

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie électrique et de l'informatique
Département d'électrotechnique



MEMOIRE de MAGISTER

EN ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : ENTRAINEMENT ELECTRIQUES



Mme HEDIR née SAIGH Henia

***ÉVALUATION ET COMMANDE DE LA PUISSANCE
D'UNE INSTALLATION ÉOLIENNE***

Mémoire soutenu le : 27/05/2012 devant le jury d'examen composé de :

Président :	Mr MOHELLEBI Hassane	Professeur	UMMTO
Rapporteur :	Mr FELLAG Sid Ali	Maître de conférences A	UMMTO
Examineur :	Mr MAIDI Ahmed	Maître de conférences A	UMMTO
Examineur :	Mr HAZZAB Abdeldjebar	Professeur	Université Bechar

Remerciements

Tout d'abord merci au bon DIEU le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures circonstances et en bon état.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à monsieur FELLAG Sid Ali Maître de conférence classe A au département d'électrotechnique de l'UMMTO d'accepter d'être rapporteur de ce mémoire et pour son aide précieuse qu'il m'a apportée pour réaliser ce travail.

Ainsi je remercie Monsieur MOHELLEBI Hassene, professeur au département d'électrotechnique de l'UMMTO qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur MAIDI Ahmed, Maître de conférences classe A au département d'automatique de l'UMMTO pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur.

Mes remerciements vont à Monsieur HAZZAB Abdeldjebar, professeur à l'Université Bechar pour avoir accepté d'être examinateur.

Et je tiens à exprimer toutes mes reconnaissances à mes demoiselles ARAB Naima et KECILI Nadia Etudiantes en doctorat pour leurs aides et disponibilités au cours de ce travail.

Ma gratitude, va à mon adorable époux pour avoir été toujours à mes côtés et son soutien inconditionnel tout au long de mon travail.

Et mes adorables fils Lyes et Nassim sans oublier mes chères parents, mes frères et sœurs ainsi que mes beaux parents.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Chapitre 1 : Ressources Énergétiques Renouvelables Et L'état de l'art des Systèmes Éoliens

1-Introduction.....	4
1-2-Les principales sources d'énergies renouvelables.....	4
1-2-1 Production de la chaleur par les sources renouvelables.....	4
1-2-1-1 Thermo-solaire.....	5
1-2-1-2 Géothermie	5
1-2-1-3 Biomasse	5
1-2-2 Production de l'électricité par les énergies renouvelables	6
1-2-2-1 L'hydraulique	8
1-2-2-2 Énergie de la mer.....	8
1-2-2-3-L'énergie éolienne.....	9
1-2-2-3-1 Constitution d'une éolienne.....	10
a) Mat	10
b) Rotor.....	10
c) Nacelle	10
c-1 Différentes composantes de la nacelle	11
c-1-1 Le multiplicateur de vitesse	11
c-1-2 L'arbre secondaire.....	11
c-1-3 La génératrice	11
c-1-4 Un contrôleur électronique.....	11
1-2-2-3-2 Différents types d'éoliennes.....	11
a)Éolienne à axe vertical.....	11
b)Eolienne à axe horizontal	13

1-2-2-3-3 Fonctionnement à vitesse fixe	15
1-2-2-3-3-1 Principe	15
1-2-2-3-3-2 Avantages	16
1-2-2-3-3-3 Inconvénients	16
1-2-2-3-4 Fonctionnement à vitesse variable.....	16
1-2-2-3-4 -1 Avantages.....	16
1-2-2-3-4 -2 Inconvénients	16
1-2-2-3-5 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	17
1-2-2-3-5 1 Atouts	17
1-2-2-3-5 -2 Désavantage.....	18
1-2-2-3-6 Énergie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique.....	18
Loi de Betz	18
1-2-2-3-7 Principe de la conversion de l'énergie	21
1-2-2-3-8 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne	22
a)-Descriptif d'une éolienne	22
1-2-2-3-9 - Accouplement mécanique	22
a)Eolienne à attaque directe	22
b)-Eolienne à attaque indirecte	23
1-2-2-3-10 Mode de régulation	24
a)- pitch – régulation.....	24
b)-Stall –régulation	25
1-2-2-3-11 chaine de conversion electromecanique.....	26
a)-Systèmes non couplés au réseau alternatif.....	26
b)-Système couplé au réseau alternatif	27
b-1) Génératrices asynchrones à cage.....	27
b-2) Machine synchrone	28
b-3) Machine asynchrone à double alimentation	29
Conclusion.....	29

Chapitre 2 Modélisation d'un système éolien (turbine, MADA)

2-1 Introduction.....	30
2-2 Modélisation de la vitesse du vent	31
2-3 Modélisation de la turbine	32
2-3-1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	33
2-3-2 Modélisation de la turbine.....	35
2-3-3 Modèle du multiplicateur	36
2-3-4 Équation dynamique de l'arbre	36
2-3-5 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	39
2-4-Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	40
2-4-1 Principe général	40
2-4-2-Correcteur de vitesse de la turbine	42
2-5-Résultats de simulation de la MPPT par PI classique.....	44
2-6-Structure des machines asynchrone à double alimentation.....	48
2-7- Différents modes de fonctionnement.....	48
➤ Stationnaire.....	48
➤ Hypo synchrone.....	49
➤ Synchrone.....	49
➤ Hyper synchrone.....	49
2-8-Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA.....	49
2-8-1-Fonctionnement en mode moteur	49
2-8-1-1-Moteur hypo synchrone	49
2-8-1-2-Moteur hyper synchrone	50

1-Première configuration : stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur	50
2-Deuxième configuration : Structure à base de cyclo convertisseur.....	51
3-troisième configuration : MADA alimentée par convertisseur indépendants	51
2-8-2 Fonctionnement en mode génératrice	53
2-8-2-1Génératrice hyper synchrone.....	53
2-8-2 -2 Génératrice hypo synchrone	53
2-9 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et sa commande	54
2-9-1 Hypothèses simplificatrices.....	54
2-9-2 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de PARK	55
➤ Équations électriques.....	56
➤ Équations magnétiques.....	57
➤ Équation mécanique.....	57
2-10 Resultats de simulation.....	57
2-11 Modélisation du redresseur.....	64
2-11-1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion	64
2-11-2 Application des stratégies de MLI au redresseur.....	65
2-11-3 Modélisation du redresseur avec la stratégie de MLI à porteuse triangulaire.....	65
2-11-4 Hypothèses simplificatrices de modélisation	67
2-11-5 contrôle de la tension du bus continu U_{dc}	68
2-12-Onduleur à MLI vectorielle	70
2-12-1 Le principe de la modulation vectorielle	72
2-12 -2 Présentation des vecteurs de commutation dans le plan (α, β)	72
2-12-3 Résultats de simulation.....	77
2-13 Conclusion	78

Chapitre 3 commandes vectorielles de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

3-1 Introduction.....	79
3-2 Principe de la commande vectorielle.....	79
3-3 Variantes de la commande vectorielle.....	79
3-4 Choix de référentiel pour le modèle diphasé.....	80
3-5 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	81
3-6 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	81
Résultats de simulation.....	86
Conclusion.....	88

Chapitre4 Utilisation de la logique floue pour réaliser un circuit d'évaluation de la puissance d'un système éolien

4-1 Introduction	89
4-2 Histoire de la logique floue	90
4-3 Définition de la logique floue	91
4-4 Applications.....	93
4-5 Bases générales de la logique floue.....	94
4-5-1 Variables linguistiques.....	94
4-5-1-1 Définition des variables linguistiques par des fonctions d'appartenance.....	95
➤ Fonctions triangulaires.....	96
➤ Fonctions trapézoïdales.....	96
➤ Fonctions rectangulaires.....	97
➤ Fonctions en formes de cloche.....	97

4-5-2 Dédutions flous (Inférences)	97
4-5-2-1 Opérateurs de la logique floue	98
1) Opérateur NON (complément)	98
2) Opérateur ET (intersection)	99
3) Opérateur OU (union)	100
4-5-2-2 Autres opérateurs de la logique floue	100
4-5-2-2-1 Opérateurs ET et OU, réalisé par opérations arithmétiques.....	100
4-6 Principe de fonctionnement	102
4-6-1 Fuzzification ou quantification floue	102
4-6-2 Inférence	102
4-6-3-Défuzzificaton	103
1) Méthode du centre de gravité	103
2) Défuzzificaton par valeur maximale	104
3) Défuzzificaton par la valeur moyenne des maximas	105
4) Avantages et désavantages de la logique floue.....	105
4-7 Réglage par logique floue	105
4-7-1 Méthodes d'inférence	106
4-7-1-1 Méthode de d'inférence MAX-MIN (Méthode de Mamdani.....	107
4-7-1-2 Méthode d'inférence : MAX-PRODUIT (<i>Méthode de LARSEN</i>)	110
4-7-1-3 Méthode d'inférence somme-produit (Méthode de SUGENO).....	112
4-7-2 Différents types de RLF	115
4-7-2-1 Régulateur flou de type PD	115
4-7-2-2 Régulateur flou de type PID	115

4-7-3 Structure de base d'une commande floue	116
4-8 Résultats de simulation	120
Interprétation des résultats et conclusion.....	124

Chapitre 5 résultats de simulation du système global

Introduction.....	125
5-2 Schéma synoptique du dispositif étudié.....	125
5-3 Résultats de simulation.....	125
5-3 Interprétation des résultats.....	129
5-4 Conclusion.....	129

Conclusion générale

Annexe

Références bibliographiques

NOMENCLATURE

G	Gain du multiplicateur de vitesse ;
R	Rayon de l'éolienne [m] ;
Ω_{turbine}	vitesse de rotation de la turbine [rd/s] ;
C_p	Coefficient de puissance ;
λ	Rapport de vitesse ;
β	Angle d'orientation des pales [rd] ;
J_{turbine}	Moment d'inertie de la turbine [kg.m^2] ;
P_{aer}	Puissance aérodynamique [W] ;
C_{aer}	Couple électromagnétique [N.m] ;
ρ	la densité volumique de l'air [kg/m^3] ;
$C_{p\text{max}}$	Coefficient de puissance maximal ;
λ_{opt}	rapport de vitesse optimal ;
S	la surface circulaire balayée par la turbine [m^2] ;
V_{vent}	la vitesse du vent [m/s] ;
C_g	Couple transmit à la génératrice [N.m] ;
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m] ;
C_{vis}	Couple des frottements visqueux [N.m] ;
C_r	Couple résistant [N.m] ;
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s] ;
f	Coefficient des frottements visqueux [N.m.s/rd] ;
P_g	Puissance électrique de l'aérogénérateur [W] ;
P_{mec}	Puissance mécanique [W] ;

P_s	puissance active statorique [W] ;
Q_s	Puissance réactive statorique [W] ;
P_r	Puissance active rotorique [W] ;
Q_r	Puissance réactive rotorique [W] ;
g	Le glissement de la génératrice ;
R_s	Resistance d'une phase statorique [Ω] ;
R_r	Resistance d'une phase rotorique [Ω] ;
Φ_{ds}	Flux statorique d'axe directe [Wb] ;
Φ_{qs}	Flux statorique d'axe en quadrature [Wb] ;
Φ_{dr}	Flux rotorique d'axe direct [Wb] ;
Φ_{qr}	Flux rotorique d'axe en quadrature [Wb] ;
V_{ds}	tension statorique d'axe direct [V] ;
V_{qs}	tension statorique d'axe en quadrature [V] ;
V_{dr}	tension rotorique d'axe direct [V] ;
V_{qr}	tension rotorique d'axe en quadrature [V] ;
ω_s	Pulsation statorique [rd/s];
ω_r	Vitesse électrique du rotor ;
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice ;
L_s, L_r	Inductances cycliques statorique et rotorique [H] ;
M	Inductance mutuelle [H] ;
I_{ds}	Courant statorique d'axe direct [A] ;
I_{qs}	Courant statorique d'axe en quadrature [A] ;

- I_{dr} Courant rotorique d'axe direct [A] ;
- I_{qr} Courant rotorique d'axe en quadrature [A] ;
- MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation ;
- η Rendement de la MADA ;
- J_g Moment d'inertie du rotor de la génératrice [kg.m²] ;
- J Moment d'inertie totale [kg.m²] ;
- p L'opérateur de Laplace.

Introduction générale

La progression rapide de la demande énergétique mondiale et l'échéance des réserves d'énergie fossiles favorise le développement des énergies renouvelables, ces énergies, qu'on appelle renouvelables ont été longtemps et pour la plupart les seules énergies disponibles, faibles en puissances, dispersées sur les territoires.

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80%, à partir des combustibles fossiles (pétrole, gaz,... ou fissiles (nucléaires), ressources épuisables et polluantes à la fois [1].

Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission des signaux,...etc. c'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable [2].

L'augmentation importante de la consommation d'électricité produite à partir des énergies fossiles ou nucléaires et également la conscience écologique naissante ont fortement augmenté l'intérêt pour les énergies renouvelables. L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelables à travers le monde en termes de développement.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelle, d'origine principalement fossiles (le charbon, le gaz, le pétrole) ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente, d'une part. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs [3].

Face aux problèmes liés à l'environnement, on assiste depuis quelques années dans le domaine de la production d'électricité à un fort développement d'énergie éolienne.

Jusqu'à présent, il existe deux catégories d'éoliennes : les éoliennes à vitesse fixe directement couplées au réseau par le stator et les éoliennes à vitesse variable commandées par le stator ou le rotor au moyen des convertisseurs d'électronique de puissance. La deuxième catégorie

Introduction générale

permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les charges mécaniques et d'améliorer la qualité d'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

A fin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent, cette étude s'intéresse à la Machine Asynchrone Double Alimentation(MADA) qui fait le cœur d'une grande partie des éoliennes actuelles suite à ses avantages relativement aux autres actionneurs électromagnétiques[4].

La MADA trouve son application dans les entraînements de grande puissance. Elle se caractérise par sa robustesse, sa longévité et une plage de variation de vitesse plus importante (régime hypo synchrone, synchrone et hyper synchrone).

Les éoliennes sont équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions du vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant à chaque fois le point de fonctionnement à maximiser la puissance.

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Les techniques de commande classiques de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont les techniques de commande linéaires. Au cours de temps, ses applications seront sans efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non linéaires.

De plus, l'application de ces techniques exige la connaissance des différents paramètres du modèle de la machine cela peut influencer sur le fonctionnement du processus et peut entraîner une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres et des dépassements importants lors des régimes transitoires [5].

Au cours de ces dernières décennies, les recherches sont orientées vers des commandes plus robustes dont la commande par logique floue. Les travaux présentés dans ce mémoire de magister, s'inscrivent dans cette logique qui est exploitée afin de maximiser la puissance produite.

Le contenu de ce mémoire est structuré en cinq chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art des énergies renouvelables utilisées dans la production de l'énergie électrique ainsi, les rappels sur les différents types d'éoliennes (à axe vertical, horizontal) avec leur système de régulation et de protection, suivi des différents types de génératrices utilisées dans l'éolienne.

La modélisation d'un système éolien : turbine, machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, fait l'objet du deuxième chapitre, où nous allons exploiter une stratégie de commande avec asservissement de la vitesse de rotation en utilisant un régulateur proportionnel intégral afin d'extraire un maximum de puissance.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant statorique en vue de l'introduction d'une stratégie de commande en puissance active et réactive basé sur le régulateur (PI).

Dans le quatrième chapitre, nous adopterons une approche qui permettra l'évaluation et l'extraction de la puissance maximale, qui est la logique floue, on présentera les bases générales de cette technique, les différents opérateurs qui sont mis en évidence pour lier les variables linguistiques, ainsi la méthodologie de contrôle en exploitant un régulateur par logique floue.

Dans le cinquième chapitre nous avons présenté les différents résultats de simulation ainsi que leurs interprétations.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

CHAPITRE 1

RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES ET L'ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES ÉOLIENS

1-1 Introduction

Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émission de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium...etc.) dont les gisements sont limités.

Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leur fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

En Algérie, trois raisons plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables :

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions de grand sud,
- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles,
- La valorisation de ces ressources ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et

1-2 Principales sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois - énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité... etc.).

1-2-1 Production de la chaleur par les sources renouvelables

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...etc.). Cette énergie est majoritairement obtenue par

la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

1-2-1-1 Thermo-solaire : une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques.

La solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire, cette application de l'énergie solaire est en phase de croissance accélérée aux Etats Unis d'Amérique, au Japon et en Europe.

Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance.

1-2-1-2 Géothermie : la géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. À part cela il existe également la géothermie volcanique.

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol, la température croit 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 vraie de 3°C par 100m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. La chaleur produite sert dans la plus part des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiment [5].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs d'années (30 à 50 ans en moyenne) [6].

1-2-1-3 Biomasse : la biomasse désigne l'énergie pouvant être extraite directement ou indirectement, de matériaux biologiques. Le bois, les déchets agricoles et le fumier restent les principales sources d'énergie dans beaucoup de pays en voie de développement. Elle se place au 4ème rang des énergies primaires (derrière le pétrole, le charbon et le gaz naturel), mais l'utilisation de cette source d'énergie n'est cependant pas le remède miracle à la crise de

l'énergie. C'est une énergie renouvelable à utiliser avec discernement en concurrence avec beaucoup d'autres.

Généralement, les dérivés ou déchets sont également chassés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie (les biocarburants, le biogaz).

Le bois énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée dans le monde. En Europe ; c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes...etc.).

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur, de nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 million de m³ ont été utilisés dans le monde. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum une croissance de cette technologie est donc à prévoir [3].

1-2-2 Production de l'électricité par les énergies renouvelables

Une autre famille d'énergie renouvelable est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distributions [3].

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité bien qu'en énergie fluide propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. Le taux de croissance mondial de la production d'électricité est de 2.4% / an [5].

La figure suivante montre la courbe de croissance de la production mondiale d'électricité avec une prévision jusqu'en 2020

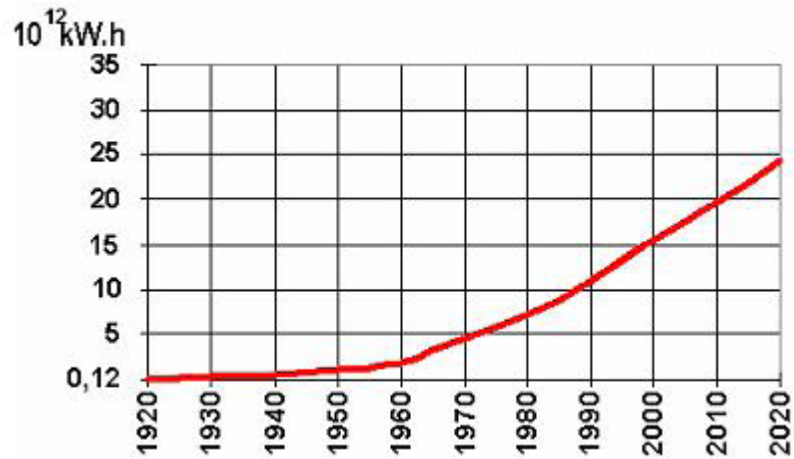


Figure1.1 Evolution et prévision de la production mondiale d'énergie électrique (10^{12} kWh=1000TWh)

Actuellement presque 98% de l'électricité aux Etats-Unis est produit de ressources fossiles (charbon 52%, 20% nucléaire, 16% gaz naturel, et 3% huile) et de l'hydro-électricité (70%), 2% restant est produit des ressources renouvelables [3].

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance. La figure suivante donne la vue sur la répartition de la production de l'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir.

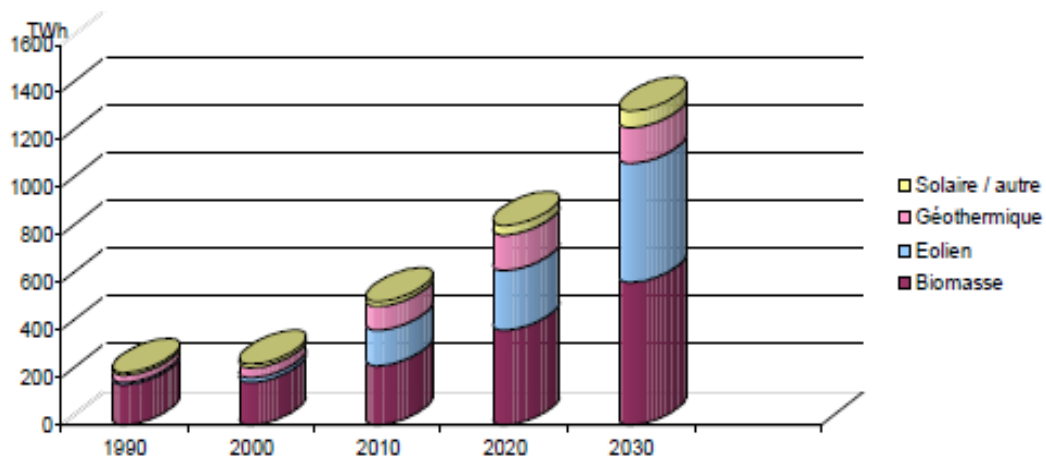


Figure1.2 Production mondiale de l'électricité sur les énergies renouvelables.

1-2-2-1 L'hydraulique

L'hydro-électricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIX^e siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau.

Cette énergie présente l'avantage d'être une énergie parfaitement renouvelable, dont la contribution au bilan énergétique mondial s'est élevée pour la plus grande part, dans les pays d'Afrique et d'Amérique du sud les aménagements hydroélectriques posent des problèmes hydrauliques divers. Ils concernent les prises d'eau, les barrages, les vannes, les conduites et galeries d'amenée ou de fuite, les cheminées d'équilibres, les évacuateurs de crue...etc.

En 1998, cette source d'énergie présentait environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique.

En Europe, en 1999, on comptait environ 10 000Mw de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13 000 MW.

1-2-2-2 Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques, ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottements des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créés par les vents à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en énergie électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne présente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [6].

