur est destiné à faire tourner toutes les pales sous le même angle ou chacune d'entre elles indépendamment.

Cette régulation indépendante donne plus de degrés de liberté au système de contrôle et permette en particulier de réduire les contraintes dans les pales et apportera plus d'intelligence dans le système de contrôle des éoliennes. Dans l'étude d'un système de contrôle dynamique, le pas d'une pale implique de nombreux couples et forces. La représentation de ces couples nécessite de modéliser la dynamique structurelle de la pale, le comportement de l'air autour des pales.

Pour modéliser le système d'orientation des pales de la turbine, l'approche la plus classique consiste à représenter le contrôle de la boucle, le taux de variation de l'angle de pas à un système linéaire de premier ordre contenant la dynamique principale de l'actionneur (hydraulique ou électrique).

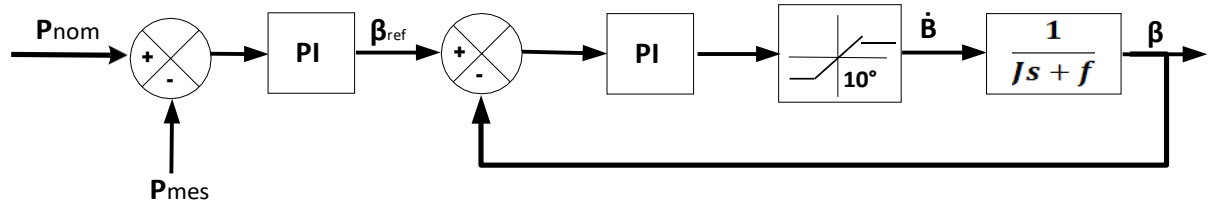


Figure II-9: Schéma bloc de la commande de l'angle de calage des pales

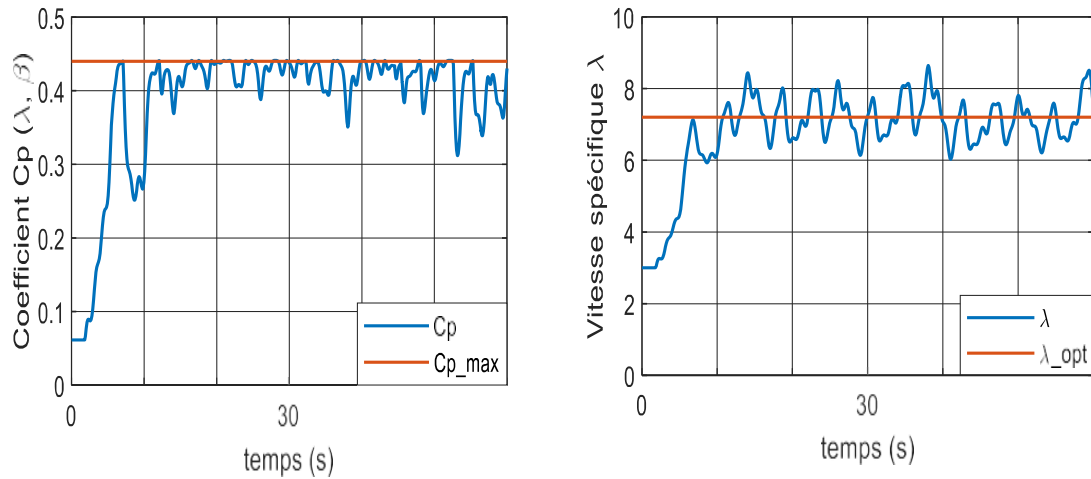
II.4.3 Résultats de simulation

Pour vérifier l'efficacité et la fiabilité des méthodes de contrôle proposées pour une éolienne de 2 MW dont les paramètres sont données en annexe B, nous les avons simulées sous

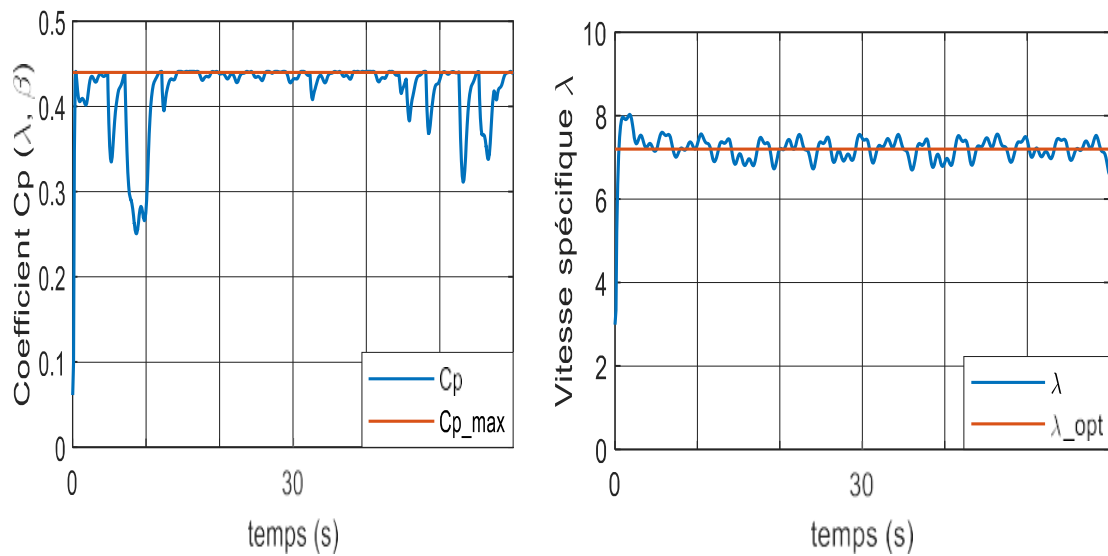
Matlab/Simulink en considérant le profil de vent de la figure II-2. Les résultats obtenus par les deux stratégies de commande MPPT seront exposés.

II.4.3.1 Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse

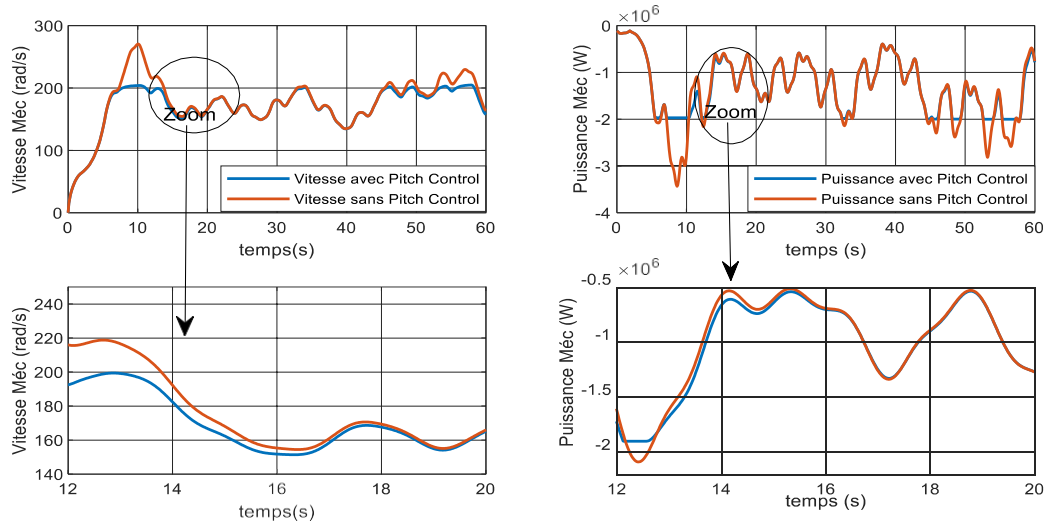
La figure II-13 illustre l'évolution du coefficient de puissance et la vitesse spécifique en fonction du temps pour les trois commandes. D'après les résultats de simulation, on constate que le coefficient de puissance et le rapport de vitesse de la méthode indirecte basée sur la logique floue sont ajustés à leurs valeurs optimales et moins fluctuant par rapport aux autres méthodes ou il y a une fluctuation entre les valeurs de références et les valeurs désirées. Et on constate aussi que la valeur du C_p ne dépasse pas la valeur maximale donnée par le constructeur qui est égale 0.44 pour les trois commandes.



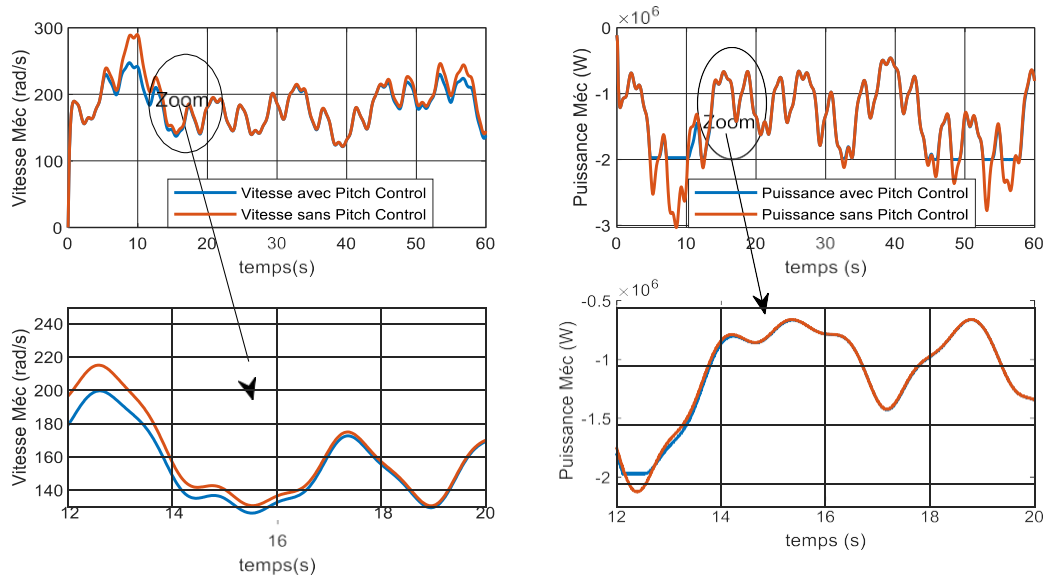
A: Commande MPPT sans asservissement de vitesse

Figure II-10 : Coefficient de puissance C_p (λ , β) et Vitesse spécifique λ

Les figures ci-dessous présentent l'évolution temporelle de la vitesse et de la puissance mécanique de la turbine éolienne pour les trois commandes étudiées. On constate que la variation de la vitesse de la GADA est adaptée à la variation de la vitesse du vent et la puissance mécanique est adaptée à la variation de la vitesse mécanique.



(a) Commande MPPT sans asservissement de vitesse.



(b) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

Figure II-11 : Vitesse mécanique Ω_m et Puissance mécanique

La figure II. 15 illustre l'évolution de l'angle d'orientation des pales de la turbine qu'agit sur le coefficient de puissance pour garder la puissance a sa valeur maximale. On constate que les résultats de simulation vérifient la robustesse et l'efficacité de la commande par orientation des pales dans la zone III.

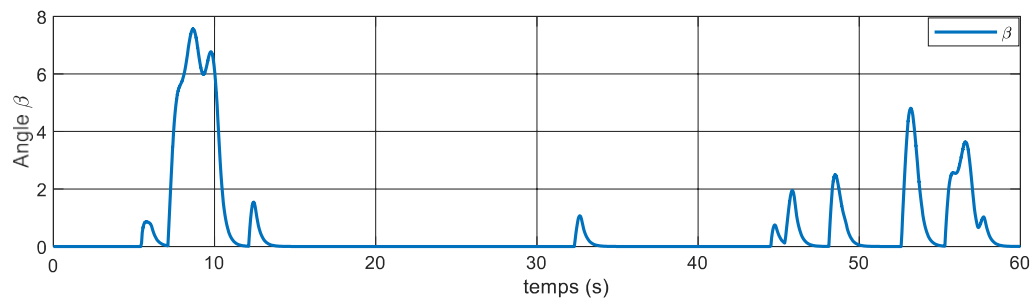


Figure II-12 : Angle d'orientation des pales β .

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique simplifié de la turbine éolienne. Ensuite, nous avons traité la question de la commande MPPT d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable, en utilisant la méthodes de contrôles MPPT, c'est-à-dire la méthode directe et la méthode indirecte. Cette dernière est basée sur régulateurs,

Le chapitre suivant, sera consacré à la commande par logique floue base de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA .

***Commande d'un système éolien
par logique floue base de GADA***

III.1. Introduction :

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. A ce titre, toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

Dans ce chapitre nous présentons les approches de conception d'un régulateur flou (RF). Les notions de base nécessaire à la compréhension de régulation floue seront rappelées. Nous synthétisons le choix possible pour les nombreux paramètres du contrôleur à logique flou (CLF) utilisé pour le réglage des courants rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation.

III.2 Principe et Historique de la Logique Floue:

Ce sont les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg développées par des chercheurs américains dans les années 20 et 30 qui ont conduit à l'apparition de la logique floue. Mais ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique sont proposées par le professeur Lotfi Zadeh, dans un article intitulé «Fuzzy sets» (Ensembles flous). Cet automaticien, de réputation internationale, a depuis réalisé de nombreuses avancées théoriques qui ont contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, dans le but de palier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Voici l'essentiel de l'histoire de la logique floue [1] :

- ✓ En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue pour résoudre les problèmes de réglage .
- ✓ En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la logique floue et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur .
- ✓ En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue [2] .
- ✓ En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la logique floue qui est mis au point avec succès .
- ✓ A partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Sugeno au Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge Aïsaïgo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

Depuis, la logique floue connaît au Japon un véritable essor dû au fait que les sociétés

japonaises ont vite compris ses avantages, à la fois techniques et commerciaux [3] :

- Facilité d'implantation .
- Solutions de problèmes multivariables complexes .
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes .
- Possibilité d'intégration du savoir faire de l'expert.

On voit alors apparaître une véritable panoplie de produits estampillés « Fuzzy logic inside », dont on citera les quelques exemples suivants :

Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateur, autocuiseur, ... etc) .

Systèmes audio-visuels (appareil photographique autofocus, caméscope à stabilisateur d'image, photocopieur, ... etc.) .

Systèmes automobiles embarqués (suspension, climatisation, ... etc.) .

Systèmes de transports (train, métro, ascenseur, ... etc.).

Enfin, il est intéressant de noter que depuis quelques années des processeurs flous sont apparus sur le marché, et sont de véritables processeurs dédiés à des applications de réglage par la logique floue[4].