1-2-2-3-Energie éolienne

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en terme de coût de production. Il est entrain de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent, elle est en partie issue de l'énergie solaire. En effet, les grands flux de circulation atmosphérique sont en grande partie provoqués par la différence de température entre l'équateur et les pôles. Du fait de cette différence de pression, un flot d'air s'établit entre ces régions. La rotation de la terre provoque également des circulations d'air. Des différences locales de pression et de températures vont quant à elle donner des circulations particulières comme les brises de mer, les tornades [7].

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes 7siècles A.C pour moulinier du grain, ainsi dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement mécanique.

Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Ce sont les variations de la puissance résultantes des fluctuations du vent, qui constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne [8].

Les systèmes éoliens se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. De plus, le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur [9].

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales.

1-2-2-3-1 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de trois parties : le mât, la nacelle, et le rotor.

a) Mât : les mâts peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils supportent l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Ils sont fixés sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissants. Exceptionnellement jusqu'à 100 m. Pourquoi les éoliennes sont-elles si haut perchées ? C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons... et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Les pylônes des machines à axes verticals sont courts, entre 0.1 et 0.5 fois la hauteur du rotor. Ils sont le plus souvent du type haubané. Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans le choix de la solution à adopter.

b) Rotor : est composé du nez et de l'hélice, qu'on désigne le plus souvent sous le nom de pales de l'éolienne, construits avec des technologies dérivées de l'aéronautique. L'hélice possède en général 3 pâles, plus rarement 2. Les pâles sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et / ou fibre de carbone, leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres. Pourquoi telles dimensions ? La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor. Le rotor transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

c) Nacelle : abrite les équipements qui produisent l'électricité à partir de la rotation de l'axe du rotor, qui on appelle aussi « arbre ».

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. Les éoliennes sont également dotées d'un système de supervision et de contrôle très performants, élaboré autour d'un calculateur qui permet notamment :

- D'orienter le rotor de l'éolienne perpendiculairement à la direction du vent,
- De modifier l'angle d'incidence des pâles par rapport au vent, afin de maximiser la récupération d'énergie.

c-1 Différentes composantes de la nacelle

c-1-1 Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

c-1-2 L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

c-1-3 La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

c-1-4 Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situé à l'arrière de la nacelle.

1-2-2-3-2 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

a) Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en construction 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. Il existe principalement trois technologies ;

VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), les turbines Darrieus classique ou à pales droite (H type) et la turbine de type savonius comme montré à la figure suivante : toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.

De nos jours, les éoliennes à axes vertical sont très peu mises en œuvre car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation.

La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont un empire au sol plus important que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au dessus des pâles. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal [2,11].



Figure 1.3 Petites éolienne à axe vertical [12].

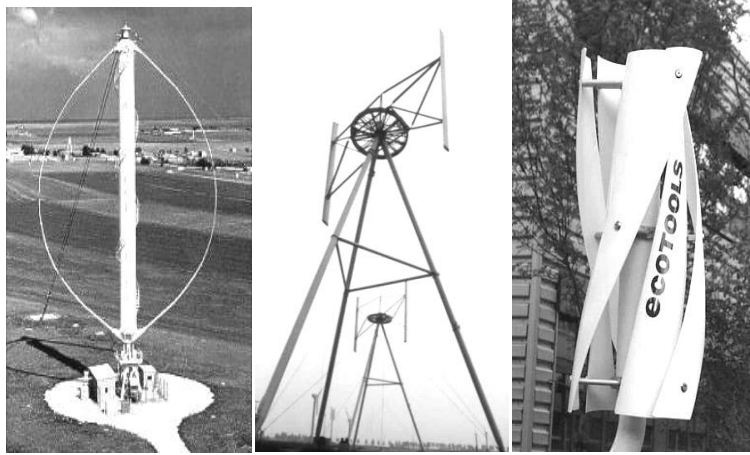


Figure 1.4 Exemple des constructions VAWT. a) Darrius, b) Darrius de type H, c) Savonius.

b) Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur une technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pâles profilées aérodynamiquement 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 pâles utilisé pour la production d'électricité varié 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.

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Les voilures à axes horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. La voilure peut être placée avant la nacelle (up wind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire.

Les pâles des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylone par fort vent. Ceci est l'inconvénient moyen de ce type de structure.

Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (down wind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont

assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pâles derrière le mat. Les deux procédés sont montrés par la figure suivante :[2,3]

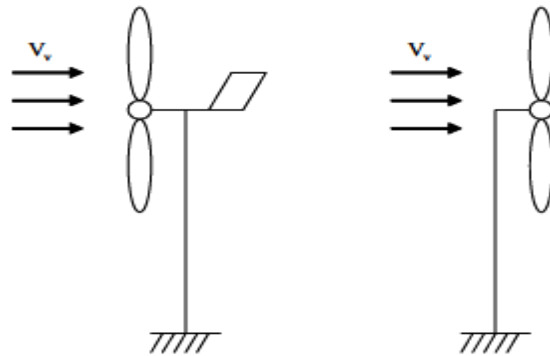


Figure1.5 Type de montage de la voile . a) Up Wind b) Down Wind



Lagerwey 250 KW



Tripale Nordex 1.5 MW



Tripale flexible (Air Wind 400 W)

Bipale



Rotor sous le vent (Vergnet 220 KW)



Système à concentrateur (expérimental)

Figure1.6 Turbines à axe horizontal : dispositifs les plus fréquents [13].

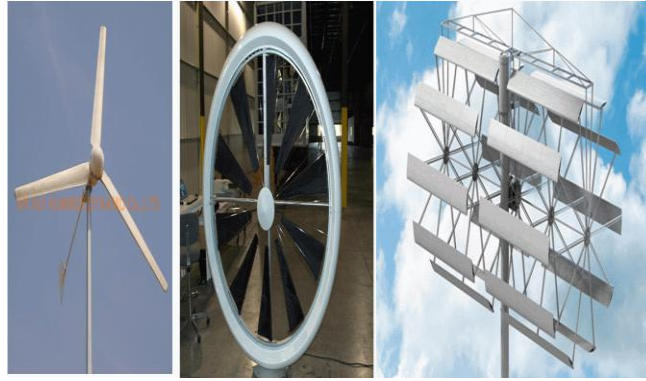


Figure 1.7 Petite éolienne à axe horizontal.

1-2-2-3-3 Fonctionnement à vitesse fixe

1-2-2-3-3-1 Principe

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 Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure 1.8)

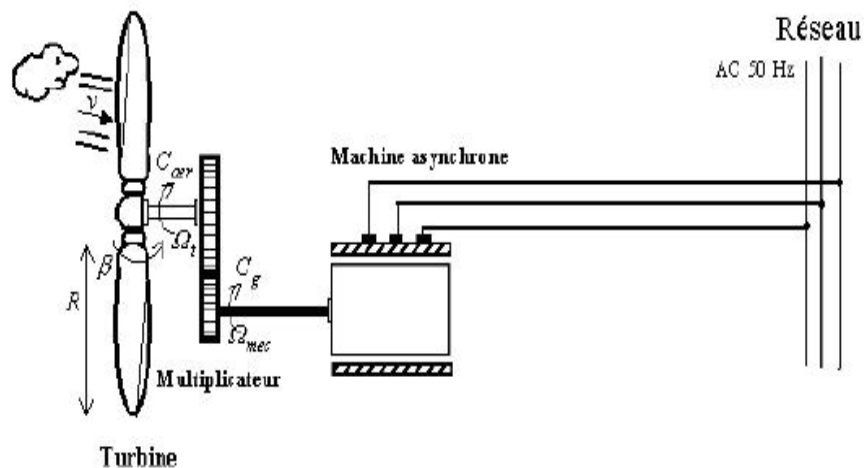


Figure 1.8 Eolienne directement connectée au réseau.

1-2-2-3-3-2 Avantages

Les avantages principaux de ce type :

1. Système électrique plus simple.
2. Moins cher.
3. Pas besoin de système d'électronique de puissance.
4. Plus fiable (moins d'entretien).

1-2-2-3-3-3 Inconvénients

- ✓ En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint.
- ✓ L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- ✓ Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- ✓ Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

1-2-2-3-4 Fonctionnement à vitesse variable

1-2-2-3-4 -1 Avantages

- ✓ Une meilleure exploitation de l'énergie du vent
- ✓ Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- ✓ Contrôle du transfert de puissance et l'énergie propre envoyée au réseau.
- ✓ Réduction des contraintes mécaniques subit par le train de puissance. Les turbulences et rafales du vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- ✓ Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- ✓ Réduction des bruits acoustiques.

1-2-2-3-4 -1 Inconvénients

- ✓ L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau et son coût.
- ✓ Utilisation des machines spéciales.
- ✓ Complexité des convertisseurs de puissances utilisés.
- ✓ Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.
- ✓ Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande...).

1-2-2-3-5 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1-2-2-3-5 -1 Atouts

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies des acides on à la pollution de notre planète en général.
- L'exploitation de l'énergie éolienne évite l'émission de 6.3million de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17.5 mille tonnes de NO₂ [2]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin.
- Les parcs éoliennes se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- L'énergie éolienne ne crée pas de gaz à effet de serre.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal et plastique [14].

D'autre part, l'énergie éolienne a des atouts économiques :

- 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.
- C'est une 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

1-2-2-3-5 -1 Désavantages

L'énergie éolienne présente quelques désavantages :

- *Le bruit* : il a nettement diminué notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisées 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 éoliennes ne doivent pas être implantées sur les parcours migratoire des oiseaux, afin que ceux-ci ne se assent pas attrapée par les aéroturbines.
- *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.
- *Le coût de l'énergie éolienne* : par rapport aux sources d'énergies classiques bien qu'en terme de coût, l'éolienne puisse sur les meilleurs sites, c'est-à-dire la où il ya le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
- La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision. Dans ce cas, il est fréquent que la société implantant les éoliennes finance la construction d'un nouvel émetteur de télévision.

1-2-2-3-6 Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique

Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté par la figure ci-dessous sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après

passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ

traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m est alors extraite par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression donnée au 1.1 :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (1.4)$$

ρ : La densité de l'air qui est égale à $1,22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C

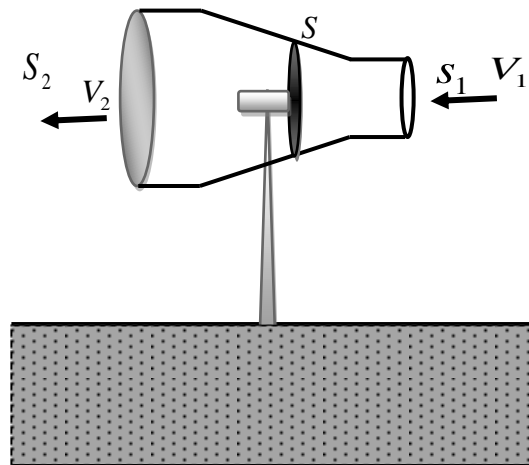


Figure 1.9 Tube de courant autour d'une éolienne

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de loi de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse du vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

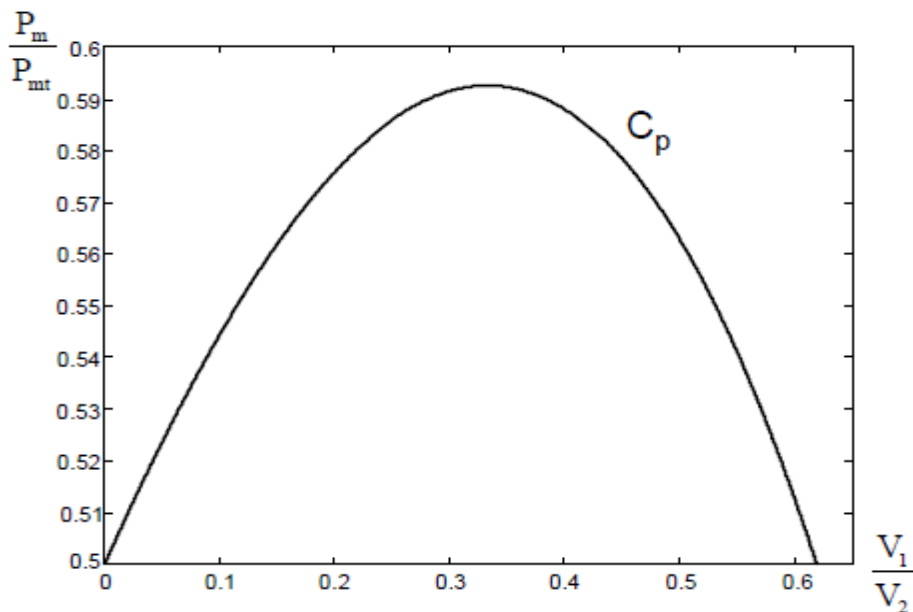


Figure 1.9 Coefficient de puissance [11]

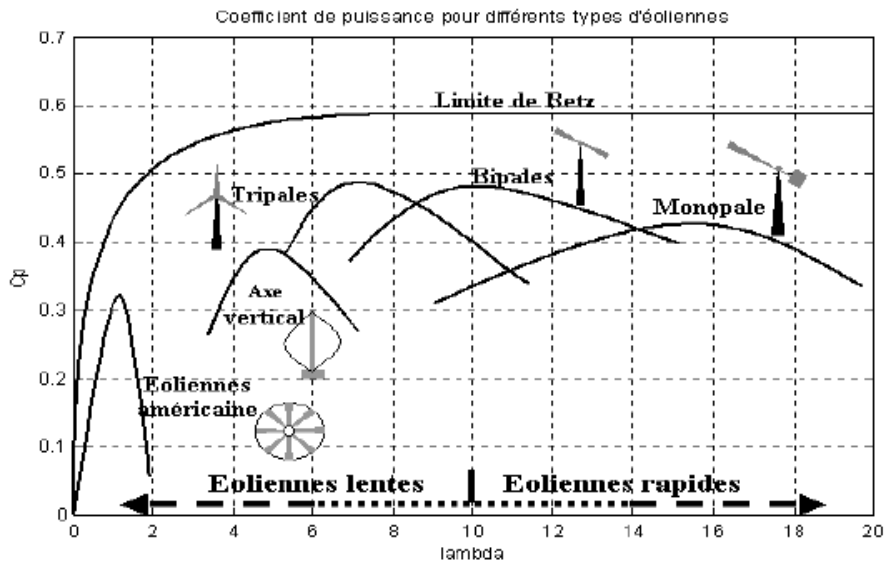


Figure 1.10 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [11].

1-2-2-3-7 Principe de la conversion de l'énergie

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion 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.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

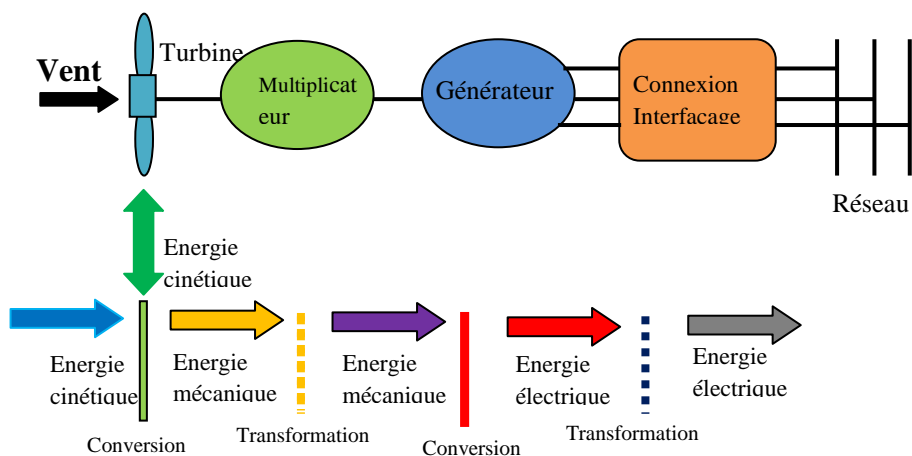


Figure 1.11 Principe de la conversion d'énergie [15]

1-2-2-3-8 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne

a) Descriptif d'une éolienne

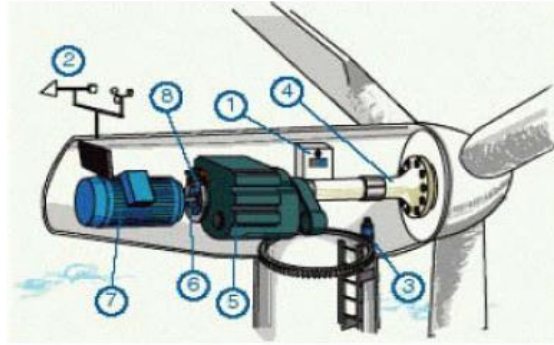


Figure 1.11 Elements constituant une éolienne[16]

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'automate (1), renseigné par l'anémomètre et la girouette (2) fixé au sommet de la nacelle, commande au moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent (4). Le multiplicateur (5) augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide (6). Celui-ci transmet le mouvement rotatif au générateur (7) qui produit l'électricité. Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant.

1-2-2-3-8 Accouplement mécanique

Selon le mode d'accouplement mécanique adapté, on distingue :

- les éoliennes à attaque directe ;
- les éoliennes à attaque indirecte.

a) Eolienne à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur de vitesse ; qui est le siège des pertes de puissance et source de bruit. Ce type de générateur doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min. Pour produire l'électricité avec ce type

de machine, il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50HZ [2].

Toutes les grandes machines à attaque directe sont équipées de machines synchrones multipolaires à aimant permanent.

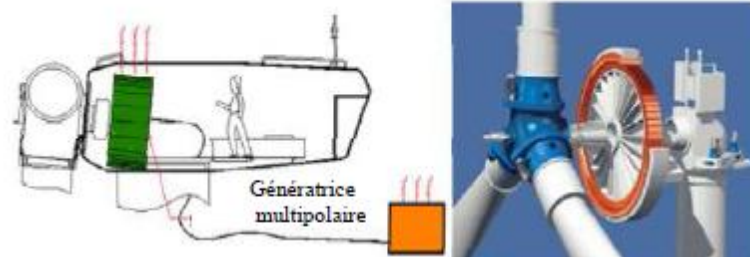


Figure 1.12 Eolienne à attaque directe [2]

b)-Eolienne à attaque indirecte

La vitesse de rotation de la turbine est relativement faible et le couple mécanique est élevé en sortie de l'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple mécanique et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances satisfaisantes ; c'est pourquoi on intercale un multiplicateur mécanique de vitesse à engrenage entre la turbine et la génératrice. Cette dernière est souvent une machine asynchrone à cage ou une machine asynchrone à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique.

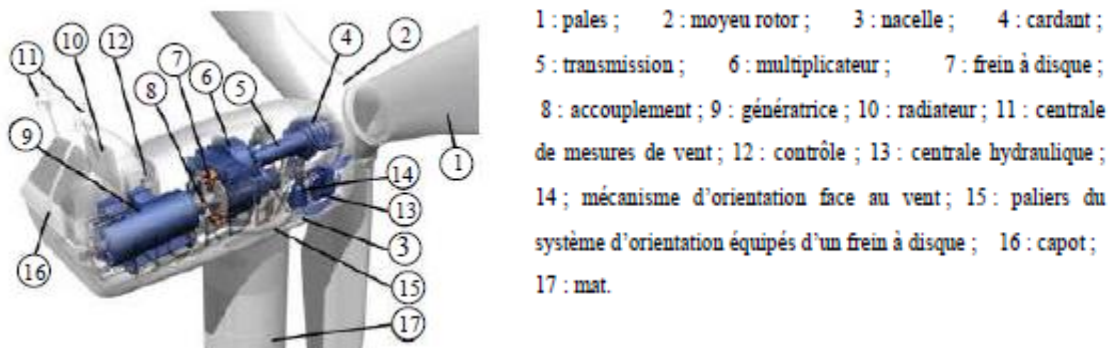


Figure 1.13 Eolienne avec multiplicateur[13]

1-2-2-3-9 Mode de régulation

La puissance éolienne captée par une aéroturbine est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il existe une vitesse de vent à partir de laquelle la puissance mécanique transmise par l'aéroturbine est supérieure à la puissance nominale de la machine électrique. Divers éléments de l'aéroénergétiseur sont dimensionnés en fonction de charge, vitesse de rotation et puissance ; correspondantes à cette vitesse du vent. Ces éléments ne peuvent pas supporter des valeurs de ces grandeurs supérieures à certaines limites. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aéroturbine lorsque le vent devient trop important.

Deux types de régulation existent permettant ainsi de limiter cette puissance.

a-) Système d'orientation des pales (pitch – régulation)

Le comportement aérodynamique de la turbine peut être contrôlé activement en modifiant l'angle de calage β appelé aussi « pas » des pales de la turbine autour de leur axe longitudinal.

Ce système permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse des vents pour maintenir une puissance sensiblement constante. Il permet également de freiner la turbine si nécessaire.

En agissant par le pitch control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ comme précédemment mais en fonction de la vitesse du vent à la vitesse de rotation constante, ce qui permet de maintenir la puissance constante dans la zone III à sa valeur maximale.

On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le pitch control dans un système de régulations automatiques de vitesse de rotation, on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique avec des servomoteurs, ce qui va permettre :

- le démarrage à une vitesse de vent V_d réduite ;
- la régulation de la vitesse angulaire de la turbine Ω_t pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale V_n ;
- l'optimisation du régime de conversion de l'énergie quand la vitesse du vent évolue entre V_d et V_n ;
- la protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ($> V_{max}$) par la mise en drapeau des pales sans nécessité d'un système puissant de freinage pour les arrêts d'urgences.

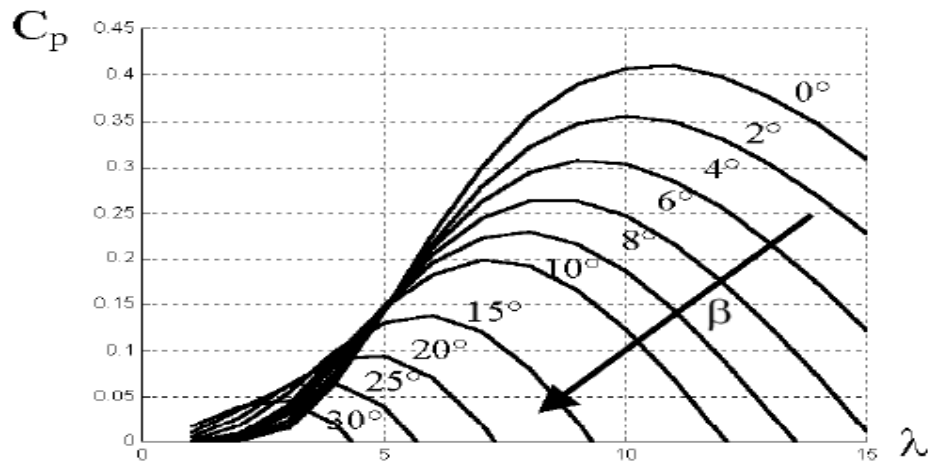


Figure 1.14 Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance[8]

b-) Système de décrochage aérodynamique(Stall –régulation)

La limitation de la puissance maximale de fonctionnement est assurée d'une manière passive par la géométrie de la pale. Cette solution se base sur le décrochage aérodynamique qui se produit pour des angles d'incidence importants. A partir d'une certaine vitesse du vent (proche de la vitesse nominale) et selon la puissance nominale désirée, ce décrochage entraîne une baisse de rendement aérodynamique du rotor. Dans ce cas l'angle de calage reste constant à une valeur fixée en fonction des caractéristiques du site. Se qui permet d'avoir un système simple et fiable [11].

Il existe des dispositifs mixtes, dites à décrochage actif, « stall actif » dans lesquels un très faible réglage de l'angle de calage associé à un profil de pale optimisé permet d'obtenir un compromis entre complexité du système de réglage et qualité de la courbe de puissance obtenue. Ainsi, l'éolienne fonctionne sur une plage plus large de vitesse.

Le système de régulation par décrochage aérodynamique a l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles sans le rotor.

1-2-2-3-10 Chaîne de conversion électromécanique

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne vers l'énergie électrique comprend plusieurs organes de conversion mais le concept technologique à axe horizontal à trois pales constitue l'éolienne moderne la plus utilisée à cause de ses avantages liés aux points suivants :

- ✓ couple de démarrage important et bruit faible par rapport à l'éolienne unie et bipales ;
- ✓ peu de fluctuations mécaniques ;
- ✓ rendement énergétiques plus élevé ;
- ✓ puissances électriques moins fluctuantes.

a) Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto-amorcée par condensateurs.

Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associés via un convertisseur électronique. Les inconvénients principaux de ce type de chaîne

sont dus à la rigidité. (vitesse faiblement variable par glissement de la GAS), l'absence d'optimisation de puissance et la nécessité d'un multiplicateur de vitesse [2].

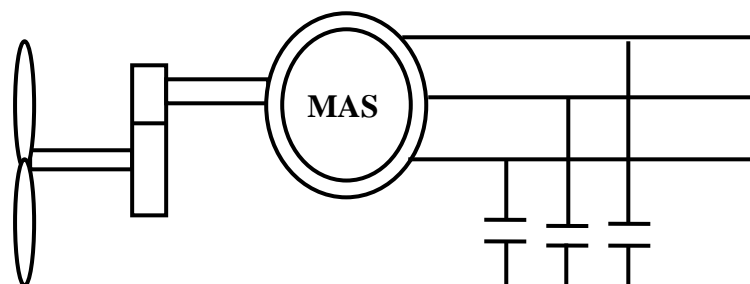


Figure 1.15 Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

b) Système couplé au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [14].

b-1) Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances (au delà de 100KW), que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau. Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplés au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt.

Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau [17,18 , 11].

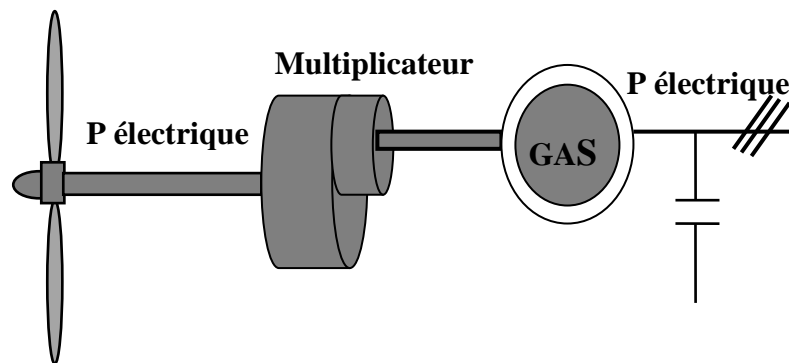


Figure 1.16 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le

réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine. Et ainsi de faire fonctionner

l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant (voir la figure 1.17).

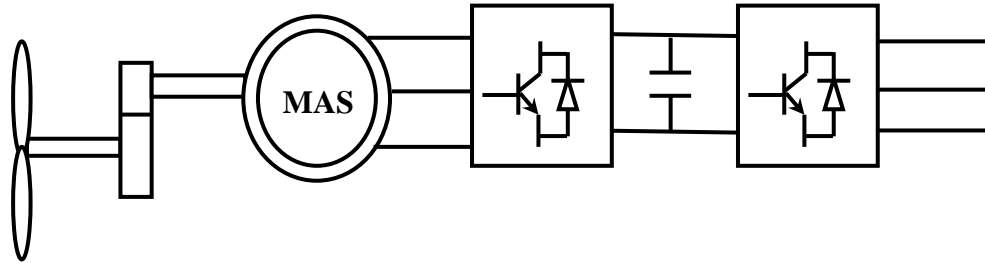


Figure 1.17 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

b-2) Machine synchrone

Dans la machine synchrone, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Ce type de machines permettent de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plus part des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

Les machines synchrones sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanent dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard aux génératrices discoïdes, ou encore à rotor extérieur [34].

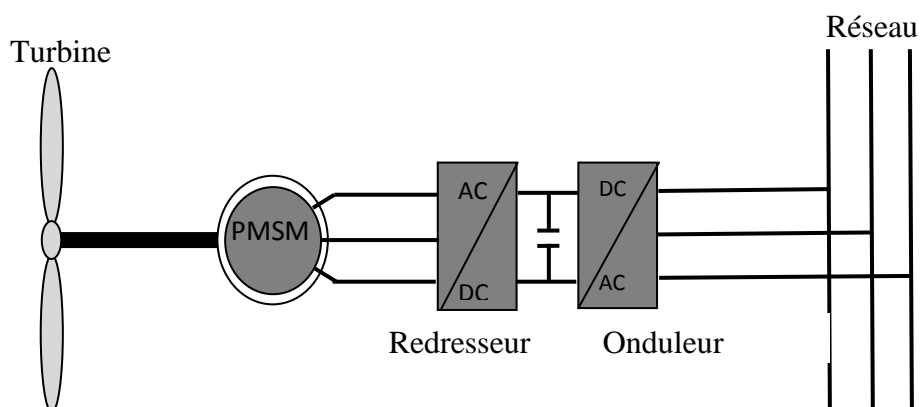


Figure 1.18 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent

b-3) Machine asynchrone à double alimentation

Les machines asynchrone à double alimentation sont un peu plus complexe que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur les perspectives d'offre d'énergie, la génération des énergies renouvelables et en particulier l'énergie éolienne. Ainsi, la description de l'éolienne, ces éléments constitutifs, ces différents types et les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable).

Le contrôle au niveau de la génératrice et transmission au réseau nous offre deux structures essentielles (entraînement à vitesse fixe et variable). Les entraînements à vitesse fixes ont tendance à disparaître devant les structures à vitesses variables.

Aujourd'hui, la tendance va vers des structures entièrement interfacées avec ou sans multiplicateur de vitesse suivant le type de machine. Ce qui a l'avantage de pouvoir optimiser au mieux la production d'énergie.

Enfin, nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique comportant les différents types de machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs ainsi que leurs avantages et inconvénients.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME ÉOLIEN

(TURBINE, MACHINE ASYNCHRONE À

DOUBLE ALIMENTATION)

2-1 Introduction

La machine asynchrone très appréciée dans les applications industrielles pour sa grande robustesse électromécanique et son faible coût, requiert des structures de contrôles scientifiques et complexes, qui sont utilisées dans des systèmes d'entraînement à vitesses variables performants.

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à hautes puissances et à vitesse variable [23].

Dans le domaine de commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [24], les techniques de commande classiques de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse au cours de temps, ses applications seront efficaces.

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure 2.1).

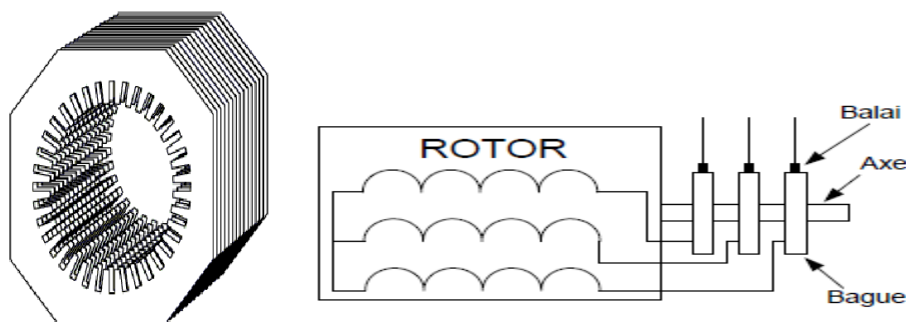


Figure 2.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.



Figure 2.2 Machine à induction à rotor bobiné [26]

2-2 Modélisation de la vitesse du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion de l'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent [3].

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. La mesure exacte du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par les paramètres statistiques.

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme:

$$v_{vent}(t) = v_0 + A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2.1)$$

Avec :

v_0 : est la composante moyenne ;

$A_i(t), \omega_i(t)$ et $\varphi_i(t)$: sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

La simulation du profil du vent est représentée sur la figure suivante :

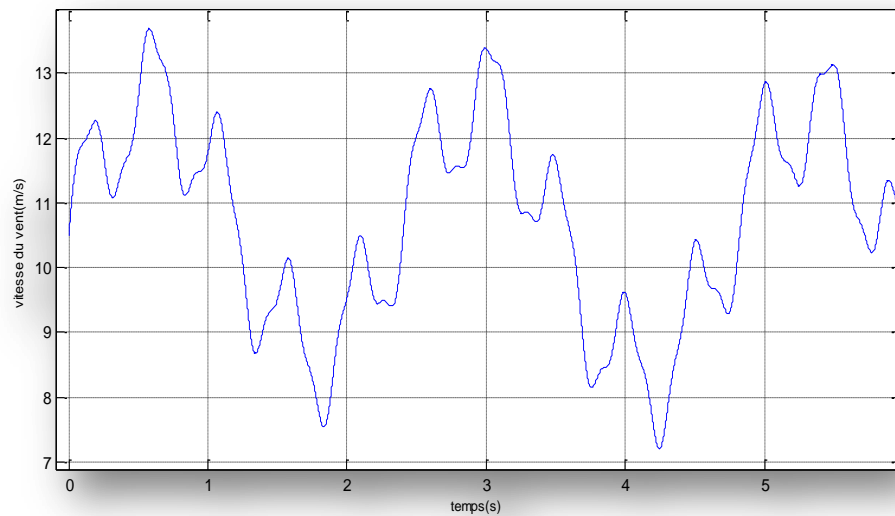


Figure 2.3 Evolution de la vitesse du vent

2-3 Modélisation de la turbine

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain G .

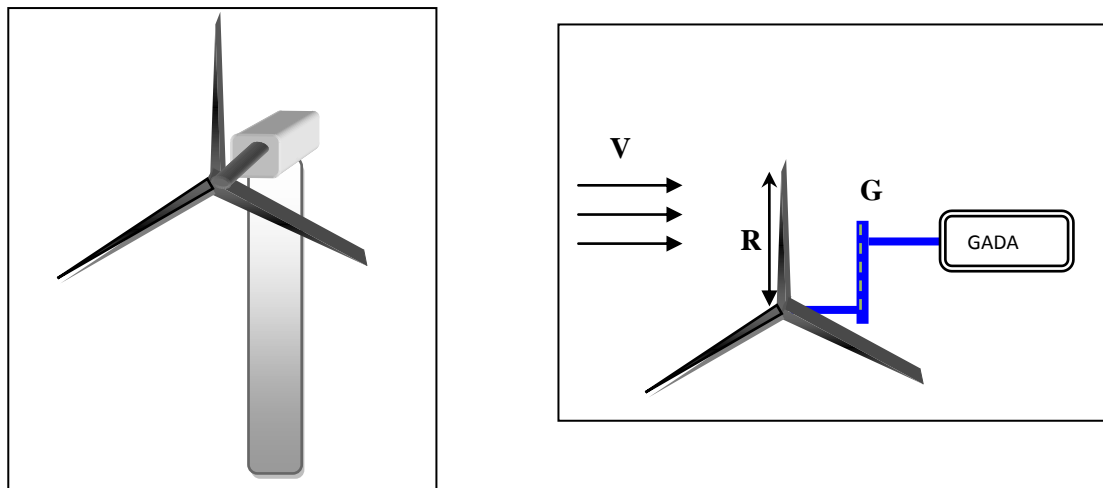


Figure 2.4 Schéma de la turbine éolienne

2-3-1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientales et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . ce multiplicateur entraine une génératrice électrique (figure 2.5).

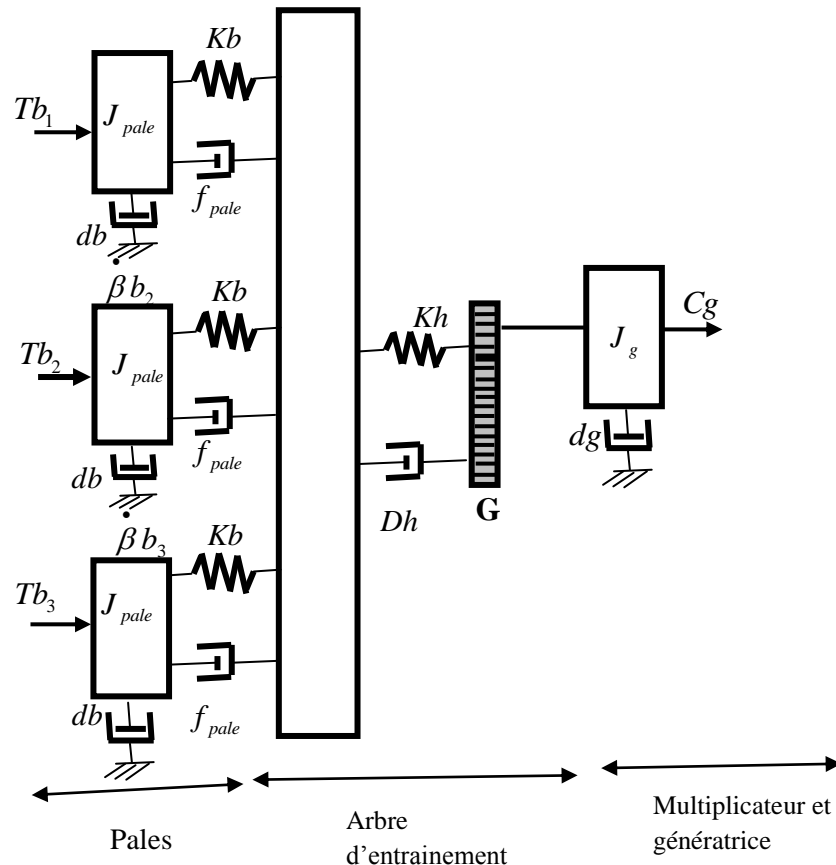


Figure 2.5 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J ;
- la même élasticité k_b ;
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b .

Ces pales sont orientales et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support p_{pale} , les vitesses d'orientations de chaque pôle sont notées : $\dot{\beta}_{b1} \dot{\beta}_{b2} \dot{\beta}_{b3}$.

Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

Son inertie J_h

Son élasticité K_h

Son coefficient de frottement possède :

Une inertie J_g

Un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînement (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc égalité de toute les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques, de part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré.

De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure 2.6), dont la validité (par rapport au modèle complet) à déjà été vérifiée [8].

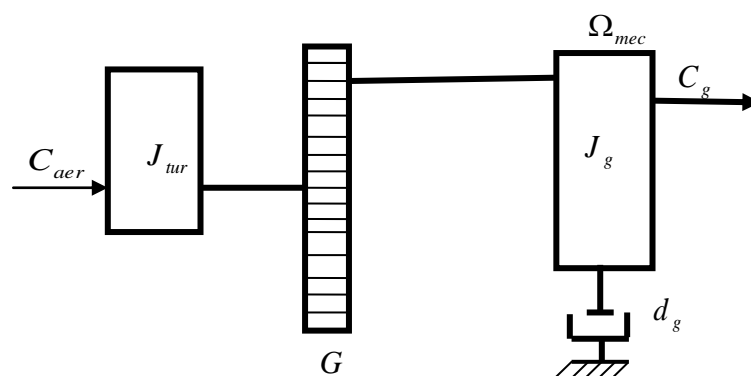


Figure 2.6 Modèle mécanique simplifié de la turbine

2-3-2 Modélisation de la turbine

Le dispositif qui est étudié est composé d'une aéro turbine comprend des pales de longueur R qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur (G) de vitesse qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

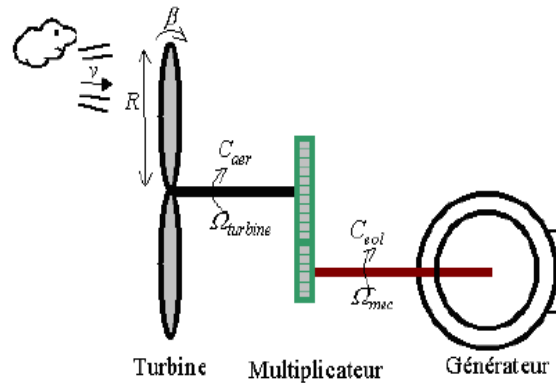


Figure 2.7 Schéma de la turbine éolienne [8].

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.2)$$

Où ρ : est la densité de l'air.

S : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du centre est déterminé par la longueur de la pale.

v : est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_P P_v = C_P(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S v^3}{2} \quad (2.3)$$

Où λ le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (R0)$$

L'expression du coefficient de puissance est donnée par l'équation suivante :

$$C_p = 0,22 \cdot \left(\frac{116}{\Gamma} - 0,4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{12,5}{\Gamma} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{Avec } \Gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.5)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé donc directement par :

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (R1)$$

2-3-3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (R2)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (R3)$$

2-3-4 Equation dynamique de l'arbre

L'équation de l'inertie totale J qui est constitué de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de génératrice et de l'inertie de la génératrice est donnée comme suit :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G} + J_g \quad (2.6)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ($C_{méc}$) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \tag{R4}$$

Où J est l'inertie total qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{R5}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient des frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \Omega_{méc} \tag{R6}$$

C_{aer} Tenant compte de toutes les équations présentées en dessus, on obtient le schéma suivant :

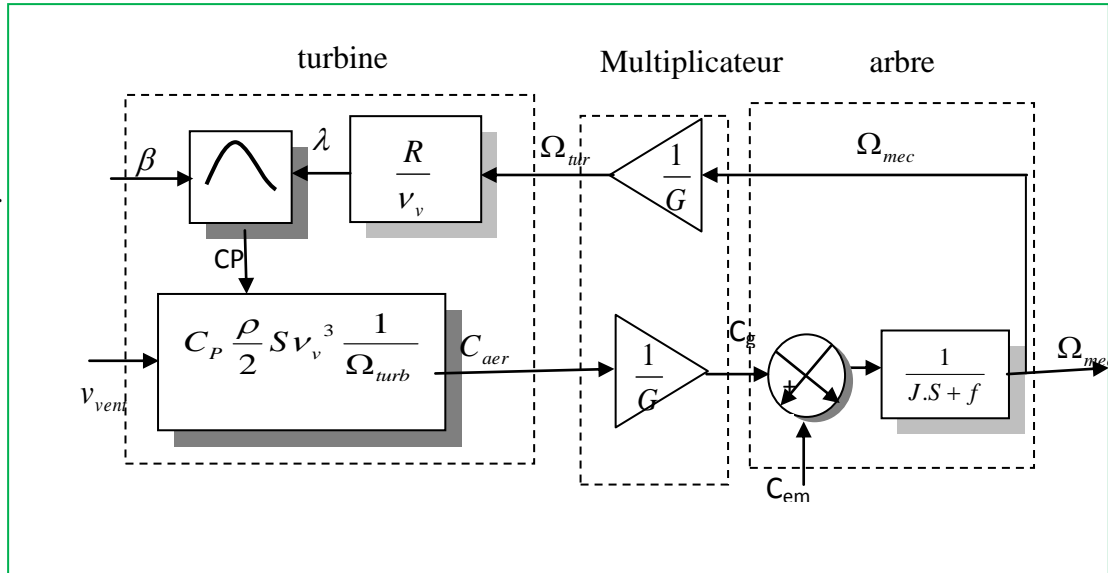


Figure 2.8 Schéma bloc du modèle de la turbine

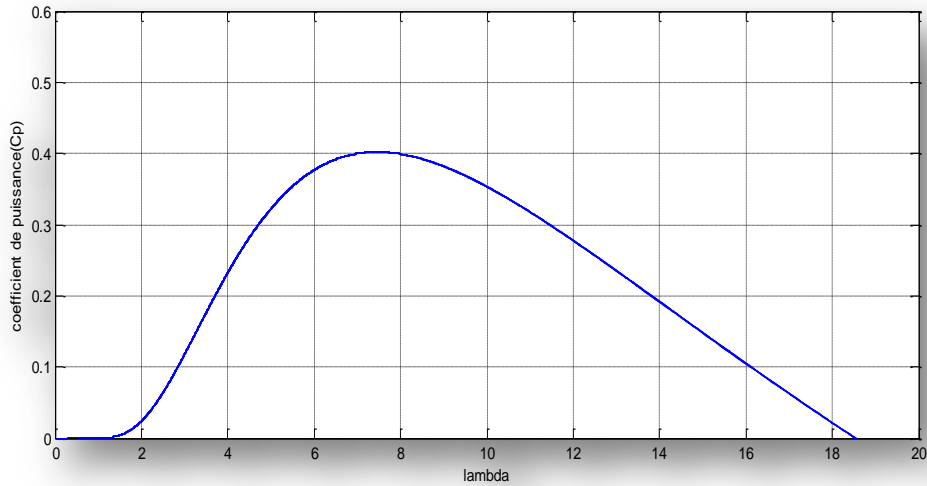


Figure 2.9 La caractéristique du Cp de la turbine

La valeur du coefficient de puissance (C_p) dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne λ et de l'angle de l'orientation de la pale β comme le montre la figure suivante :

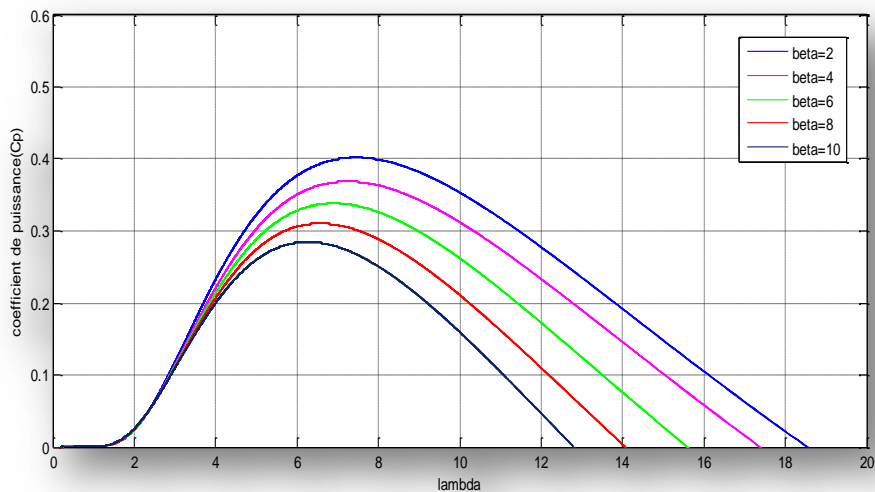


Figure 2.10 coefficient aérodynamique en fonction de la vitesse relative de la turbine (λ).