III.3. Opérateurs de la logique floue :

Dans la théorie des ensembles classiques on définit les relations intersection, union et complémentation qui sont traduites par les opérateurs OU, ET, NON Ces opérateurs existent également en logique floue, mais sont adaptés aux spécificités de cette logique pour traiter les ensembles flous. Ainsi des opérateurs homologues à ceux de la logique booléenne sont créés en essayant de respecter un certain nombre de propriétés et afin de retrouver les opérations de base existant en logique classique[5].

Soient A et B, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance respectives μ_A et μ_B .

• Opérateur OU (l'union) :

La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ pour l'ensemble flou $A \cup B$ est définie comme suit :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in UD \quad (IV. 1)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV. 2)$$

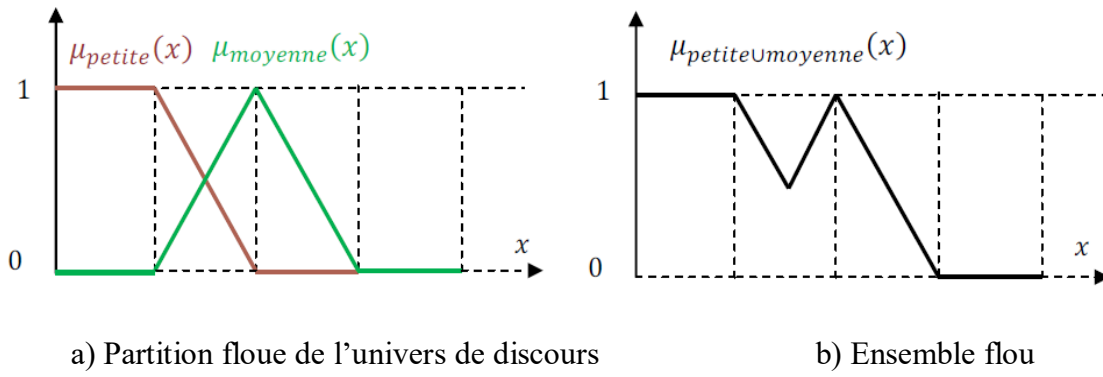


Fig. III.1. Union des sous-ensembles flous «petite » et « moyenne » pour la variable Linguistique

• Opérateur ET (l'intersection) :

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles A et B est défini par les éléments x de l'univers de discours UD qui appartiennent à A et à B.

Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad \forall x \in UD \quad (IV, 3)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV, 4)$$

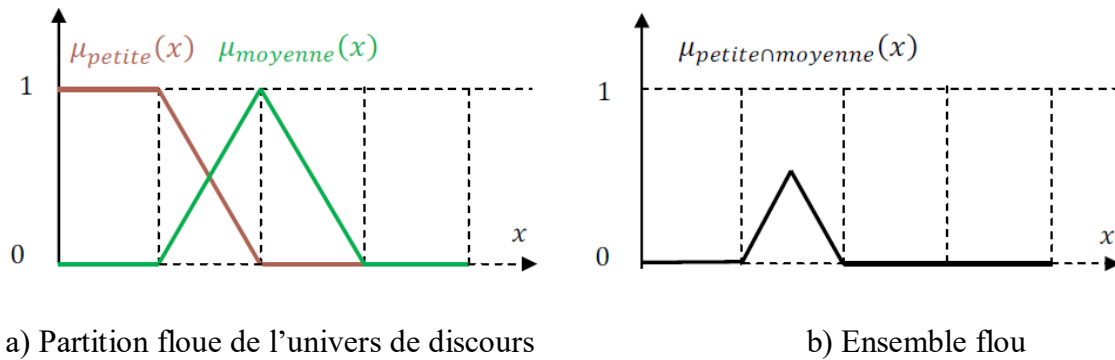


Fig. III.2. Intersection des sous ensembles flous «petite » et « moyenne » pour la variable Linguistique

• Opérateurs NON (complément) :

Comme l'illustre la figure (IV.3), le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble A est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments x de l' UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou A. On peut exprimer ça par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV. 5)$$

Le complément flou représente l'opération NON de la logique classique au sens flou.

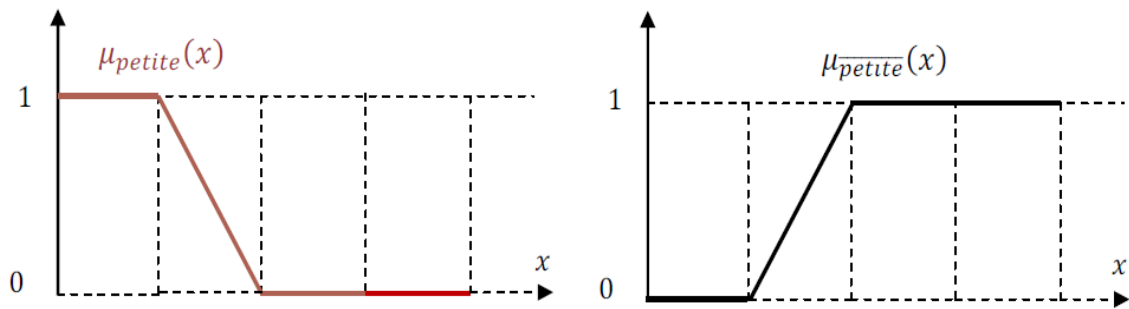


Fig. III.3. Complémentation du sous-ensemble flou «petite».

III.4. Variables linguistiques :

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floues comme par exemple: très grand, grand, moyen, petit. Ces expressions forment les valeurs d'une variable x , appelée "linguistique", soumise à des fonctions appelées fonctions d'appartenance, [6].

III.5. Fonctions d'appartenance :

La variable x varie dans un domaine appelé univers de discours, ce dernier est partagé en sous-ensembles flous de façon que dans chaque zone il y ait une situation dominante. Ces zones sont décrites par des fonctions convexes, généralement sous forme triangulaire ou trapézoïdale, elles admettent comme argument la position de la variable x dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction; notée :

$\mu_A(x)$: degré d'appartenance de x au sous ensemble A .

Le choix de la répartition des fonctions, leurs chevauchements ainsi que leurs formes doit être judicieux comme indiqué dans [7-8]. La figure (IV.4) donne quelques fonctions

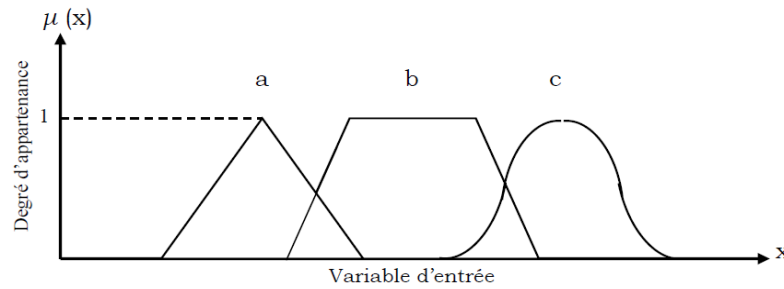


Fig. III.4. Exemple de fonctions d'appartenance.

- a) Fonction triangulaire.
- b) Fonction trapézoïdale.
- c) Fonction gaussienne.