Sur la figure 2.10 plusieurs courbes sont représentées mais nous nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda=7,5$, $C_p=0,402$, $\beta=2^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc le maximum de puissance mécanique.

On peut déterminer la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation.

Pour différentes valeurs du vent, la puissance mécanique évolue en fonction de la vitesse mécanique comme la montre la figure 2.11.

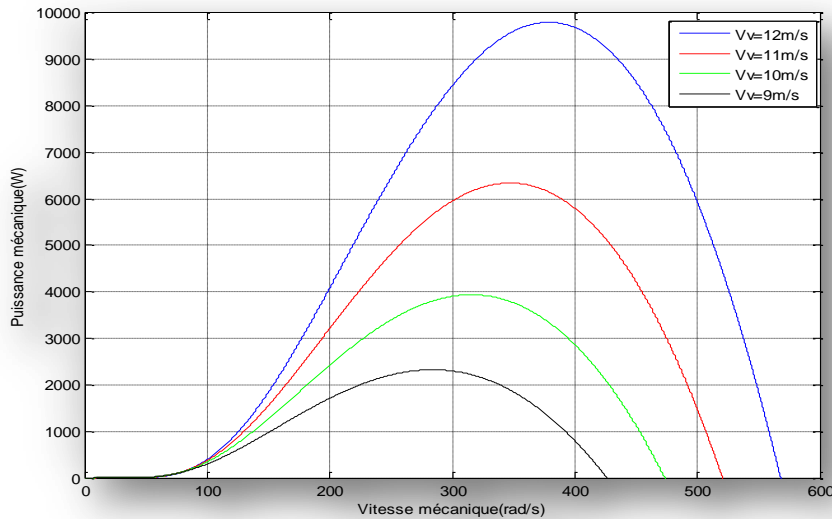


Figure 211 Evolution de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique

2-3-5 Stratégies de commande de la turbine éolienne

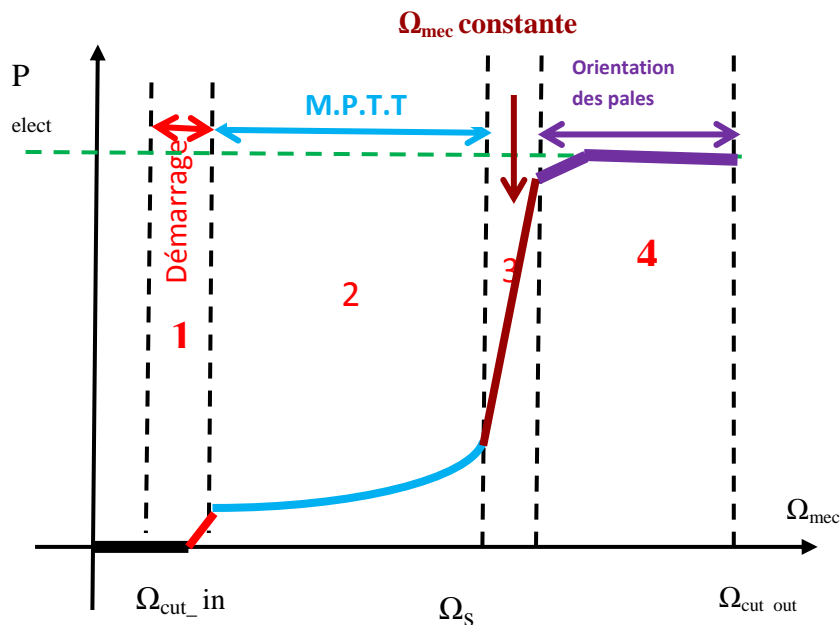


Figure 2.12 Caractéristique puissance –vitesse de l'éolienne

Il y a quatre phases de fonctionnement (zones d'une éolienne intégrant une MADA) :

-la phase (zone 01) de démarrage de la machine. La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environs 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.

- la phase zone(02) : c'est la phase d'extraction de la puissance maximale ou la phase MPPT (Maximum Power Tracking). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement.

- Dans cette zone, l'angle de calage des pales β reste constante à sa valeur minimale ($\beta=2^\circ$) afin d'obtenir un CP maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses du vent moyen (7- 13 m/s environ).

- la phase à vitesse mécanique quasi-constante (zone 03). L'angle β de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs du vent, c'est le pitch control. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.

- la phase à puissance constante (zone04). Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante risque d'endommager l'éolienne l'angle de calage des pales se fixe à 90° .

C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

2-4 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

2-4-1 Principe général

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante, ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance [8].

Nous supposons que la génératrice et son variateur sont idéaux :

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (2.7)$$

La vitesse est influencée par l'application de trois couples :

Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est pas plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f\Omega_{mec} - C_{em}) \quad (2.8)$$

$$C_{em} - ref = Cass(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.9)$$

Où :

$C_{ass}(s)$: c'est le régulateur de vitesse.

$$\Omega_{ref} = G\Omega_{turbine-ref} \quad (2.10)$$

Ω_{ref} : C'est la vitesse mécanique de référence.

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale de la vitesse relative (à β constant=2°).

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{cpmax} \cdot v_{vent}}{R} \quad (2.11)$$

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

-il doit assurer la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

-il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

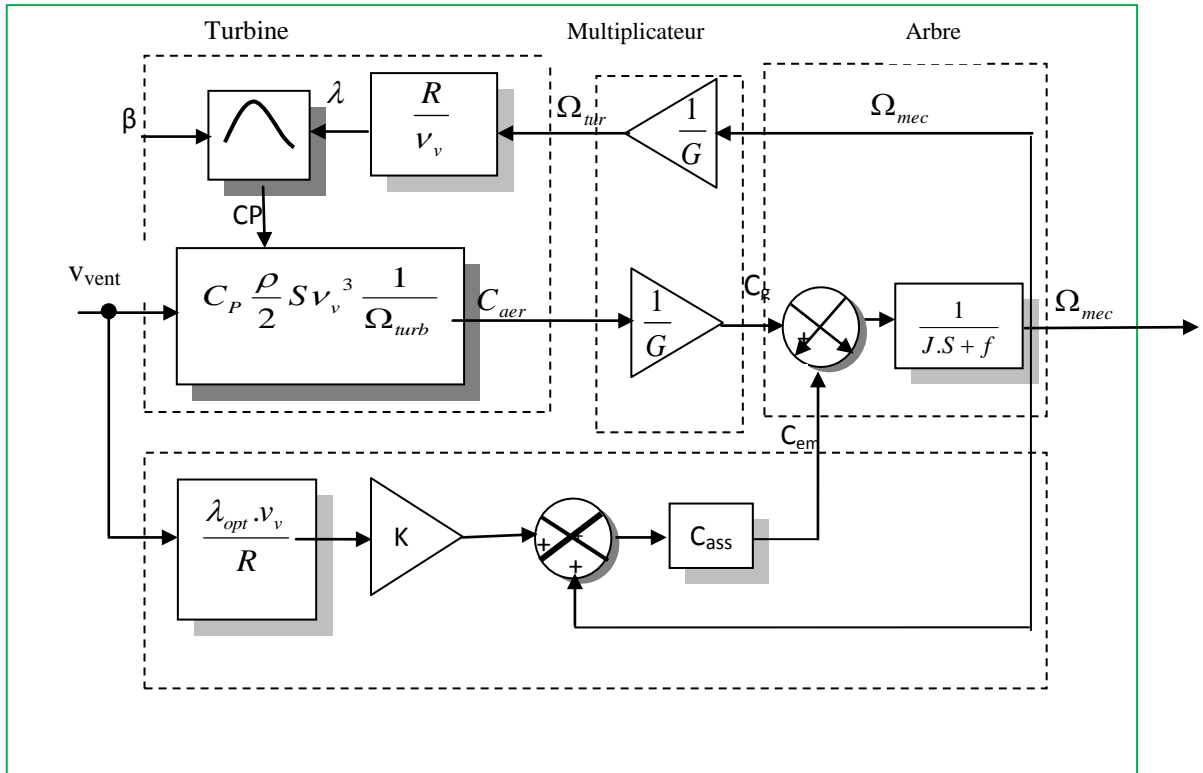


Figure 2.13 Schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.

2-4-2 Correcteur de vitesse de la turbine

$$C_{em-ref} = \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.12)$$

K_p : Gain proportionnel et K_i : gain intégral, sont les paramètres du correcteur à déterminer.

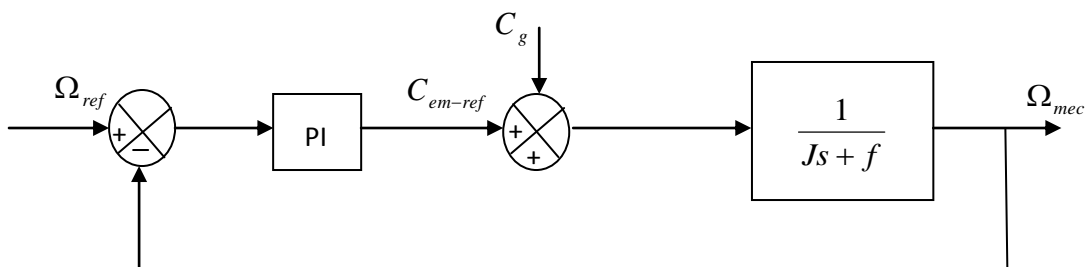


Figure 2.14 Schéma bloc du correcteur PI

La fonction de transfert en boucle fermée se met sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{ref} + P(s) \cdot C_g \quad (2.13)$$

$F(s)$: La fonction de transfert de la référence sur la vitesse.

$$F(s) = \frac{K_p S + K_i}{J S^2 + (f + K_p) S + K_i} \quad (2.14)$$

$$G(s) = \frac{S}{J S^2 + (f + K_p) S + K_i} \quad (2.15)$$

Il est donc nécessaire d'augmenter le paramètre K_i pour atténuer l'action du couple éolien (C_g).

La pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \quad (2.16)$$

$$\xi = \frac{f + K_p}{K_i} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (2.17)$$

Pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement donné, on a :

$$K_i = \omega_n^2 \cdot J \quad (2.18)$$

Les résultats de simulation du modèle sous **MATLAB-SIMULINK** avec la structure de commande avec asservissement de vitesse montrent que les résultats prennent l'allure du vent appliqué, le coefficient de puissance est de 0.4 (c'est la valeur maximale pour avoir un maximum de puissance extraite du vent), la vitesse de la MADA est l'image du vent entraînant l'éolienne, elle suit convenablement sa référence.