III.6. Structure de base d'un contrôleur flou :

Un contrôleur flou est un système à base de connaissance particulier utilisant un raisonnement en profondeur limitée, dans une procédure de chaînage avant des règles (activation des règles par les prémisses) ; Un schéma représentatif peut être le suivant : [9]

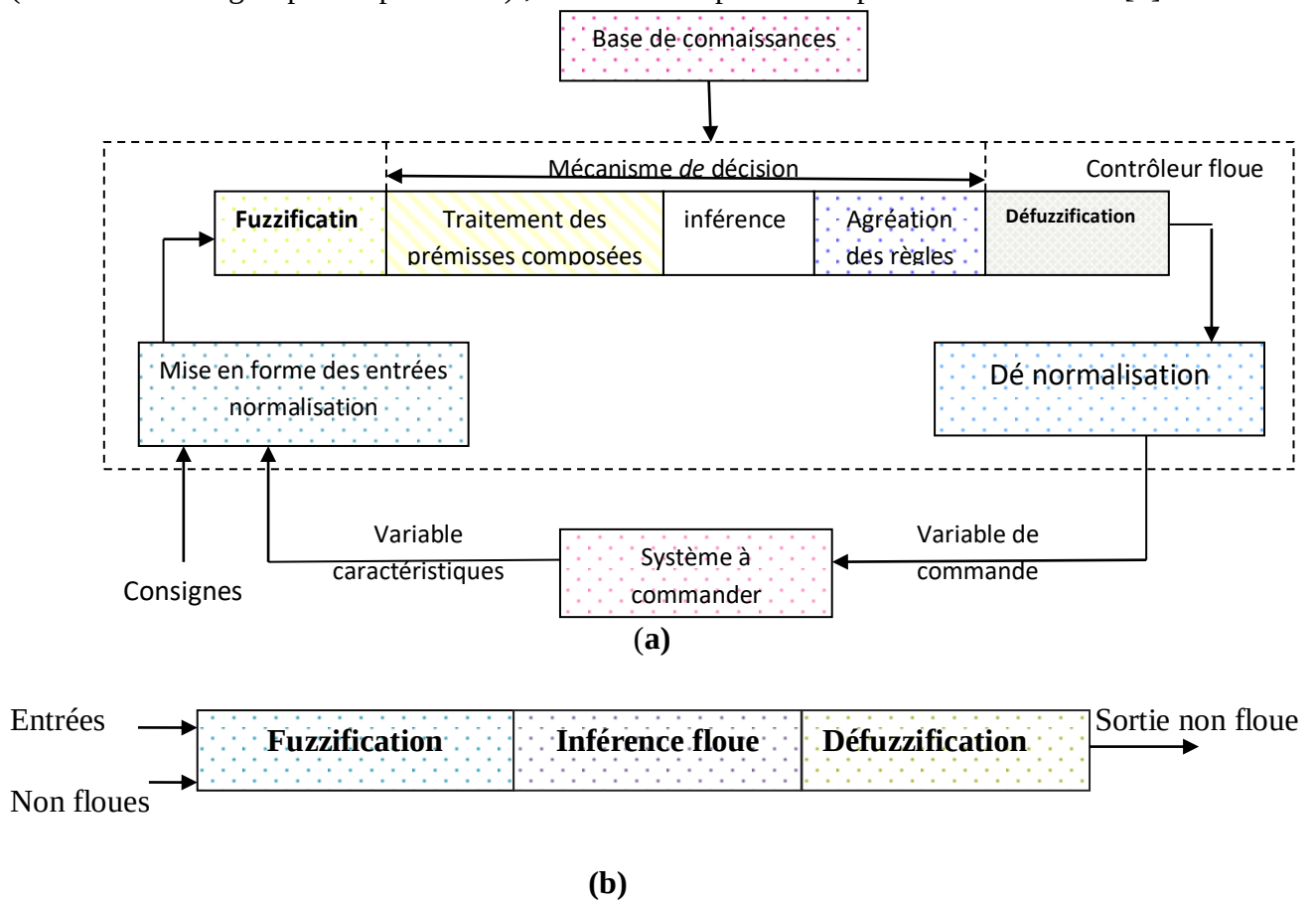


Fig. III.5. a) : Schéma synoptique d'un contrôleur flou

b) : configuration d'un contrôleur flou.

III.6.1. Base de connaissances :

La base de connaissance comprend une connaissance du domaine d'application et les buts du contrôle prévu. Elle est composée :

- I. D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation [10].
- II. La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles: *Si < condition > Alors < conséquence >*.

III.6.2. Fuzzification :

La fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues) [11].

Pour illustrer le mécanisme de la fuzzification, nous allons donner un exemple en fixant comme valeur d'entrée $e_k = 0.45$. Le résultat de la fuzzification sera présenté sur la figure (IV.6). On remarque que pour cette erreur correspond les ensembles flous PP et PM avec les degrés d'appartenances $\mu_{PP}(e_k) = 0.75$ et $\mu_{PM}(e_k) = 0.25$.

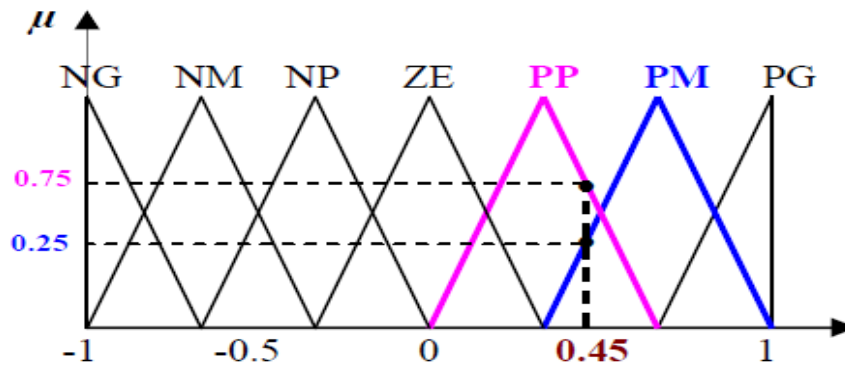


Fig. III.6. Exemple de fuzzification

III.6.3. Règles d'inférence floue :

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence, dans ce dernier cas, une matrice dite d'inférence rassemble toutes les règles d'inférence sous forme d'un tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées, [12-13].

L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle, le tableau IV.1 présente la matrice d'inférence à sept règles.

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont : Max-Produit, somme-produit et Max-Min (Implication de Mamdani), [14], cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max, [15-16]. Les classes sont notées comme suit: NG pour négatif grand, NP pour négatif petit, EZ pour environ zéro, PP pour positif petit et PG pour positif grand.

e_i	Δe_i	NG	NP	EZ	PP	PG
NG		NG	NG	PN	NP	EZ
NP		NG	NP	PN	EZ	PP
EZ		NG	NP	EZ	PP	PG
PP		NG	EZ	PP	PP	PG
PG		EZ	PP	PP	PG	PG

Tableau. III.1. Matrice d'inférence du régulateur flou

III.6.4. Défuzzification :

Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont, [17]:

III.6.4.1. Méthode du maximum :

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (par fois on trouve deux valeurs maximales).

III.6.4.2. Méthode de la moyenne des maxima :

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale [7].