2-5 Résultats de simulation de la MPPT par PI classique

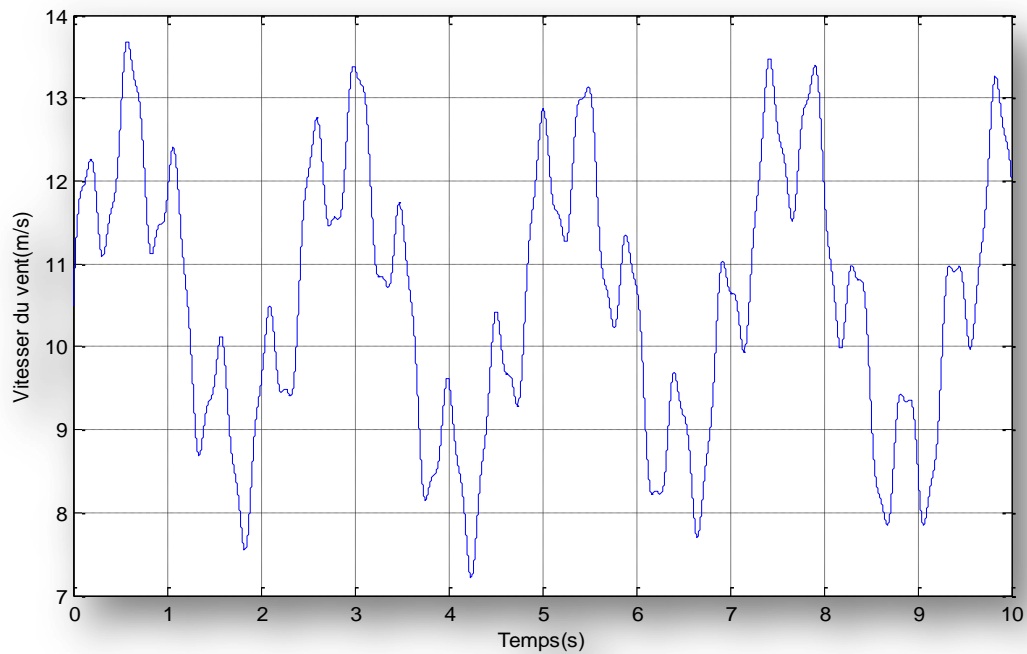


Figure 2.15 Profil du vent appliqué au système éolien

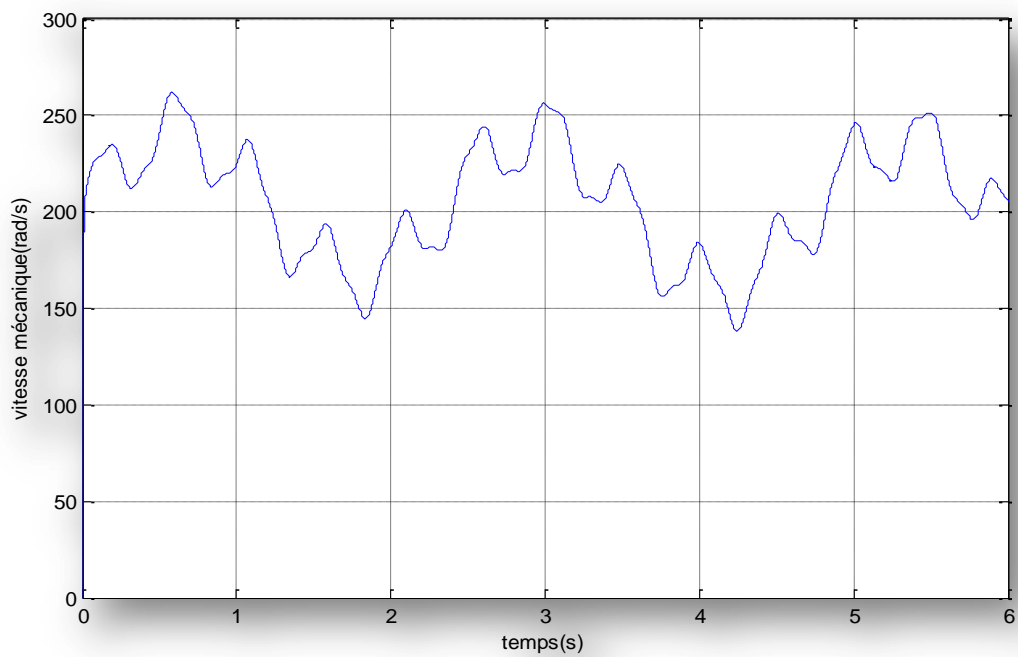


Figure 2.16 Vitesse mécanique de l'arbre de transmission

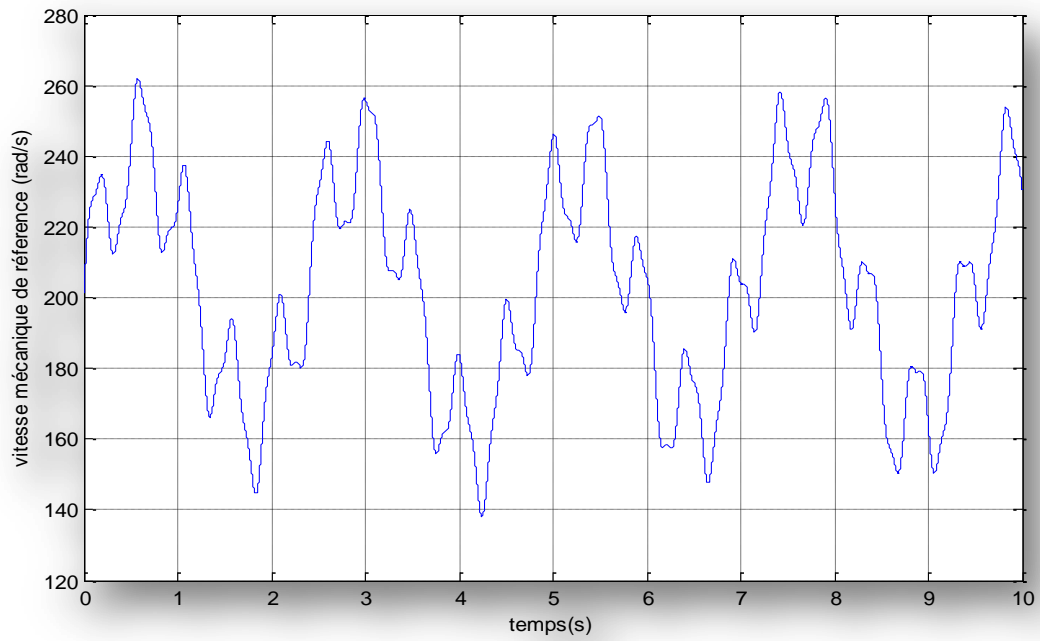


Figure 2.17 Evolution de la vitesse de référence

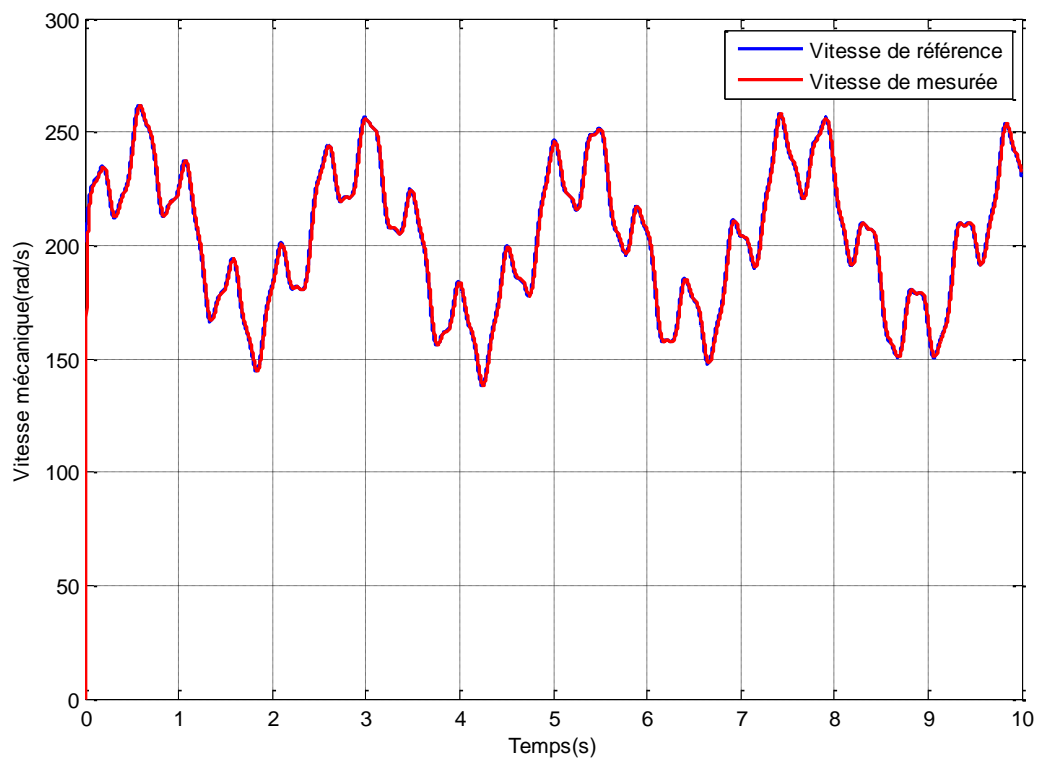


Figure 2.18 Evolution de la vitesse de rotation mécanique et sa référence

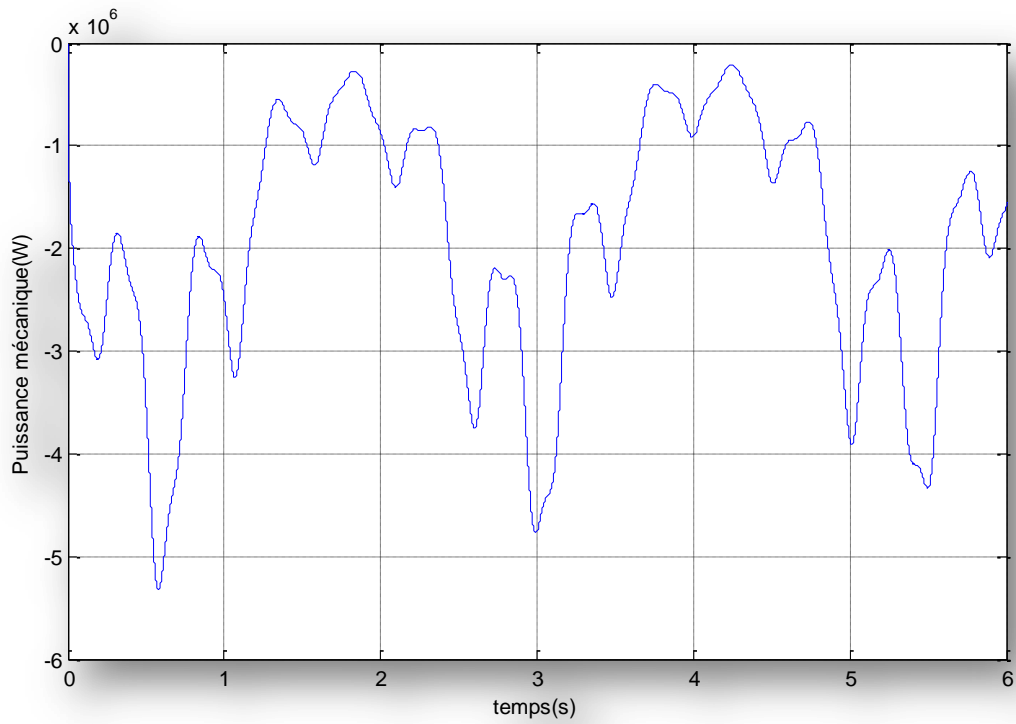


Figure 2.19 Evolution de la puissance mécanique

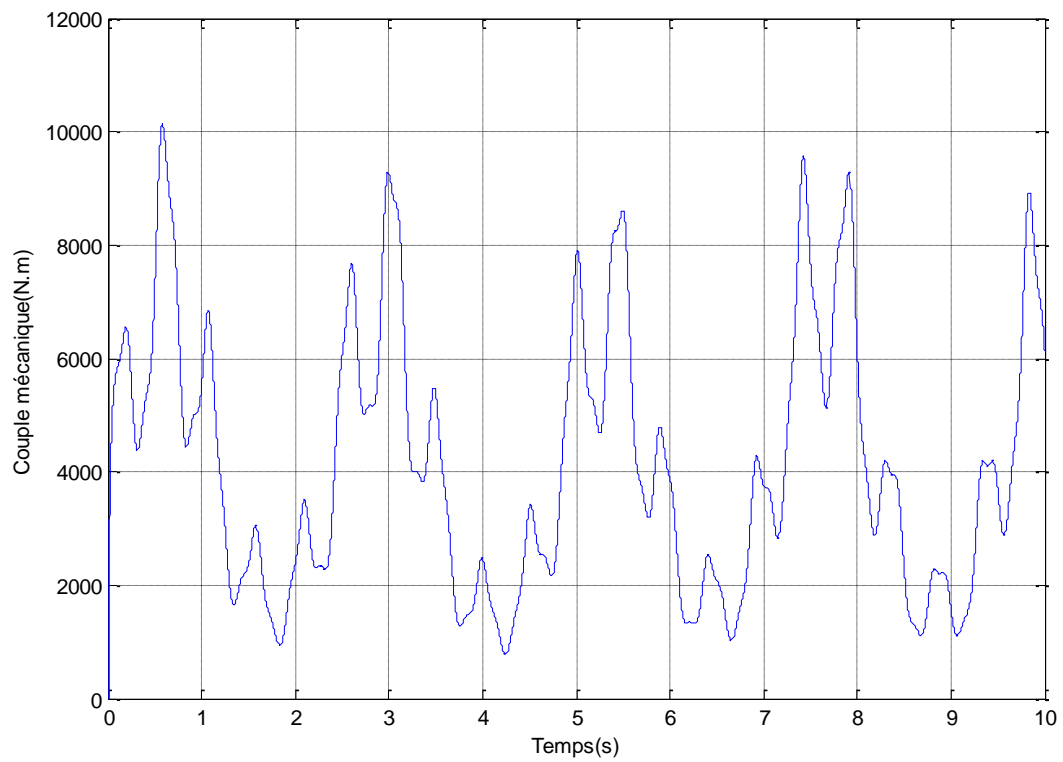


Figure 2.20 Couple mécanique transmis à l'arbre de la génératrice

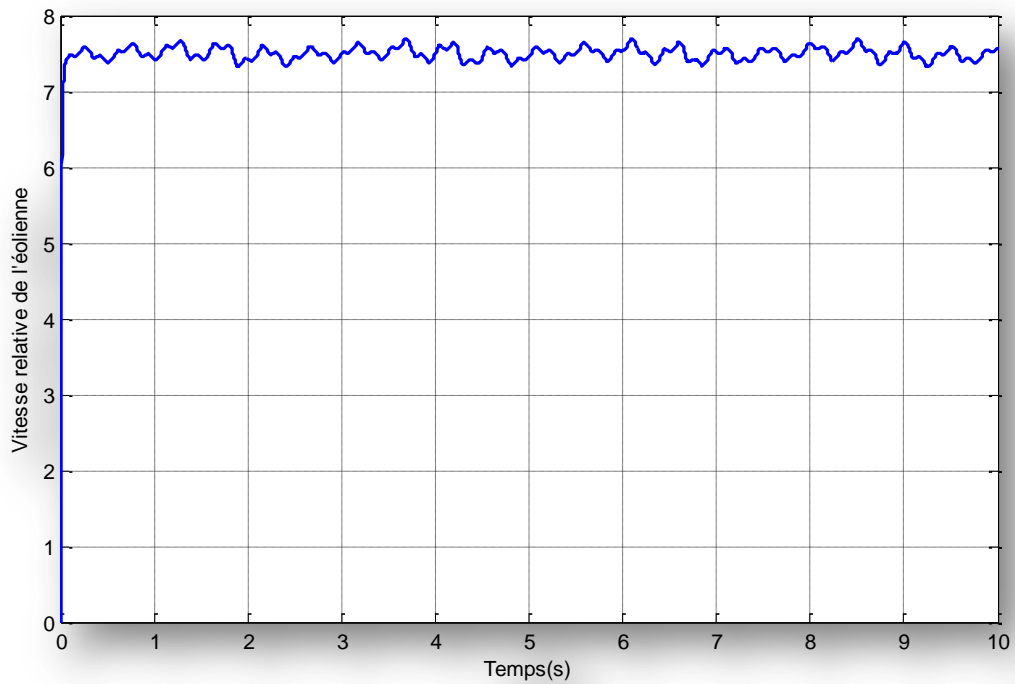


Figure 2.21 Evolution de la vitesse relative de l'éolienne

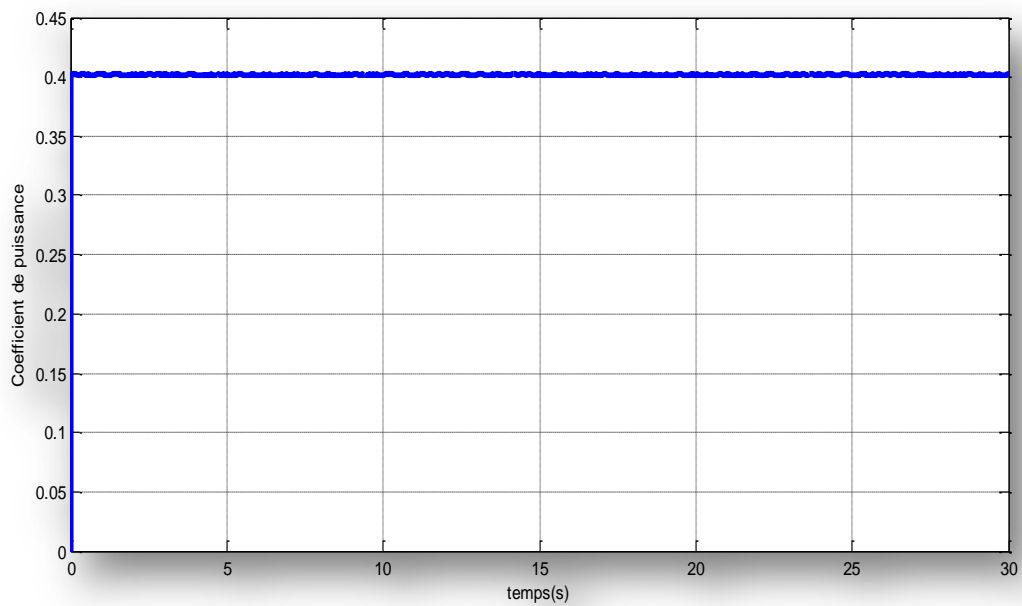


Figure 2.22 Allure du C_p en fonction du temps

2-6 Structure des machines asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné et doublement alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne.

Un intérêt croissant est accordé à la machine asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons :

- Un plus grand nombre de degré de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques ;
- Une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures ;
- Une possibilité de réglage de la répartition des puissances statoriques et rotoriques pour optimiser les dimensions des convertisseurs ;
- Un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal ;
- La possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statoriques et rotoriques de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tensions résistives.
- La production de la puissance ce fait quelle que soit la vitesse de rotation de la machine (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement est possible en hyper synchrone.

Cette machine s'envisage pour des puissances élevées ($> 1 \text{ M W}$) où elle s'avère être une concurrente de la machine asynchrone à cage.

2-7- Différents modes de fonctionnement

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire** ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence f_r égale à celle du stator. Dans ce cas là la MADA se comporte comme un transformateur.

- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse croît, plus la fréquence f_r décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ($g=0$) dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent, la fréquence f_r du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hyper synchrone** ($g < 0$) par d'avantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence f_r devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse .

2-8 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, 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 impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotoriques de la machine, notamment en connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper d'énergie rotoriques dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotoriques et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau. Le rendement de la machine et ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo synchrone [11].

2-8-1 Fonctionnement en mode moteur

2-8-1-1 Moteur hypo synchrone

Le fonctionnement en mode hypo synchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme Ω_s à une vitesse plus faible Ω_{min} . Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor est renvoyée sur le réseau.

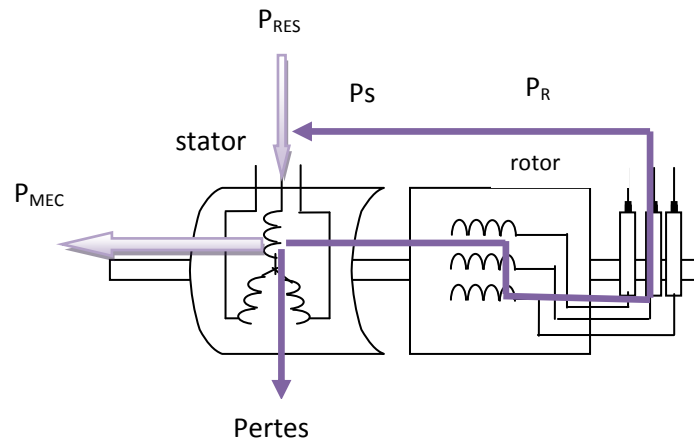


Figure 2.23 Fonctionnement moteur hypo synchronisme.

2-8-1-2 Moteur hyper synchrone

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 cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor.

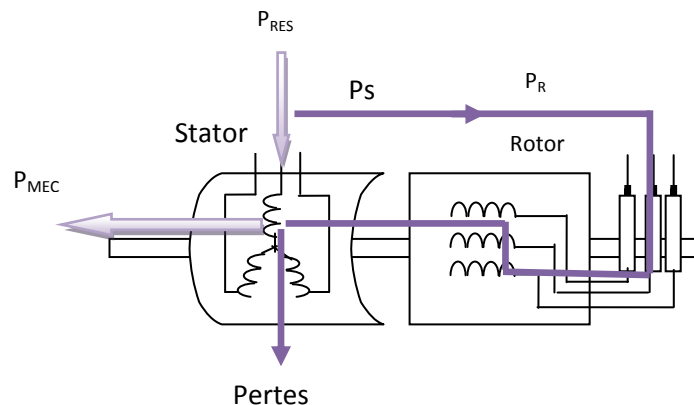


Figure 2.24 Fonctionnement moteur hyper synchronisme.

Ainsi, pour le cas de l'application moteur de la MADA, il existe plusieurs configurations de fonctionnement :

1)-Première configuration : stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette variante est un fonctionnement en moteur comme le montre la figure 2.21. En effet le stator est lié au réseau triphasé et un onduleur est relié au rotor.

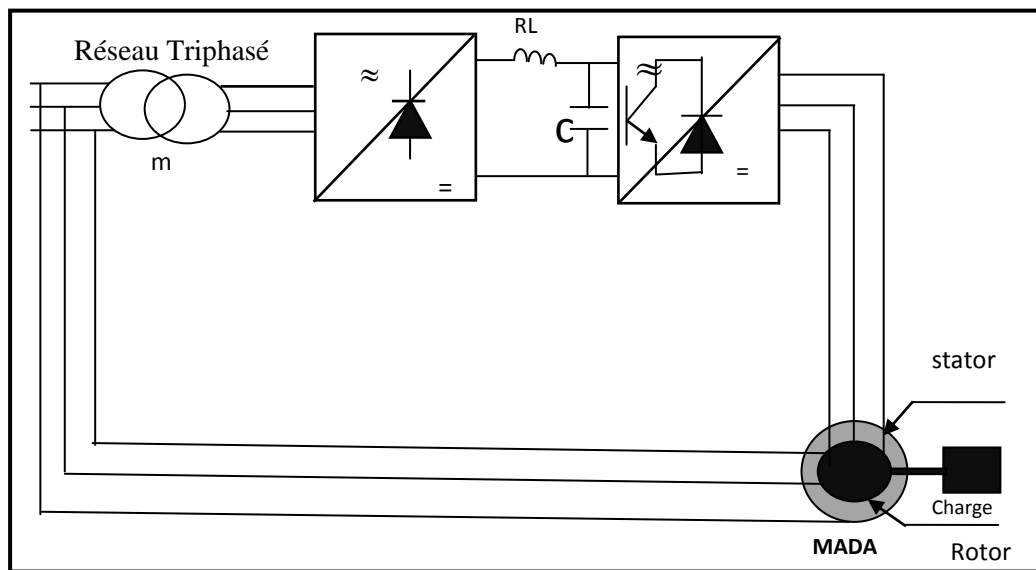


Figure 2.25 Machine utilisée en moteur avec un convertisseur statique

1)-Deuxième configuration : Structure à base de cycloconvertisseur

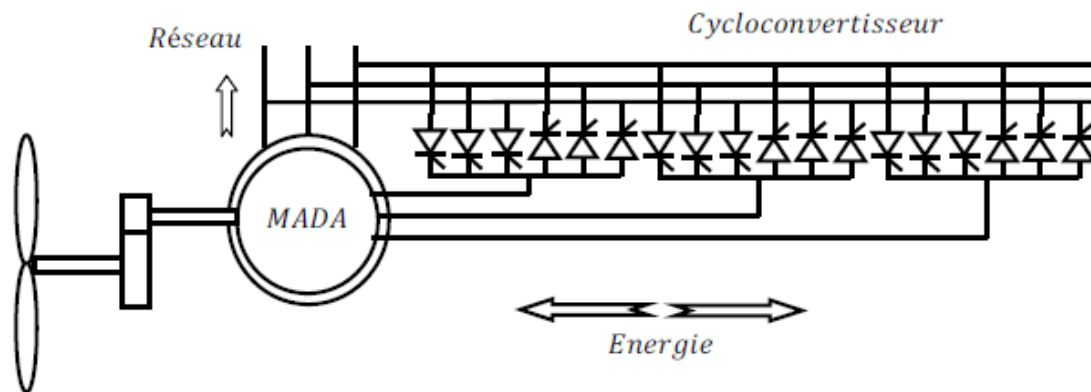


Figure2.26 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Ce montage est aussi connu sous la dénomination « topologie statique de Scherbius ». Dans cette configuration, le principe de Scherbius est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur.

3-Troisième configuration : MADA alimentée par convertisseurs indépendants

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs en parallèle par un redresseur commun comme représentés sur la figure (2.27)
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs comme représenté à la figure (2.28)

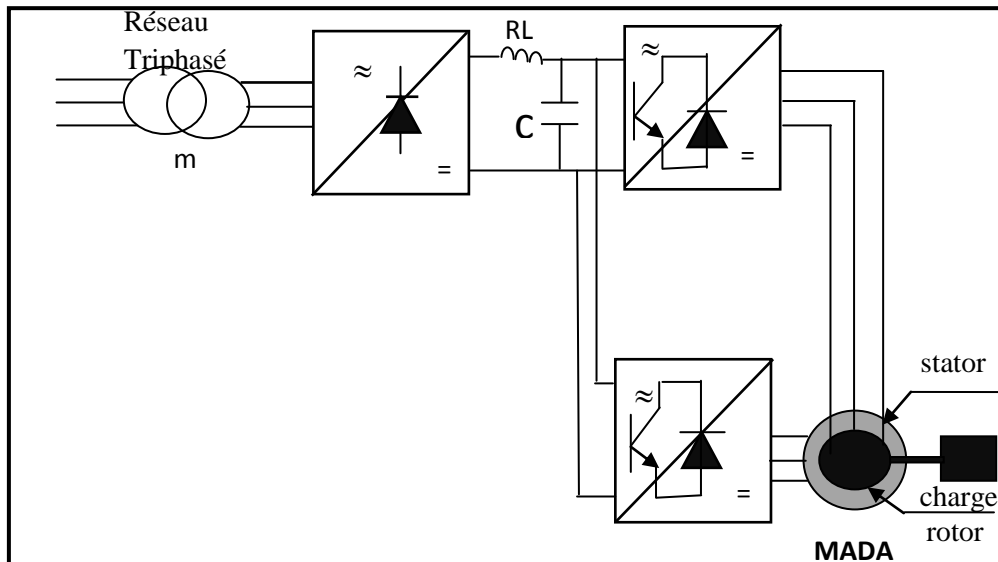


Figure 2.27 Alimentation de la MADA avec un onduleur et un bus continu commun

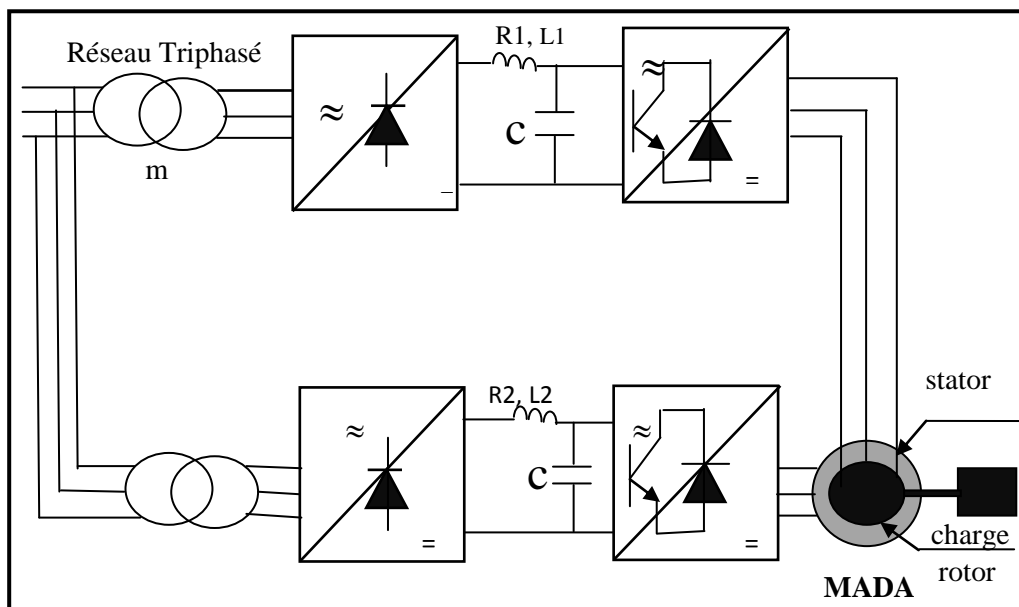


Figure 2.28 Alimentation de la MADA par deux onduleurs avec deux bus continus indépendants.

2-8-2 Fonctionnement en mode génératrice

2-8-2-1 Génératrice hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement comme la montre la figure suivante la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g_{p_{mec}})$ est injectée au réseau via le rotor.

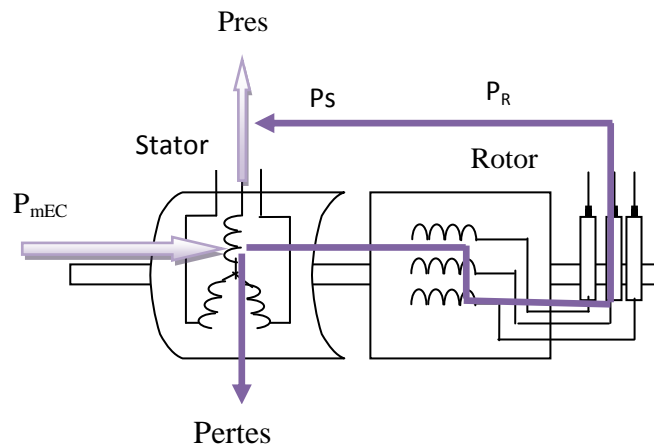


Figure 2.29 Fonctionnement génératrice hyper synchronisme

2-8-2 -2 Génératrice hypo synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement génératrice au dessous de la vitesse de synchronisme.

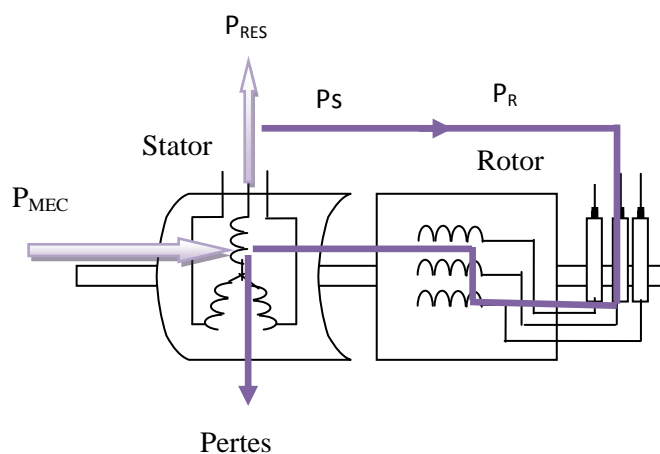


Figure 2.30 Fonctionnement génératrice hypo synchronisme

2-9 Modélisation de la machine Asynchrone à Double Alimentation

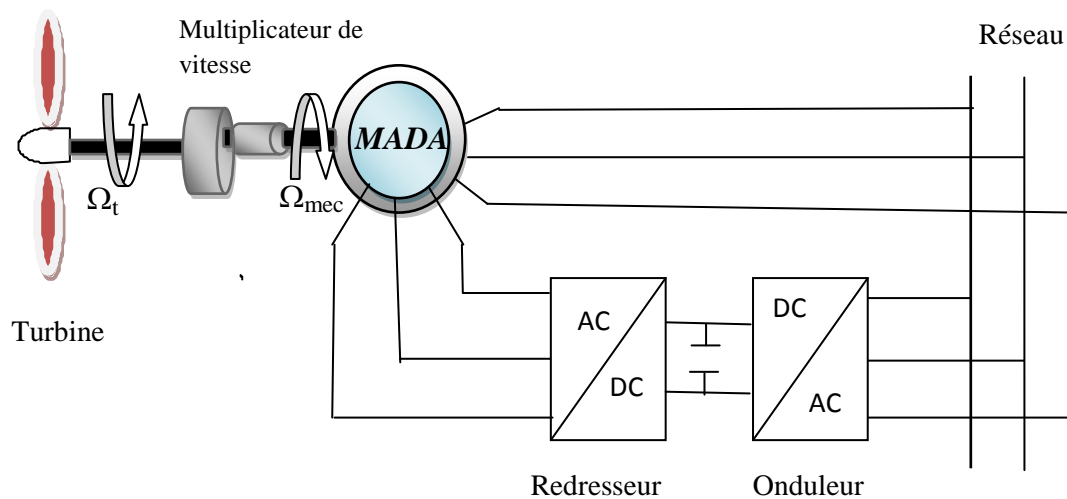


Figure 2.31 Schéma de Modélisation de la GADA

2-9-1 Hypothèses simplificatrices

A cause des phénomènes électromagnétiques, thermiques et mécaniques complexes de la machine asynchrone on suppose lors de la modélisation de la MADA que :

- le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ;
- les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont fonction de l'angle que font leurs axes magnétiques ;
- distribution spatiale sinusoïdale de la force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor ;
- la densité du courant est uniforme dans la section des inducteurs (on a négligé l'effet de peau) ;
- les résistances ne varient pas avec la température.

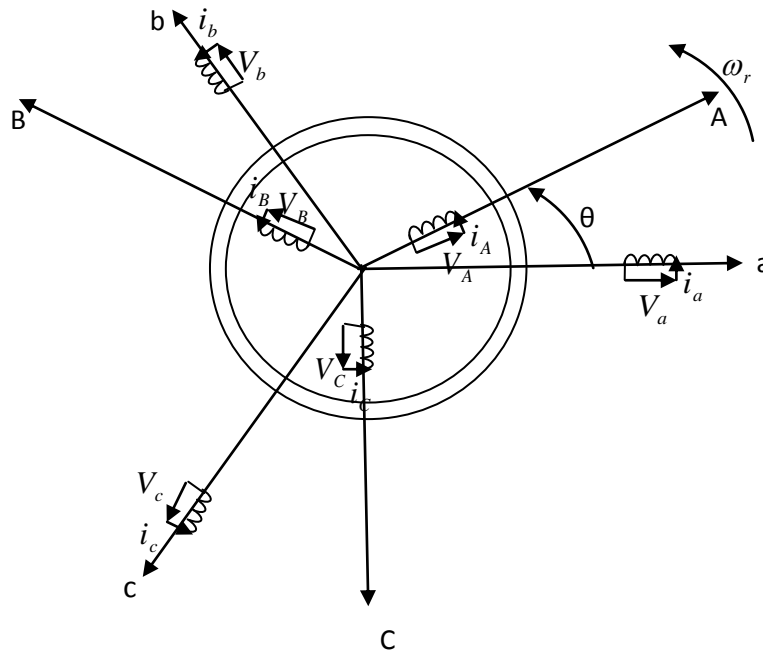


Figure 2.32 Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation

2-9-2 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de PARK

La transformation de PARK définie par la matrice de rotation $P(\theta)$ permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a, b, c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d, q, o) . La produit matriciel définissant la transformation de PARK est exprimée par :

$$[X]_{dqo} = P(\theta)[X]_{abc} \quad 2.19$$

$$\text{Avec } [X]_{dqo} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad ; [X]_{abc} = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Tel que

d, q, o : sont respectivement indice des composantes direct, quadratique et homopolaire.

θ : représente l'angle de transformation, elle dépend du choix du référentiel ainsi que des grandeurs statoriques et rotoriques.

La matrice de changement de base de Park directe est donnée par :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad 2.20$$

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$[X]_{abc} = p^{-1}(\theta)[X]_{dqo} \quad 2.21$$

Où :

$$p^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad 2.22$$

Pour un système équilibré la composante homopolaire est nulle, et en appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu après calcul, il est représenté sous la forme suivante [7] :

➤ **Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad 2.23$$

Avec

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad 2.24$$

➤ **Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad 2.25$$

➤ **Equation mécanique**

D'après la relation fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad 2.26$$

➤ **Couple électromagnétique**

$$C_{em} = P \cdot (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad 2.27$$

2-10 Résultats de simulation

Les résultats de la simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle de la MADA basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan(d,q)) liée au champ tournant sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1.5MW, alimentée directement par deux sources de tensions triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau de 50 Hz et d'amplitude 690V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 20V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