III.6.4.3. Méthode du centre de gravité :

Cette méthode est la plus souvent utilisée et donne généralement les meilleurs résultats. Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité Δu_n peut être déterminé à l'aide de la relation générale suivante :

$$\Delta u_n = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (IV.6)$$

Nous sommes intéressés à cette dernière méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

III.7. Développement du contrôleur flou :

III.7.1 Description du contrôleur :

Notre but est de contrôler les courants rotoriques d'une machine asynchrone à double alimentation (DFAM). Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani. Ce schéma est représenté par la figure (IV.7), il est composé:

- ❖ Des facteurs de normalisation associent à l'erreur e , à sa variation Δe et à la variation de la commande (Δu);
- ❖ D'un bloc de fuzzification de l'erreur et sa variation;
- ❖ Des règles de contrôle flou;
- ❖ La stratégie de commande est présentée par une matrice d'inférence du même type que celle présentée dans le tableau (IV.1);
- ❖ D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique;
- ❖ D'un intégrateur.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$V_{rd}^v = V_{rd}^v(k-1) + du(k) \quad (IV.7)$$

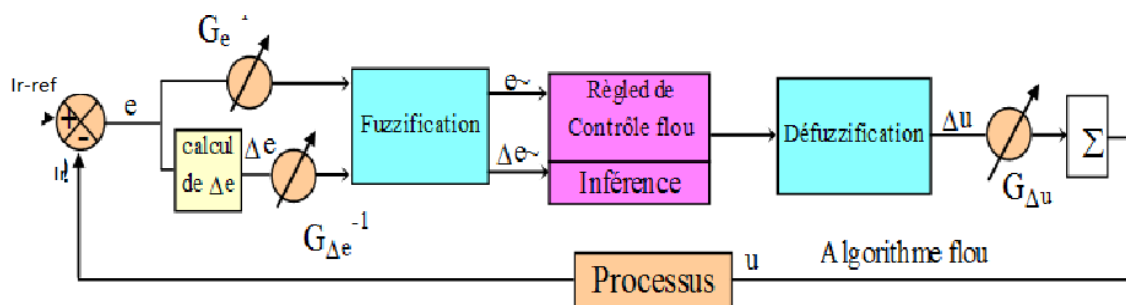


Fig. III.7. Schéma bloc d'un contrôleur flou.

Le contrôleur flou considéré utilise [18]:

- Les fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales, ce choix est du à la simplicité de mise en œuvre;
- Un univers de discours normalisé;
- L'univers de discours est découpé en sept (réglage fin) pour les variables d'entrées et de sortie; une subdivision très fine de l'univers de discours sur plus de sept ensembles flous n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système à réguler, [8].
- L'implication de Mamdani pour l'inférence;
- La méthode du centre de gravité pour la défuzzification;

La figure (IV.8) représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

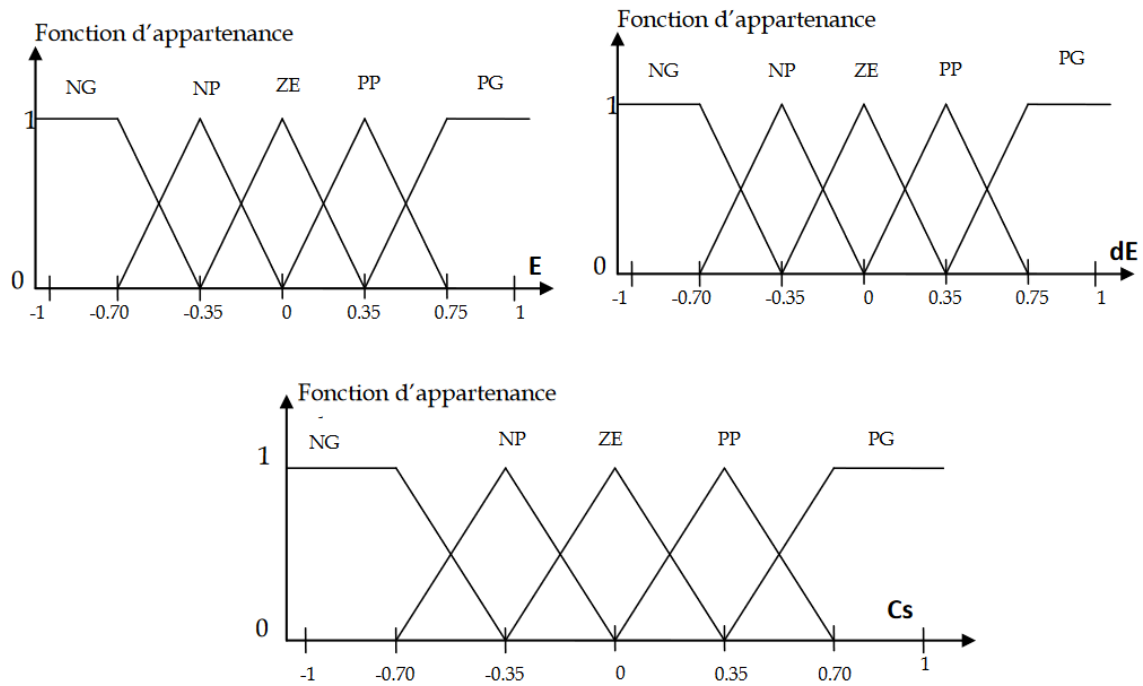


Fig. III.8. Fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

III.7.2. Loi de commande :

Cette loi est fonction de l'erreur et sa variation ($u = f(e, \Delta e)$). Elle est donnée par :

$$u_{k+1} = u_k + G_{\Delta u} \cdot \Delta u_{k+1} \quad (IV.8)$$

Avec : $G_{\Delta u}$ le gain associé à la commande u_{k+1}

Δu_{k+1} : La variation de la commande.

L'erreur e et la variation de l'erreur Δe sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} x_e = G_e \cdot e \\ x_{\Delta e} = G_{\Delta e} \cdot \Delta e \end{cases} \quad (IV.9)$$

Avec : G_e et $G_{\Delta e}$ sont les facteurs d'échelle (normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce qu'on puisse avoir un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

III.8. Réglage des courants rotoriques de la GADA:

Nous allons maintenant reprendre le même schéma de la commande vectorielle sauf que cette fois-ci les régulateurs de courants rotoriques sont des régulateurs flous (figure (IV.9)).

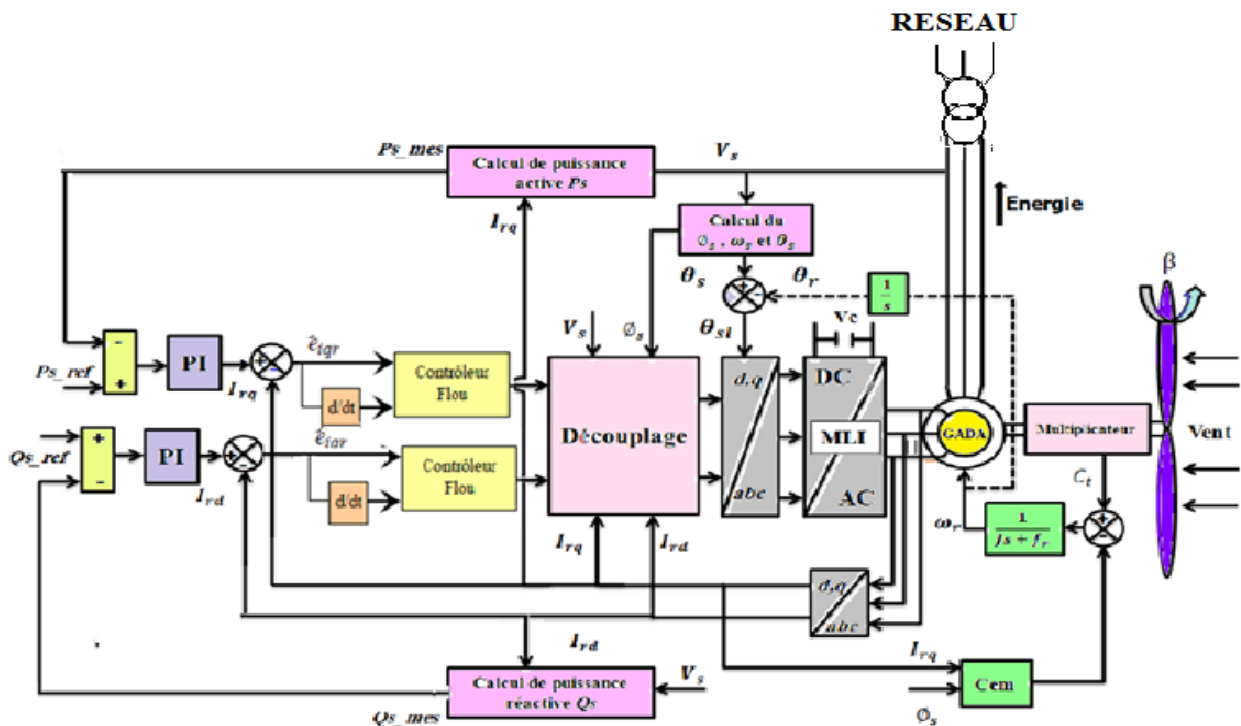


Fig. III.9. Schéma bloc global de la commande floue.

Les deux régulateurs de courant sont de même type (régulateur de type Mamdani à sept classes), et possèdent les mêmes fonctions d'appartenance.

III.9. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des régulateur floue .

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

❖ Entre $t=0.2\text{s}$ et $t=0.6\text{s}$ échelon négative ($P_{\text{réf}} = -20000\text{W}$);

❖ Entre $t=0.6\text{s}$ et $t=1\text{s}$ ($P_{\text{réf}} = -10000\text{W}$);

La puissance réactive :

❖ Entre $t=0\text{s}$ et $t=1\text{s}$ échelon ($Q_{\text{réf}} = 0\text{var}$);

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande floue en puissance actives et réactives statorique appliquée à la GADA.

A travers les figures (IV.11) à (IV.12), nous observons que les composantes directes et en quadrature des courants statoriques et rotoriques suivent leurs valeurs de références, au vu de ces résultats, une meilleure poursuite du régulateur flou. Les régulateurs flous ne génèrent aucun dépassement, particulièrement au régime transitoire.

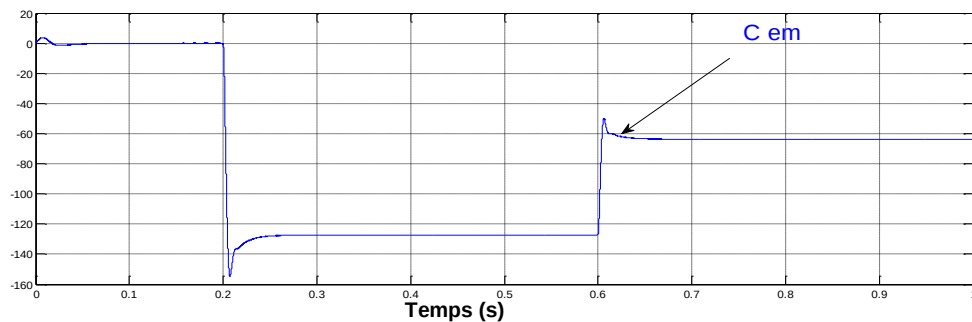


Fig. III.10. Couple électromagnétique

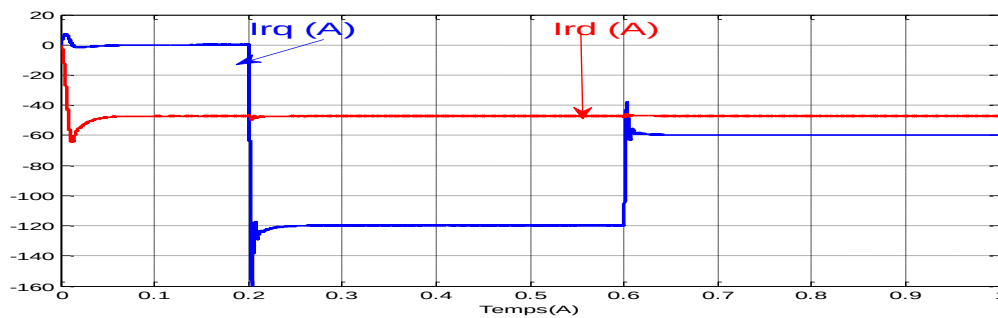


Fig. III.11. Les courants direct et quadrature rotoriques.

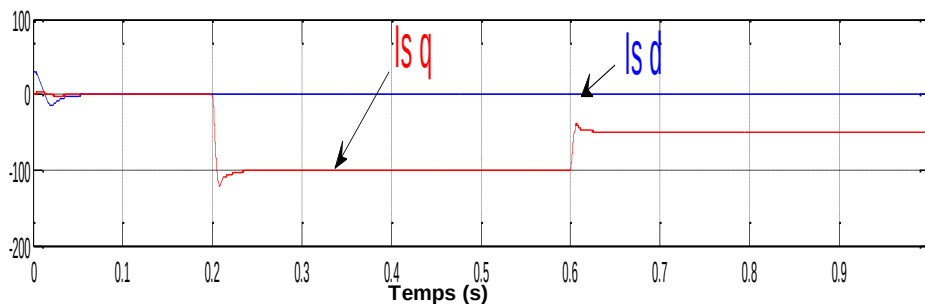


Fig. III.12. Les courants direct et quadrature statorique .