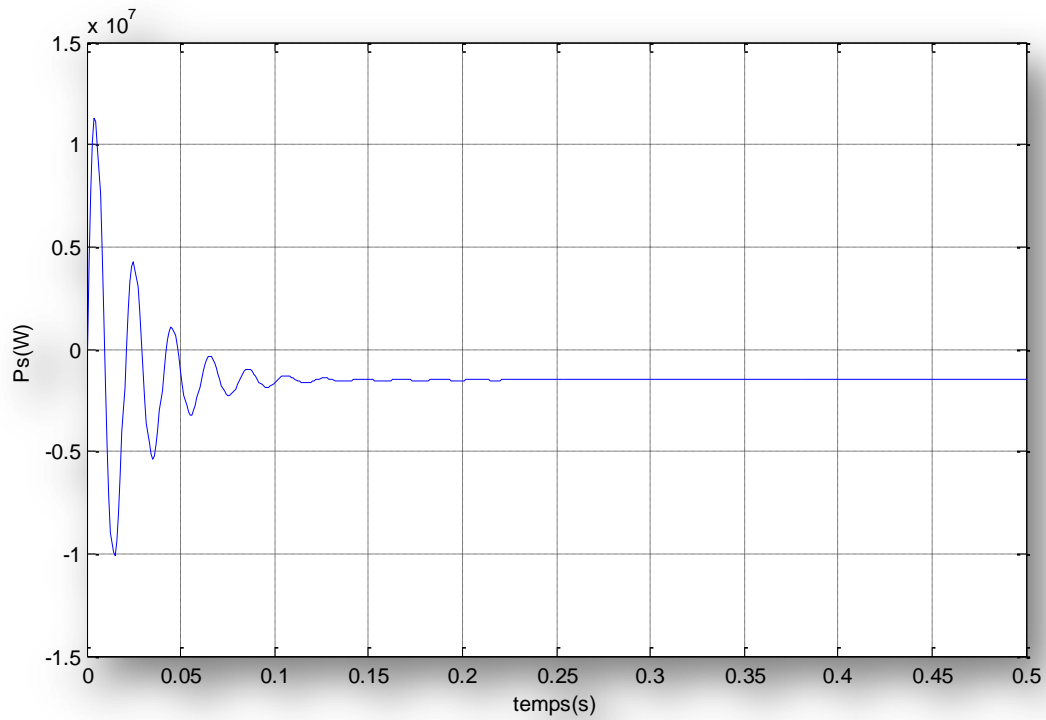


Figure 2.33 Puissance statorique active de la MADA

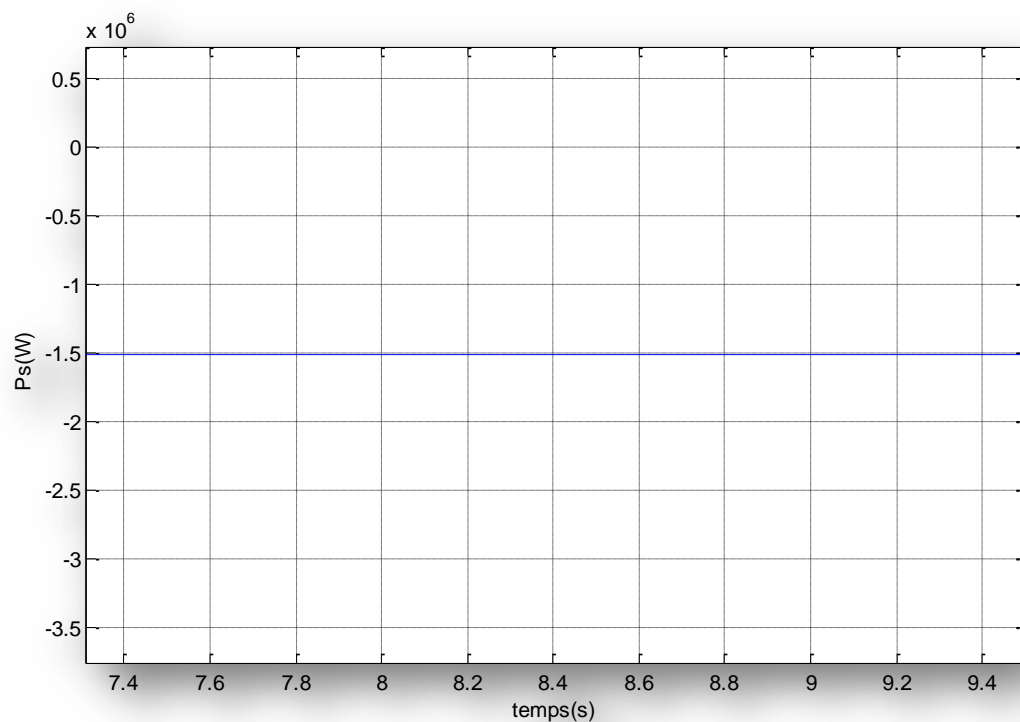


Figure 2.34 Zoom de la puissance active de la MADA

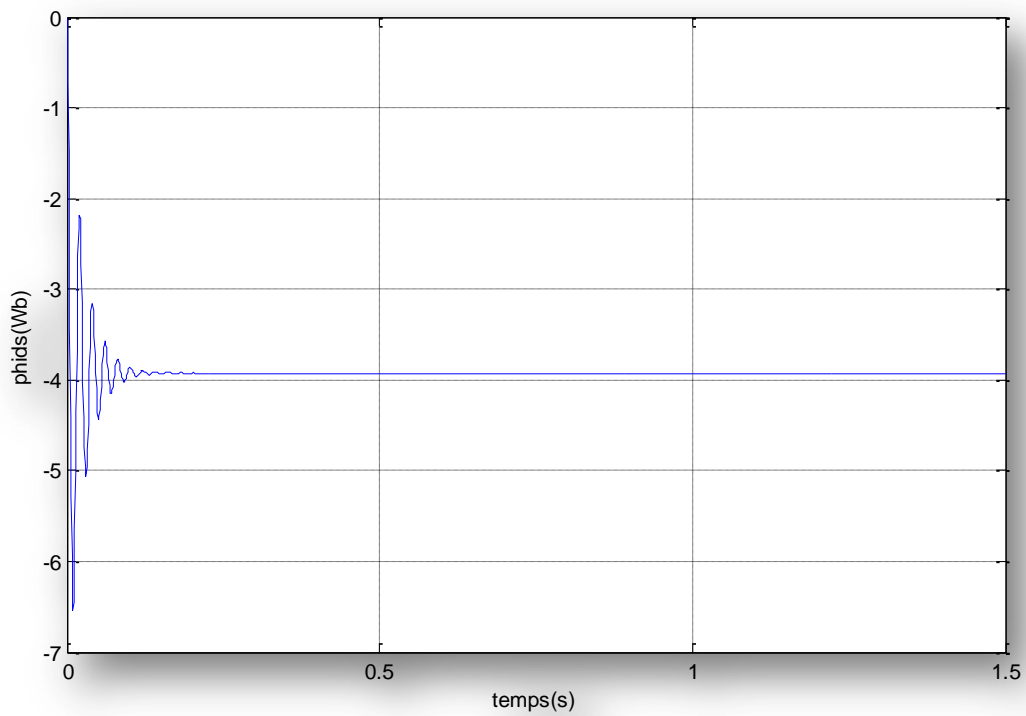


Figure 2.35 flux statorique ϕ_{ids} de la MADA

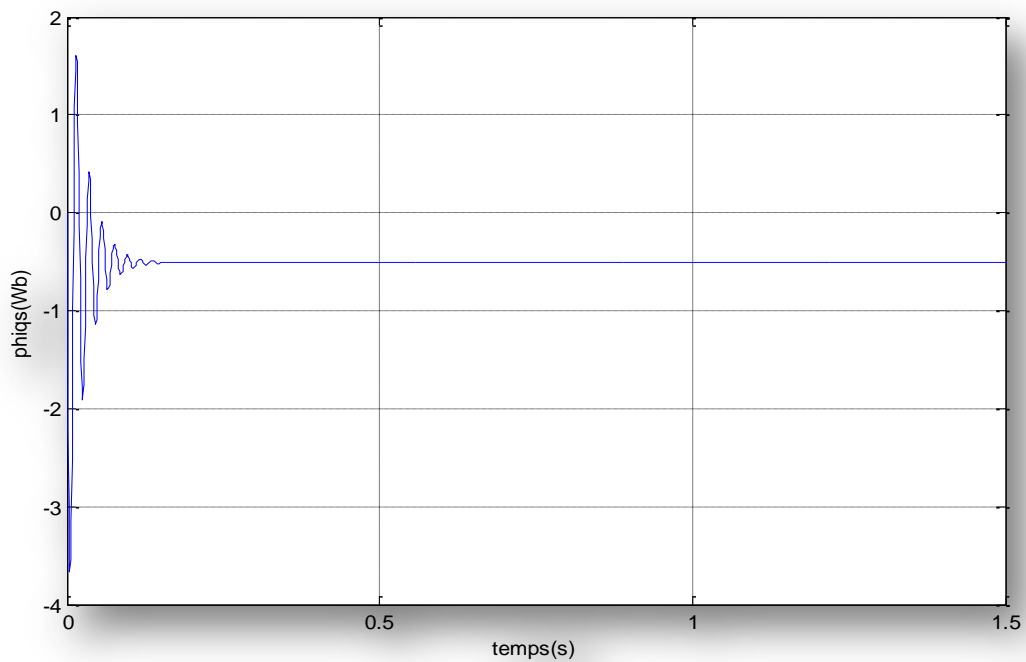


Figure 2.36 flux statorique ϕ_{iqs} de la MADA

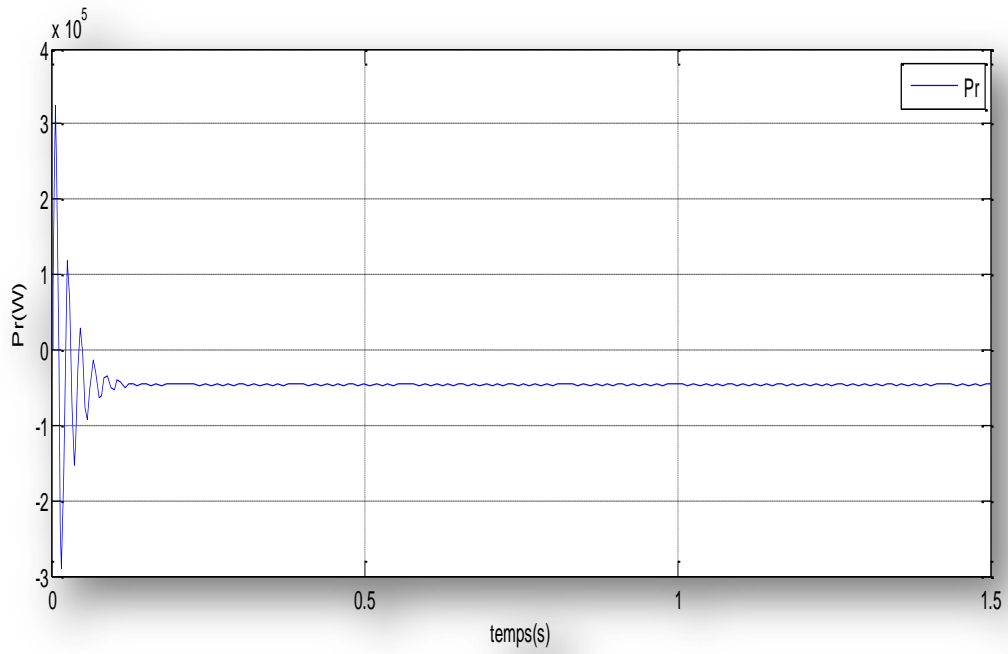


Figure 2.37 Puissance rotorique active de la MADA

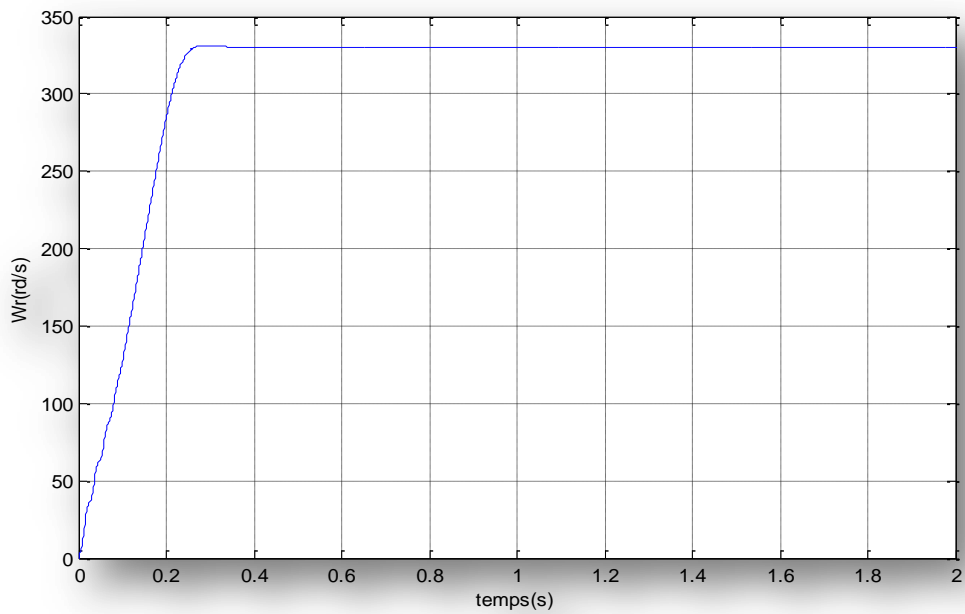


Figure 2.38 Vitesse d'entrainement de la MADA

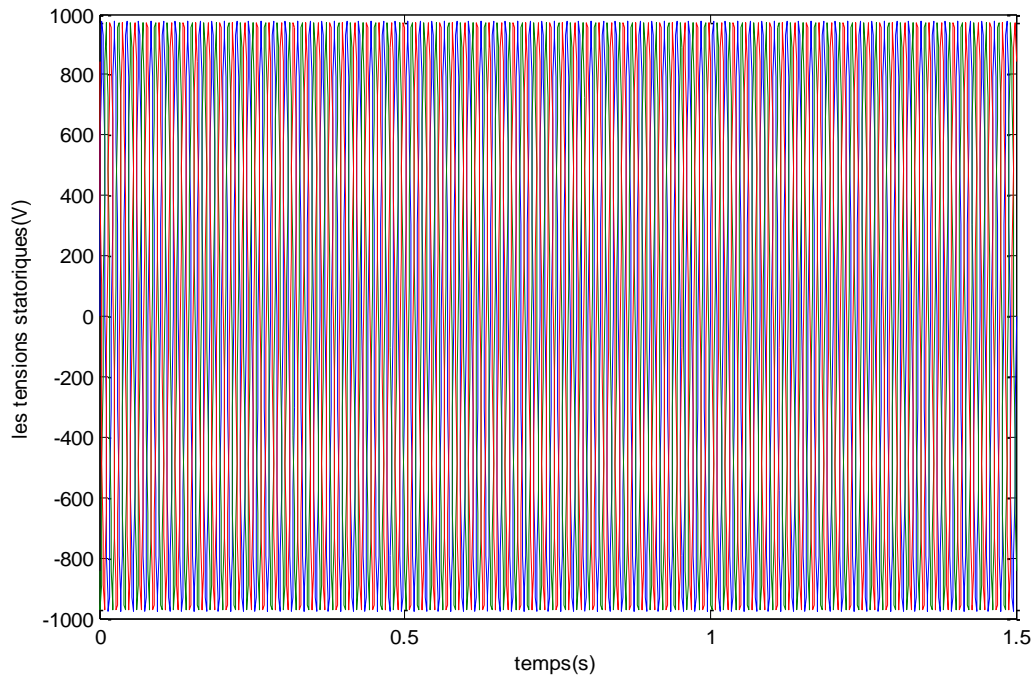


Figure 2.39 Les tensions statoriques de la MADA

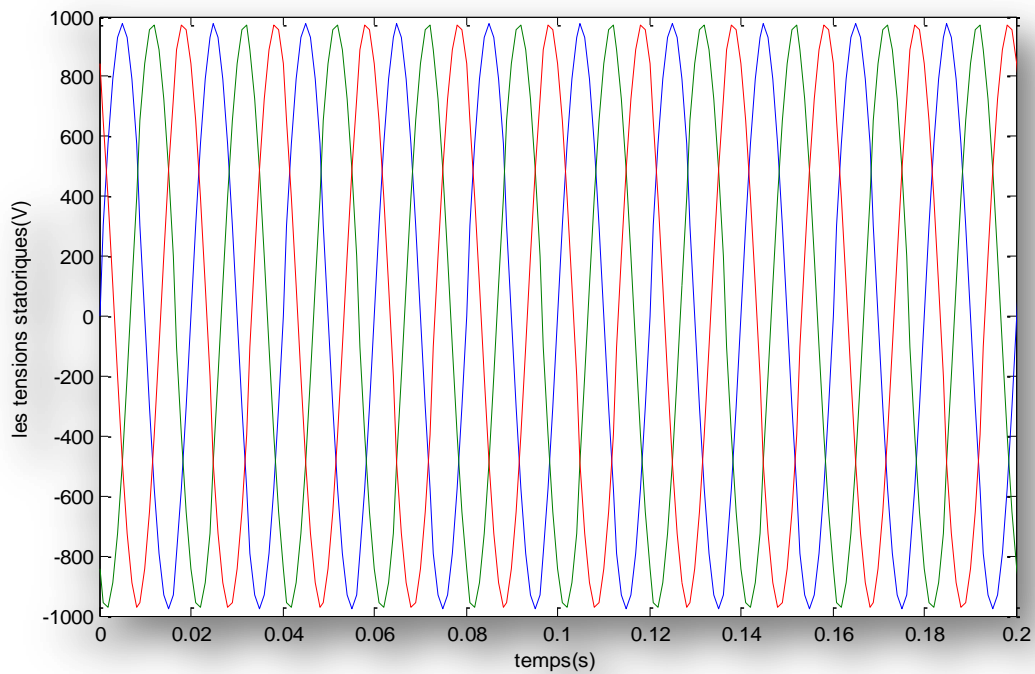


Figure 2.40 Zoom des tensions statoriques de la MADA

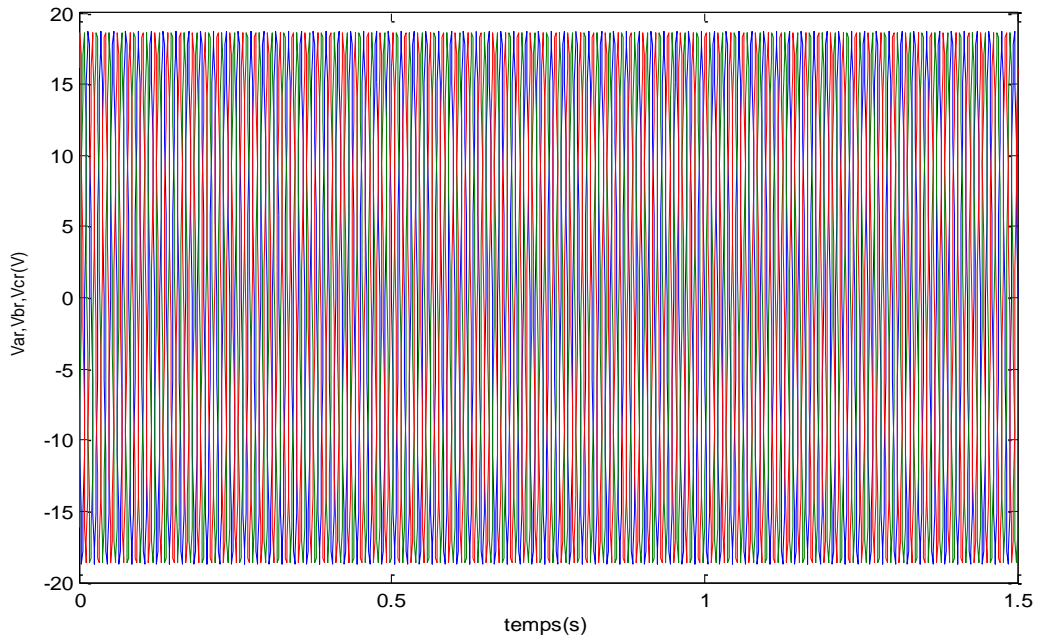


Figure 2.41 Les tensions rotoriques de la MADA

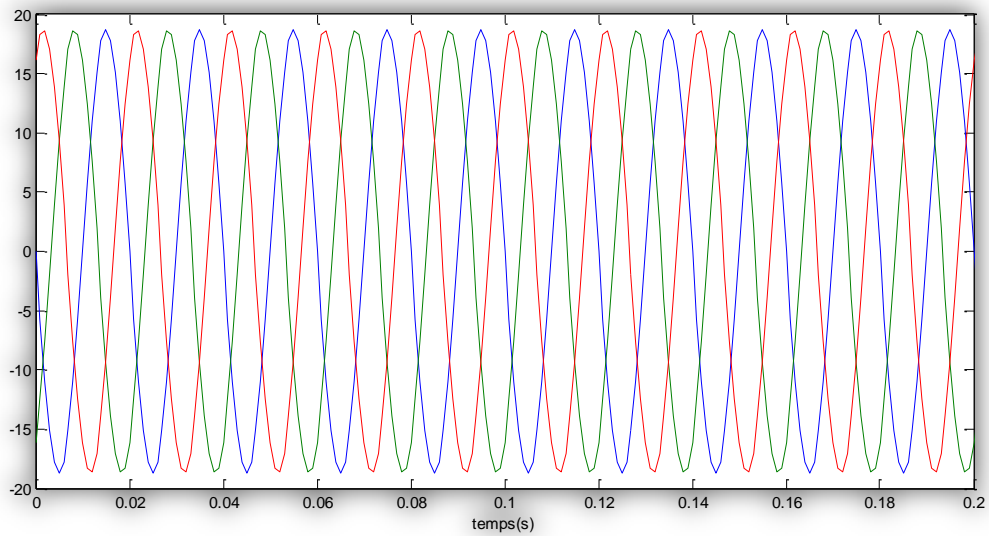


Figure 2.42 Zoom des tensions rotoriques de la MADA

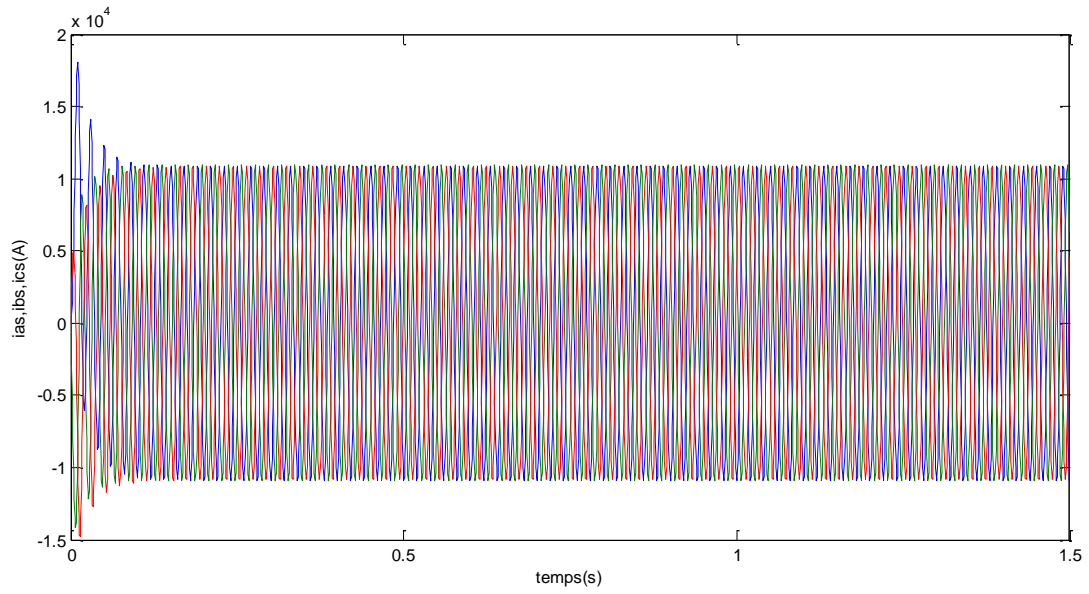


Figure 2.43 Courants statoriques de la MADA

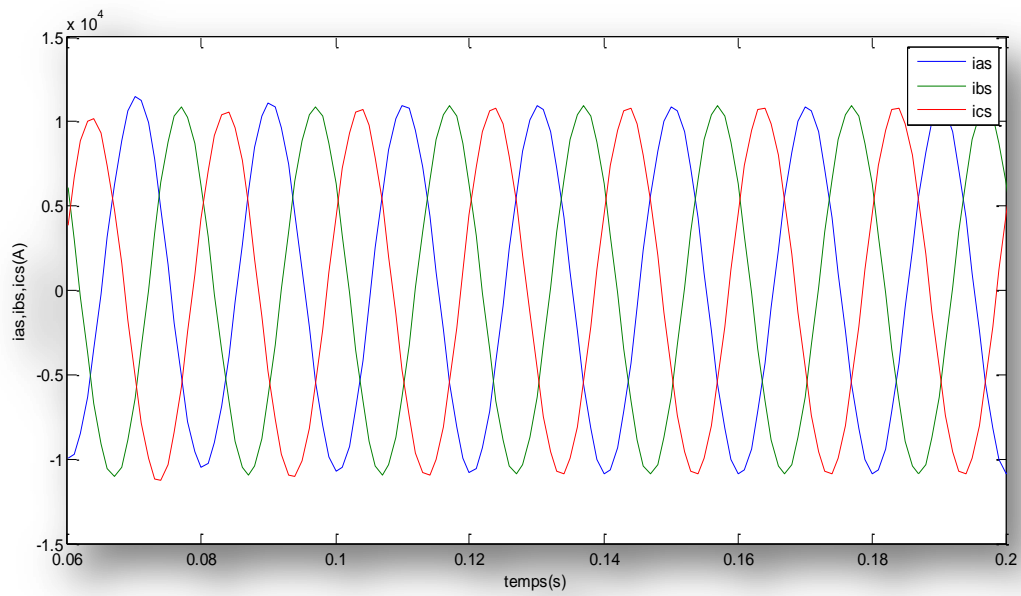


Figure 2.45 Zoom des courants statoriques de la MADA

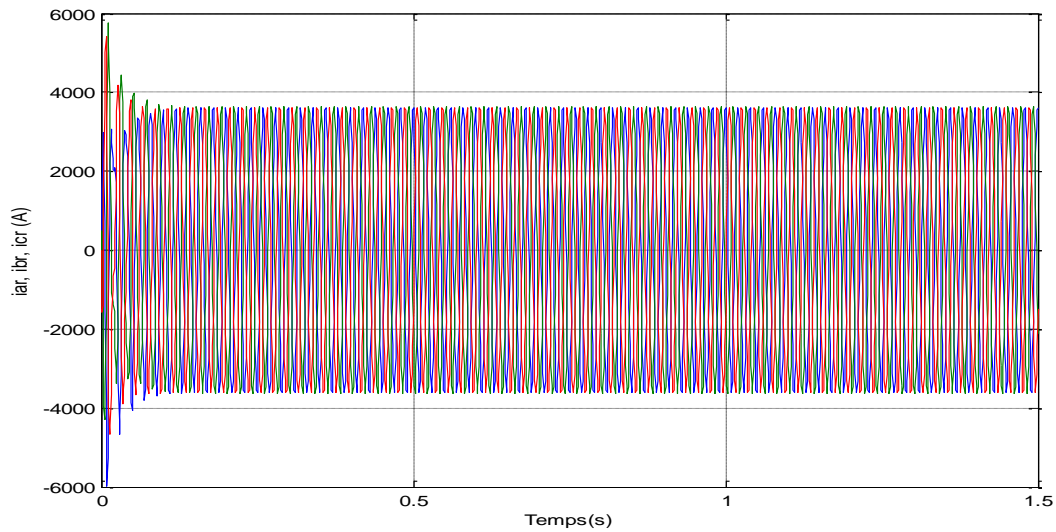


Figure 2.46 Courants rotoriques de la MADA

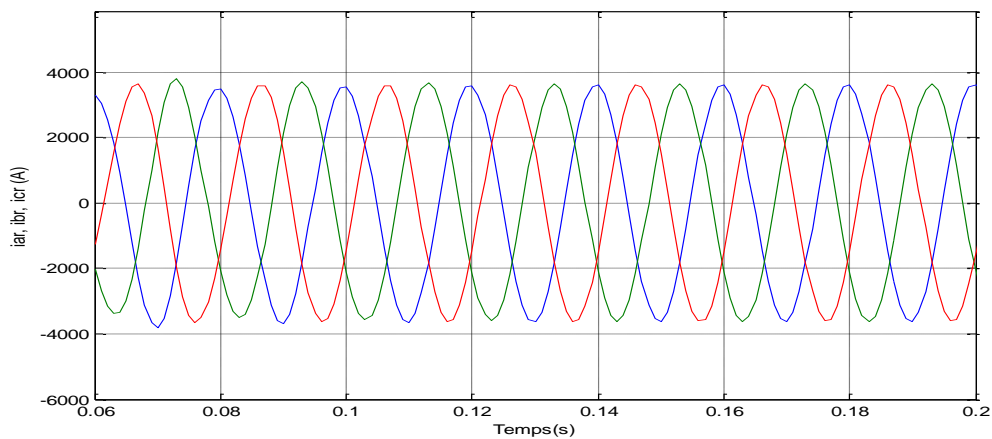


Figure 2.47 Zoom des courants rotoriques de la MADA

2-11 Modélisation du redresseur

2-11-1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxo Pulse Width Modulation) consiste à former chaque alternance de la tension désirée de plusieurs créneaux de largeurs convenables.

La multiplication de nombre des impulsions formant chaque alternance d'une tension présente deux avantages importants :

- Elle repousse vers les fréquences plus élevées des harmoniques de la tension désirées, ce qui facilite le filtrage ;
- Elle permet de faire la valeur du fondamental de la tension.

L'essor de la modulation de largeur d'impulsion est lié aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance. Avec les composants très rapides fonctionnant à de fréquences élevées, on peut augmenter le nombre de commutation sans introduire des pertes excessives.

2-11-2 Application des stratégies de MLI au redresseur

L'utilisation des redresseurs classiques cause un fort taux d'harmonique généré dans le réseau entraînant des distorsions dans l'onde de tensions, ce qui conduit à la détérioration du facteur de puissance du côté réseau.

Pour éviter ces perturbations, on s'oriente de plus en plus vers le remplacement des redresseurs classiques par des redresseurs à modulation de largeur d'impulsion capables de :

- Imposer une forme de courant sinusoïdale quel que soit le type de charge ;
- Contrôler le facteur de puissance ;
- Assurer la réversibilité fonctionnelle.
- Contrôler la tension du bus continu.

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs à MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

2-11-3 Modélisation du redresseur avec la stratégie de MLI à porteuse triangulaire

Le redresseur à MLI se compose de trois parties : un filtre composé d'une inductance L en série avec une résistance R , un pont redresseur à six transistors et le bus continu comprenant la tension redressée U_{dc} appliquée aux bornes de la capacité. L'inductance L englobe l'inductance du transformateur, l'inductance de la ligne.

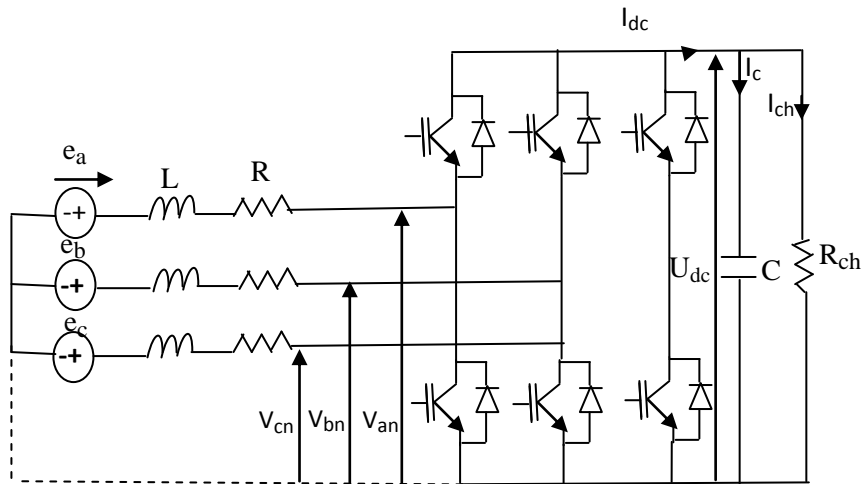


Figure 2.48 Schéma typique d'un redresseur de tension à MLI

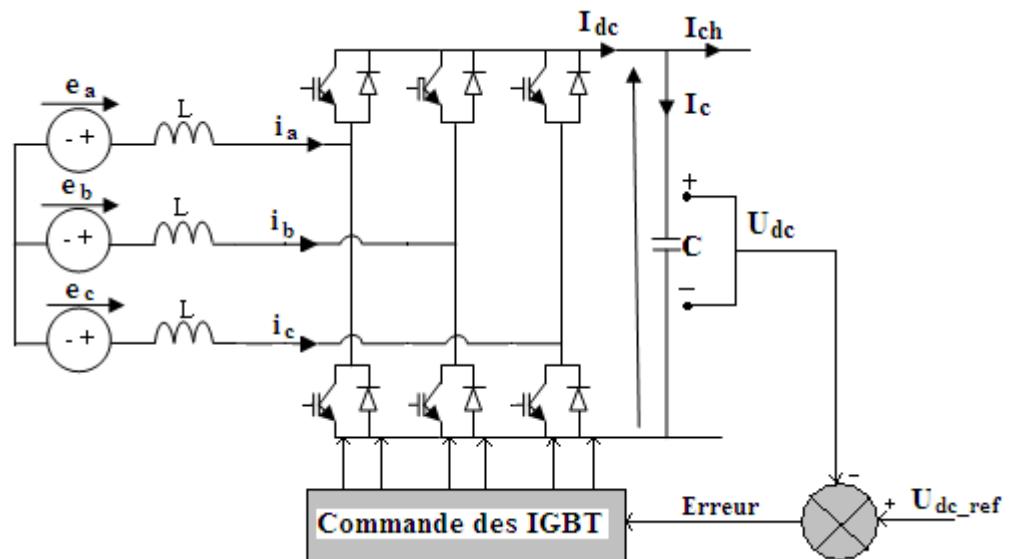


Figure 2.49 Structure en boucle fermée d'un redresseur MLI de courant

La MLI intersective sinus avec porteuse triangulaire a été l'une des plus utilisées à cause de sa simplicité de mise en œuvre et de sa fiabilité. Le principe d'élaboration de ce type de MLI est présenté par la figure 2.43.

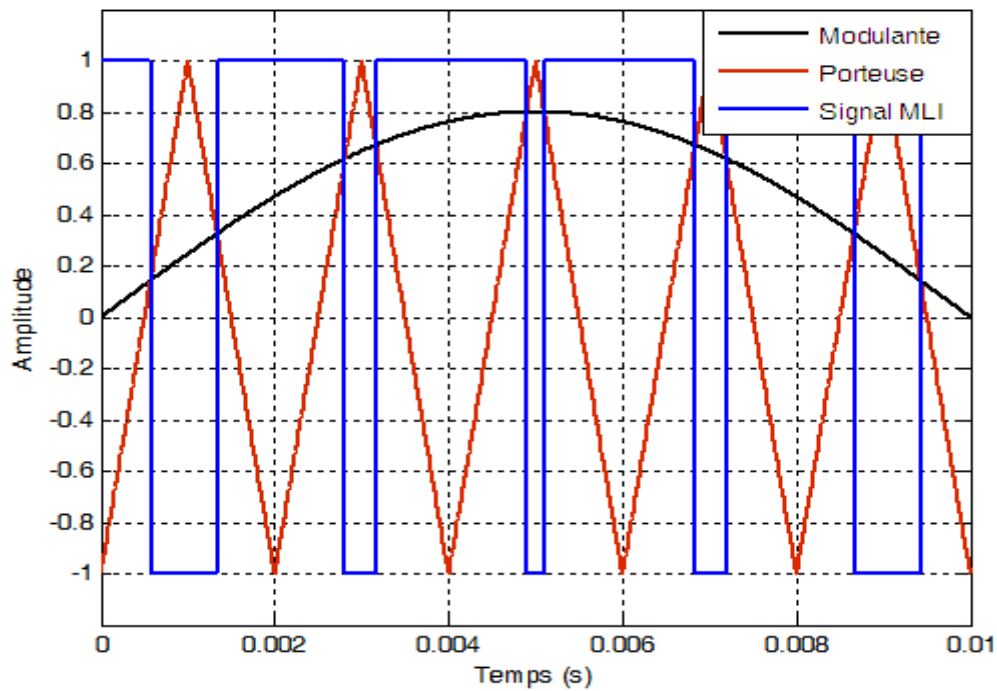


Figure 2.50 Principe de la génération de la MLI sinus triangle

2-11-4 Hypothèses simplificatrices de modélisation [21]

Pour simplifier les modèles, certaines hypothèses simplificatrices ont donc été réalisées :

- Les interrupteurs sont idéalisés et considérés comme parfaits (résistances de valeur nulle à l'état passant, infinie à l'ouverture et commutations instantanées) ;
- Les cellules d'interrupteurs placées en série ou en parallèle et commandées par les mêmes signaux sont considérées comme un seul interrupteur parfait ;
- Les éléments passifs sont considérés comme linéaires et invariants dans le temps.