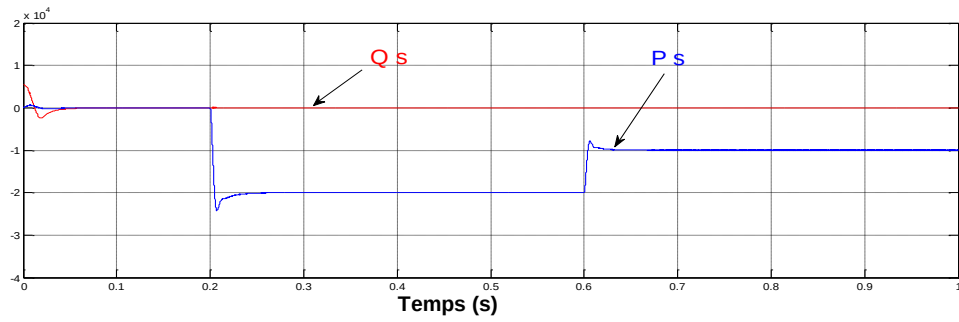


Fig. III.13. Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

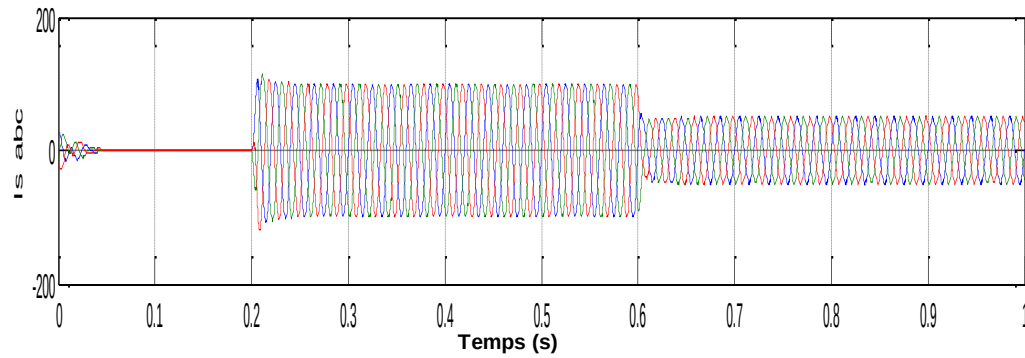


Fig. III.14. Courant triphasé statoriques

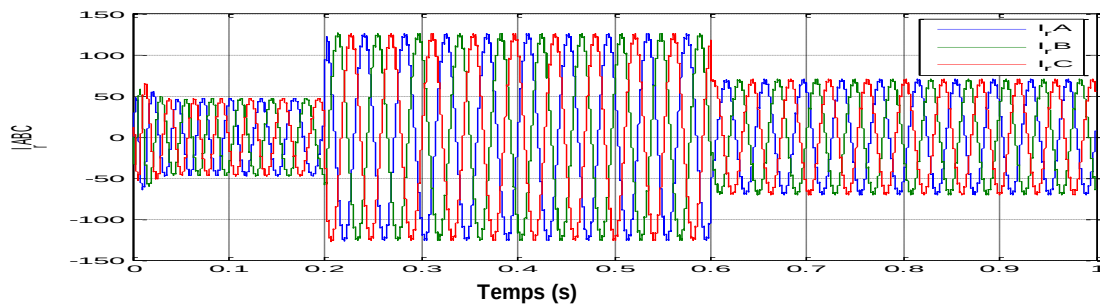


Fig. III.15. Courant triphasé rotorique

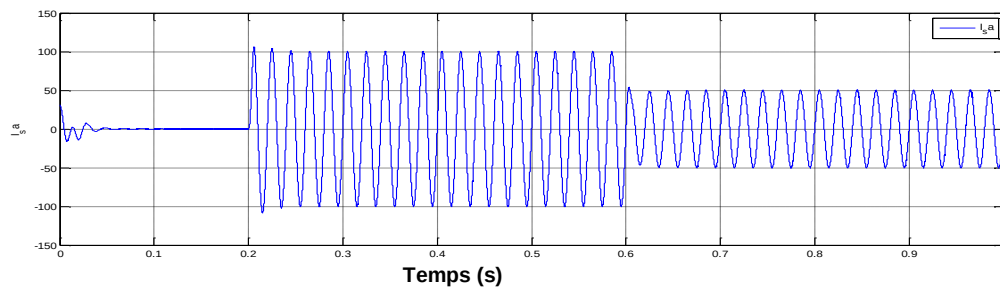


Fig. III.16. Courant par phase statoriques

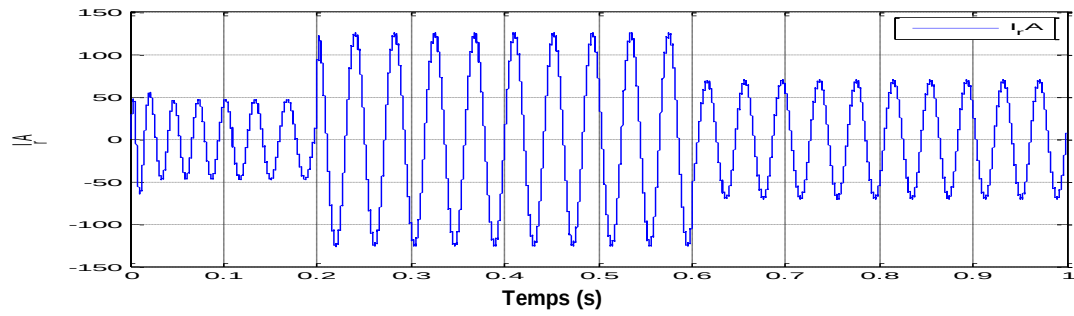


Fig. III.17. Courant par phase rotorique

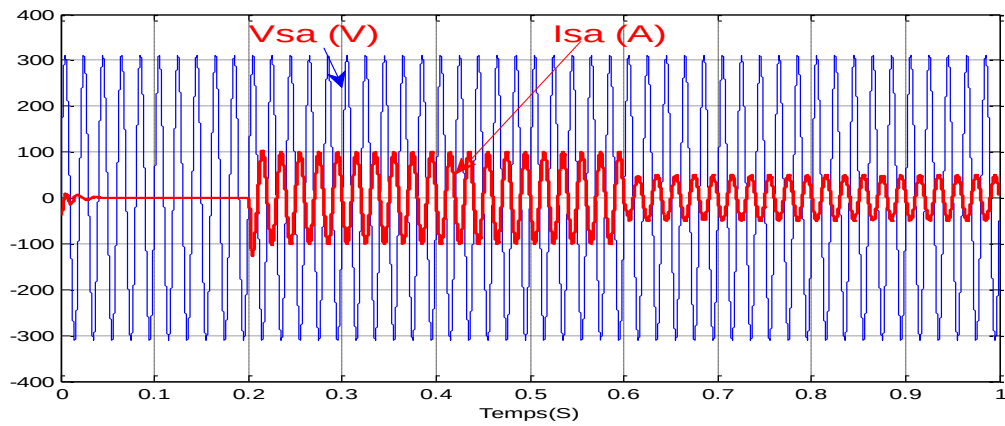


Fig. III.18. Le courant et la tension statoriques

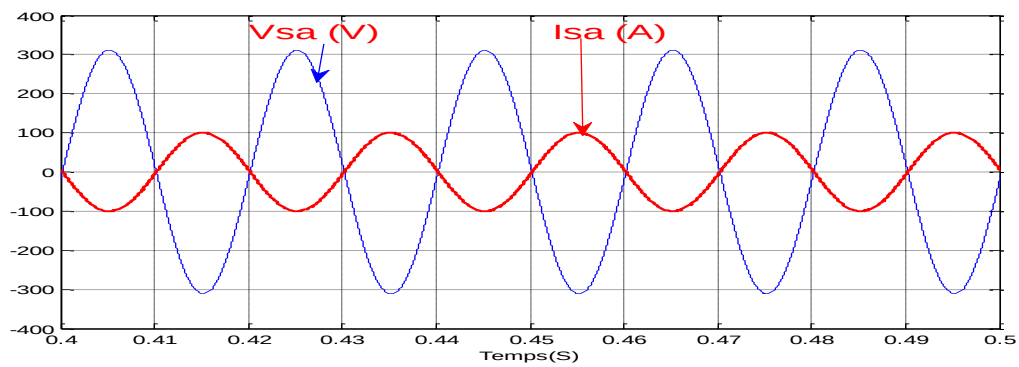


Fig. III.19. Zoom sur le courant et la tension statoriques

III.11. Conclusion:

Dans ce chapitre, la technique de la logique floue a été exposée. Un contrôleur à logique floue utilisant la notion de table de décision hors ligne est implanté dans la commande vectorielle pour la machine asynchrone à double alimentation (DFAM). Ce choix de la commande a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

Les résultats obtenus montrent que le FLC présente des performances de poursuite très satisfaisantes, Le problème majeur dans la conception d'un FLC est le choix des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie qui se fait généralement grâce à l'expertise du processus.

Cependant, un système flou est difficile à appréhender. Sa commande et son réglage peuvent être relativement long. Il s'agit parfois beaucoup plus de tâtonnement que d'une réelle réflexion. Il manque donc à la logique floue un moyen d'apprentissage performant pour régler un système flou.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de l'étude et Modélisation d'un système éolien par régulateur logique floue base de GADA lors de présence de perturbation dans le réseau électrique .

Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone branché au réseau électrique et alimentant des charges. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de la machine MADA.

Ainsi, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art et les différents types d'éoliennes existant. On a également présenté leurs avantages et leurs inconvénients. Enfin, on a présenté les différents types de machine électrique employé dans l'éolienne.

Dans le second chapitre, on a présenté l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Ensuite, on a présenté le modèle mathématique de la (GADA). Enfin, on a présenté l'étude des différentes commandes existantes.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté la commande d'un système éolien par logique floue base de GADA et résultat de simulation obtenus sous Matlab .

Comme perspectives à ce travail, on envisage :

- La commande de la turbine par des techniques performantes (intelligence artificielle).
- L'étude et le diagnostic des défauts présents lors de fonctionnement est une étape très importante à simuler dans le futur.

ANNEXES :

1. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètres	Valeur numérique
<i>Puissance nominale (P_n)</i>	1.5 MW
<i>Nombre de Pales (R_t)</i>	3
Rayon de l'éolienne R	35.25 m
<i>Vitesse du vent minimale (V_{vm})</i>	5.5 m/s
<i>Vitesse du vent nominale (V_{vn})</i>	8.5 m/s
<i>Masse volumique de l'air (ρ)</i>	1.1225 kg/m ³
<i>Ratio de vitesse optimale (λ_{opt})</i>	7.2
<i>Coefficient de puissance maximal (C_{pmax})</i>	0.44
<i>Gain du multiplicateur (G)</i>	80
<i>Inertie de la turbine (J_t)</i>	800 kg m ⁻²

2. Paramètres de la GADA:

Paramètres	Valeur numérique
Puissance nominale P_n	1.5 MW
Tension nominale statorique V_s	398/690 V
Nombre de paires de pôles P	2
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Resistance statorique R_s	0.012 Ω
Resistance rotorique R_r	0.021 Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136 H
Inductance mutuelle M	0.0135 H
Coefficient de frottement f	0.0024 N.m.s ⁻¹

REFERENCE

- [01] T. ACKERMANN and L. SO EDER “Wind energy technology and curent status: a review” Department of Electric Power Engineering, Electric Power Systems, Royal Institute of Technology, Teknikringen 33, S-10044 Stockholm, Sweden Received 20 April 2000 ; accepted 25 April 2000.
- [02] [http : //www. Eolienne](http://www.Eolienne), « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre » Article de Scientifique American sur l'invention de Brush (1890).
- [03] H. Camblong. «Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d’arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
- [04] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, L’institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005.
- [05] V. Courtesuisse, «supervision d’une centrale multi sources à base d’éoliennes et de stockage d’énergie connectée au réseau électrique» Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d’Arts en métiers, 2008.
- [06] www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina...
« L’Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».
- [07] A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [08] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrice asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, 2003.
- [09] T. Douadi « Etude et commande d’un système éolien à base d’une génératrice asynchrone», thèse de magistère de l’université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maitrise d’énergie
- [10] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, “Le génie électrique dans le vent :état de l’art et recherches dans le domaine de la génération éolienne,” JCGE’03, Saint-Nazaire, 5 et 6 Juin 2003.

- [11] I. ATOUI « contribution au diagnostic de défaut dans une chaîne de production d'énergie », 2009.
- [12] R. BAÏLE « Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne », université de Corse le 18 Octobre 2010.
- [13] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », 2006.
- [14] C. Sage, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne, "REE, No.7, pp.42-48, Juillet 1998.
- [15] D. P. Kadam and B. E. Kushare, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," *International journal of engineering science & advanced technology*, vol. 2, no. 4, pp. 1076–1081, 2012.
- [16] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, 2005.
- [17] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Mechanical stresses in fixed-speed wind turbines due to network disturbances," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 4, pp. 361–367, 2001.
- [18] M. R. Khadraoui and M. Elleuch, "Comparison between optislip and fixed speed wind energy conversion systems," in *2008 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2008, pp. 1–6.
- [19] D. J. Burnham, S. Santoso, and E. Muljadi, "Variable rotor-resistance control of wind turbine generators," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–6.
- [20] P. Jatinkumar, S. P. Gupta, and S. P. Singh, "Comparison of control techniques for rotor current control of line-excited slip-ring IG for WECS," in *2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 2010, pp. 669–674.
- [21] S. Metatla, S. Mekhtoub, R. Ibtouen, and A. Nesba, "Dynamic behavior of doubly fed induction generator during network voltage dips," in *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014, pp. 1–6.
- [21] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques," Presses de L'Université de Batna, 1997.

- [22]Zadeh, L. A, “Fuzzy Sets”, Information and Control, 8, 338, 1965.
- [23]Zadeh, L. A, “A ationale for Fuzzy Control”, J. Dynamic Syst., Meas and Control, Vol. 94, Series G, 3, 1972.
- [24]Zadeh, L. A, “Making the Computers Think Like People”, IEEE Spectrum, 1994.
- [25]J. Yan, M. Ryan & J. Power, “Using fuzzy logic”, Prentice Hall International (UK), 1994.
- [26]E. Mamdani, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controllers”, Inter. Jour. on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 1-13, 1975.
- [27]Mamdani E. H, “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant”, Proc. of IEE, Vol. 121, No. 12, 1974.
- [28]H. Bühler, “Réglage par logique floue”, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994.
- [29]P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, “Introduction à la logique floue”, Edition technip, 1998.
- [30]Kickert. W. J.M and Mamdani, E.H, “Analysis of a fuzzy logic controller”, Fuzzy Sets and Systems, 1, 29–44, 1978.
- [31]Backley, J. J, “Theory of the fuzzy controller: an introduction”, Fuzzy Sets and Systems, 51, 249–258, 1992.
- [32]Nezar. M, “Diagnostic des associations convertisseurs statiques- machines asynchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle”, thèse de doctorat d'état de l'université de Batna, 2006.
- [33]Braae. M and Rutherford, D.A, “Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller”, Automatica, 15, 553–577, 1979.

Résumé:

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude et Modélisation d'un système éolien par régulateur logique floue base de génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui peut être introduite dans un système éolien.

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté la commande d'un système éolien par logique floue base de GADA et résultat de simulation obtenus sous Matlab .

Mots clés:

System éolien - Modélisation - GADA- logique floue – régulateurs PI conventionnels - Convertisseur.

ملخص:

في هذه المذكرة ,نعرض دراسة للتحكم في المولد اللاتزامني مزدوج التغذية و التحكم في سرعته بواسطة المنظمات الضبابية الذي يمكن توصيله بنظام توليد طاقة الرياح.

الفصل الأول يعرض الحالة الفنية للطاقة الهوائية، مختلف بنيات التغذية و نوع المولدات المستعملة، حيث وقع اختيارنا على المولد اللاتزامني مزدوج التغذية و التحكم فيه من خلال متغيرات الدوار. نموذج الجزء الميكانيكي لنظام توليد طاقة الرياح و المولد اللاتزامني مزدوج التغذية تم تفصيله في الفصل الثاني.

الفصل الثالث يعرض التحكم الضبابي في المولد اللاتزامني مزدوج التغذية موصول بنظام توليد طاقة الرياح. والوصول لنتائج المحاكاة المحصل عليها سمحت بتقييم الطريقة المستخدمة للتحكم في الالة.

كلمات مفتاحية

نظام توليد طاقة الرياح, مولد لا تزامني ثنائى التغذية GADA, التحكم التقليدي PI، التحكم الضبابي، الطاقة توربينات الرياح، MPPT،