Dans l'hypothèse d'avoir un système équilibré, les tensions du coté alternatif sont définies comme suit :

$$e_a = E_m \sin \omega t$$

$$e_b = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad 2.28$$

$$e_c = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Avec :

E_m et ω sont respectivement, l'amplitude de la tension simple et la pulsation du réseau. Les interrupteurs K_1 et K'_1 , K_2 et K'_2 , K_3 et K'_3 sont complémentaires deux à deux et commandés d'une manière décalée pour éviter les court-circuit dans les trois bras.

$$\begin{cases} -e_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + v_{an} = 0 \\ -e_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + v_{bn} = 0 \\ -e_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + v_{cn} = 0 \end{cases} \quad 2.29$$

2-11-5 Contrôle de la tension du bus continu U_{dc}

La tension du condensateur U_{dc} est liée au courant I_c qui la traverse par la tension suivante :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = I_c = I_{dc} - I_{ch} \quad 2.30$$

On voit d'après la relation précédente que la tension U_{dc} est totalement contrôlée par le courant I_c . Un schéma fonctionnel de la charge de la capacité est donné à la figure (2.42)

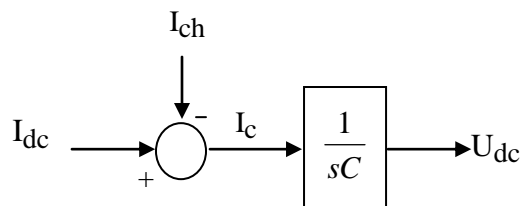


Figure 2.51 Modèle de la charge de la capacité

La régulation de la tension du bus continu sera effectuée alors par une boucle externe avec un régulateur PI générant le courant de référence I_c dans le condensateur.

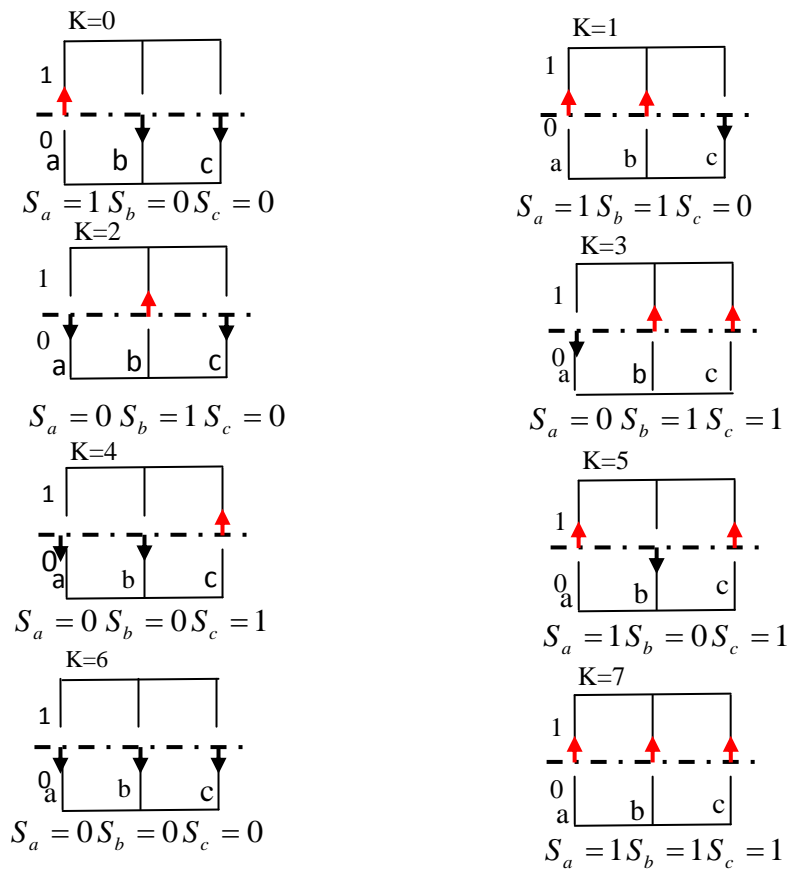


Figure 2.52 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

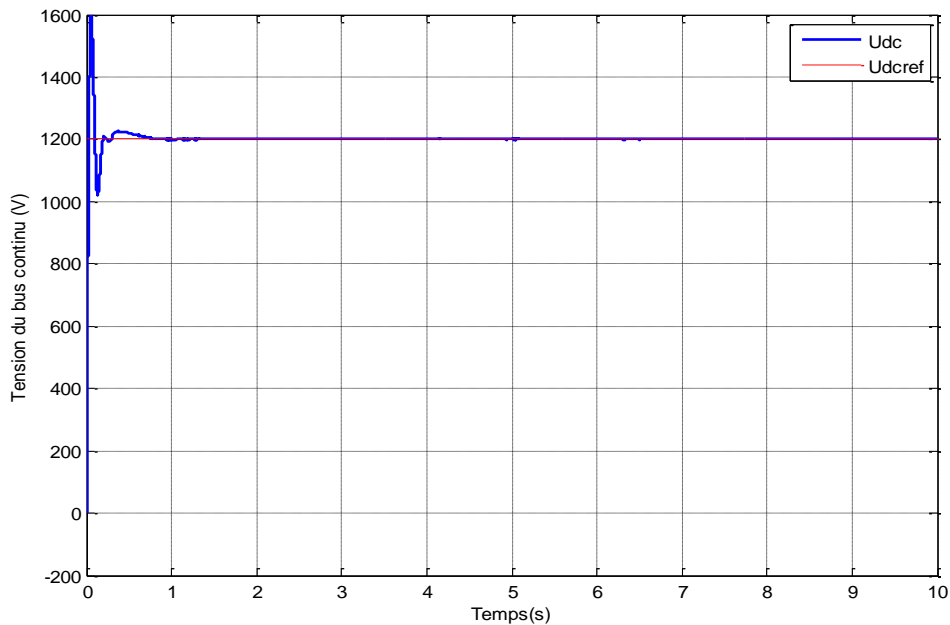


Figure 2.53 Tension du bus continu et sa référence

2-12-Onduleur à MLI vectorielle

2-12-1 Principe de la modulation vectorielle

La MLI vectorielle (ou space vector modulation en anglais) est certainement la méthode de MLI la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Un vecteur tension de contrôle est calculé globalement et approximé, sur une période de modulation, par un vecteur tension moyen. Cette modulation est utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones pour obtenir des formes d'ondes arbitraires non nécessairement sinusoïdales.

La dite technique de modulation repose sur la représentation d'une machine triphasée par une machine diphasée équivalente. On définit ainsi deux repères biphasés, l'un lié au stator (α, β), et l'autre lié au champ tournant (d-q), où le passage des grandeurs triphasées aux grandeurs biphasées se fait par simple projection sur les axes concernés.

Ainsi, cette commande rapprochée permet de déterminer les séquences des allumages et des extinctions des composants des convertisseurs et de minimiser les harmoniques des tensions appliquées au moteur.

Cette stratégie de modulation a pour principe la construction vectorielle de la référence de tension à partir des différents instants de commutation et en fonction des différentes possibilités de tension que peut générer un onduleur.

La stratégie de SVM de commande d'un onduleur a été spécialement développée pour le contrôle vectoriel des machines électriques.

Le schéma de principe de l'onduleur est rappelé sur la figure suivante

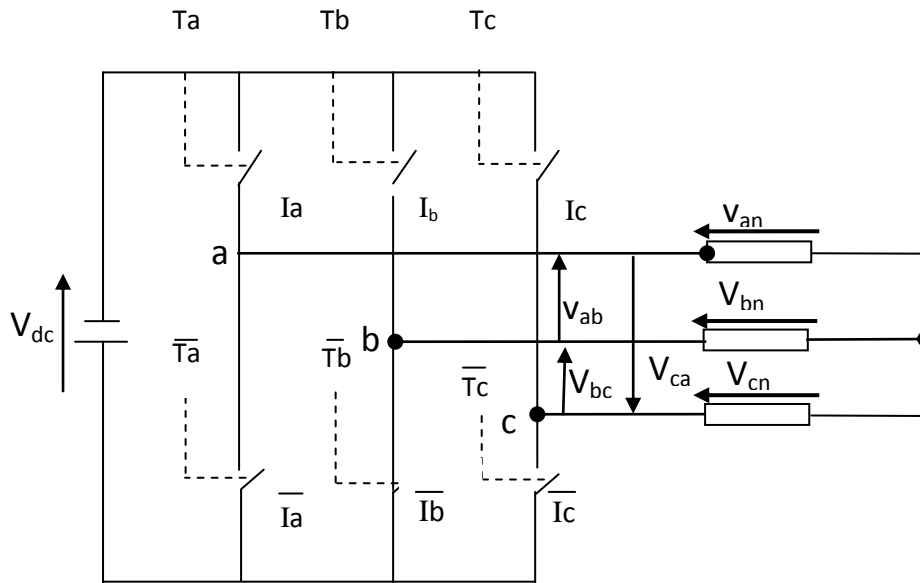


Figure 2.54 Schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension

Rappelons les notations utilisées, la position des interrupteurs de la partie haute est notée T_a , T_b et T_c pour les phases a, b et c respectivement. Chaque bras de l'onduleur est commandé de manière complémentaire. T_a , T_b et T_c prendront la valeur 1 lorsqu'ils seront fermés et 0 quand ils seront ouverts.

Afin de représenter les états de commutation des transistors de l'onduleur, dont chacun des bras est associé à une des phases du moteur, on définit trois fonctions logiques S_a, S_b et S_c appelées fonctions de commutation. Considérons la phase a on a : $S_a=1$ lorsque le transistor T_a est fermé et $S_a=0$ lorsque \bar{T}_a est fermé. Les fonctions S_b et S_c , relatives aux phases b et c, sont définies de manière similaire. Les signaux \bar{S}_a, \bar{S}_b et \bar{S}_c contrôlant les transistors \bar{T}_a, \bar{T}_b et \bar{T}_c sont des signaux complémentaires des signaux S_a, S_b et S_c .

Dans le cas d'un onduleur triphasé, il ne peut y avoir que huit combinaisons des fonctions de commutations, correspondant à huit combinaisons des tensions simples, ainsi huit combinaisons des tensions composées comme le montre le tableau suivant :

S_a	S_b	S_c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{+2V_{dc}}{3}$	0	$-V_{dc}$	0
0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{+2V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$-V_{dc}$	0	$+V_{dc}$
0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	0	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$
1	0	0	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	0	$-V_{dc}$
1	0	1	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$-V_{dc}$	0
1	1	0	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	0	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau 2.1 Tensions simples et composées en fonction des fonctions de commutation

2-12- 2 Présentation des vecteurs de commutation dans le plan (α , β)

Si on présente les vecteurs de commutation sur le plan (α , β), dont deux sont nuls, on s'aperçoit qu'ils subdivisent le plan en six secteurs égaux.

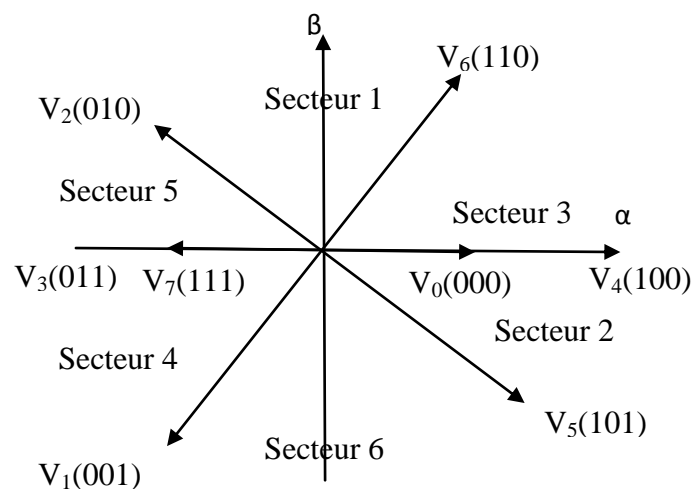


Figure 2.55 Vecteurs de commutation dans le plan (α , β)

La réalisation de cette modulation passe par un ensemble d'étapes qui peuvent être résumées par les séquences de traitement suivantes:

Etape1 : Détermination des tensions de référence V_α et V_β à partir des trois tensions désirées

Ce calcul se fait au moyen de la transformation de Concordia dont la matrice est représentée dans le paragraphe IV-4 de l'annexe 1. Le bloc caractérisant cette transformation est présenté par la figure II.5.

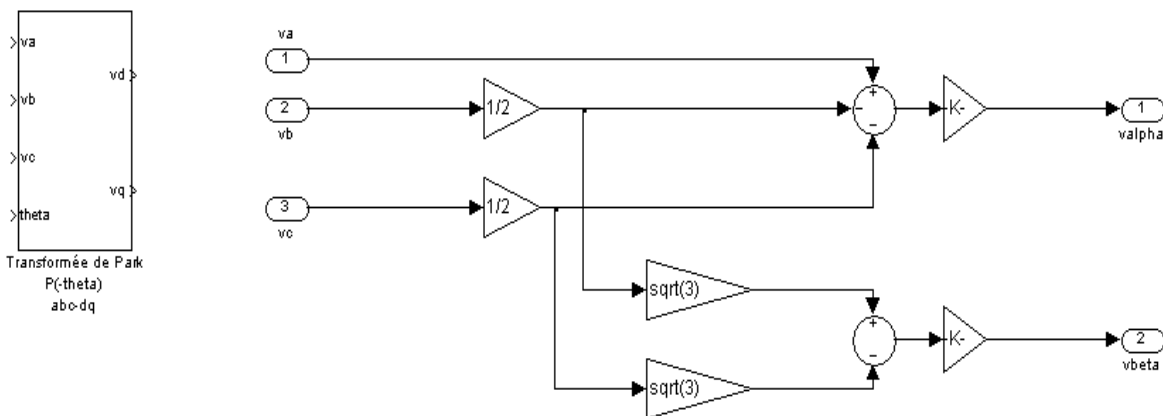


Figure. 2.56 Transformation de Concordia.

Etape 2 : Détermination des secteurs

Ce traitement se fait en se basant sur le signe des vecteurs de tension V_α , V_β et de l'angle

entre ces deux vecteurs $\gamma = \arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right)$. Pour chacune de ces grandeurs, on associe une

variable logique qui caractérise leur signe. On note que A_2 représente le signe de V_α , tel qu'il est égale à 1 si $V_\alpha > 0$, sinon il est égal à zéro, A_1 représente le signe de V_β , tel qu'il est égale

à 1 si $V_\beta > 0$, sinon il est égal à zéro et A_0 représente la valeur absolue de l'angle entre ces deux

vecteurs, tel qu'il est égale à 1 si $\gamma = \arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \geq 1.73$, autrement, il est égal à zéro.

Ce traitement est résumé par le tableau ci-dessous

A_2	A_1	A_0	Secteur
0	0	0	5
0	0	1	4
0	1	0	6
0	1	1	1
1	0	0	3
1	0	1	4
1	1	0	2
1	1	1	1

Tableau 2.2 Détermination du secteur

Le bloc Simulink représentant ce calcul est illustré par la figure :

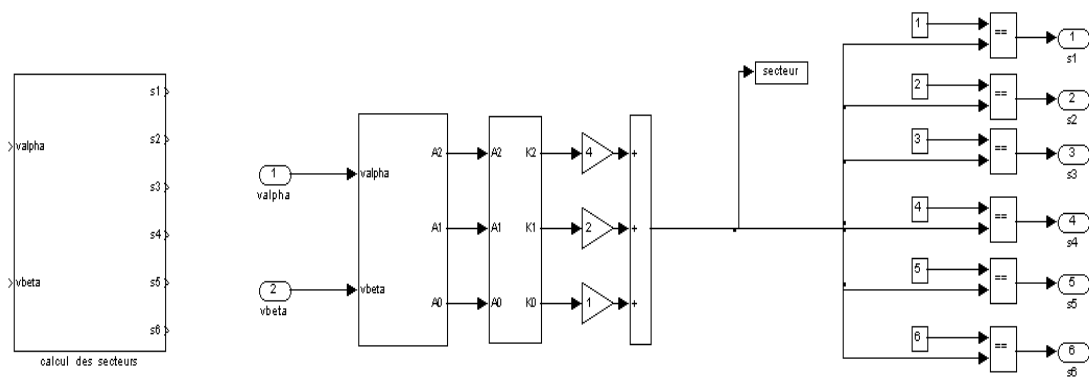


Figure 2.57 Bloc de détermination des secteurs

Etape 3 : Calcul des variables X, Y, Z

Ces trois variables représentent les différentes possibilités que peuvent prendre les durées d'application des vecteurs de tension adjacents au vecteur de référence (V_α, V_β).

Ces trois variables ont pour expression :

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{\sqrt{3}T}{V_{dc}} \cdot V_\beta \\ Y &= \frac{\sqrt{3}T}{2V_{dc}} \cdot V_\beta + \frac{3T}{2V_{dc}} \cdot V_\alpha \\ Z &= \frac{\sqrt{3}T}{2V_{dc}} \cdot V_\beta - \frac{3T}{2V_{dc}} \cdot V_\alpha \end{aligned} \right. \quad 2.31$$

Le bloc Simulink représentant ces calculs est :

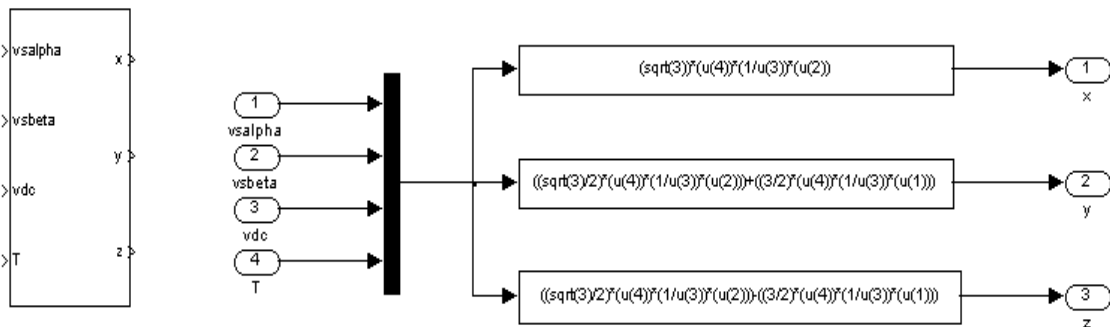


Figure 2.58 Bloc de Calcul des variables X, Y et Z.

Etape 4 : Calcul de t_1 et t_2

Dans cette étape, on calcule les instants d'application des vecteurs adjacents au vecteur de référence pour chaque secteur à partir des variables X, Y et Z suivant le tableau ci-dessous :

secteur	1	2	3	4	5	6
t_1	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
t_2	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

Tableau 2.3 t_1 et t_2 en fonction de X, Y, Z.

Etape 5 : Détermination des instants de commutation $t_{aon}, t_{bon}, t_{con}$

Cette étape permet de déterminer les différents signaux modulateurs suivant les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{aon} = \frac{(T - t_1 - t_2)}{2} \\ t_{bon} = t_{aon} + t_1 \\ t_{con} = t_{bon} + t_2 \end{array} \right. \quad 2.32$$

Le bloc caractérisant cette étape est présenté par la figure (II.8).

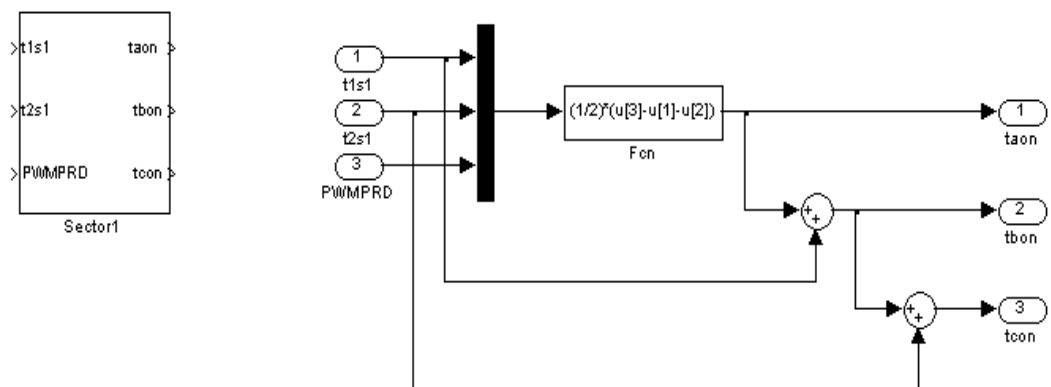


Figure 2.59 Bloc de détermination de $t_{aon}, t_{bon}, t_{con}$.

Etape 6 : Détermination de T_a , T_b , T_c

Cette partie permet de générer les séries d'impulsions qui serviront par la suite à la réalisation des signaux de commande entrant dans le modèle de l'onduleur. Ces impulsions sont déterminées par la comparaison des signaux modulant avec une porteuse triangulaire à haute fréquence (20kHz). Le bloc caractérisant ce fonctionnement se présente sous l'aspect suivant :

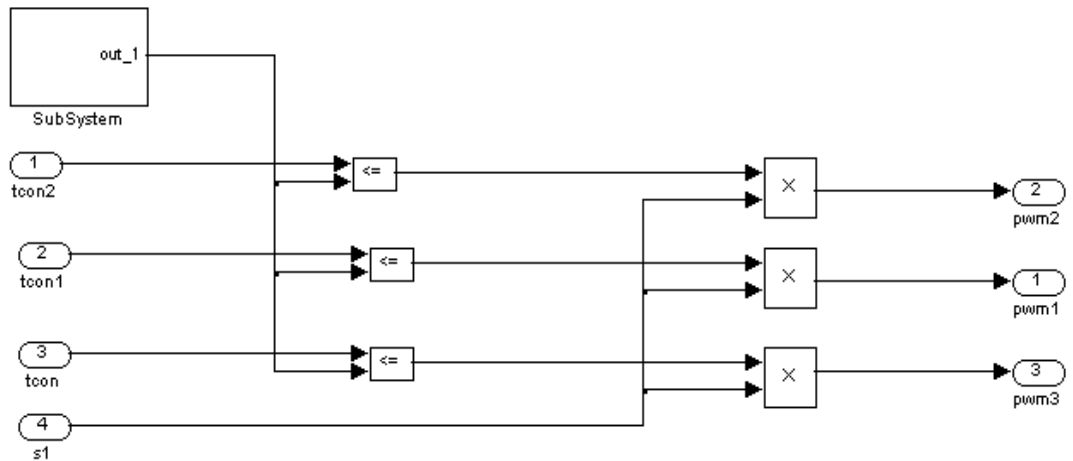


Figure 2.60 Bloc de détermination de t_a, t_b, t_c .

2-12-3 Résultats de simulation

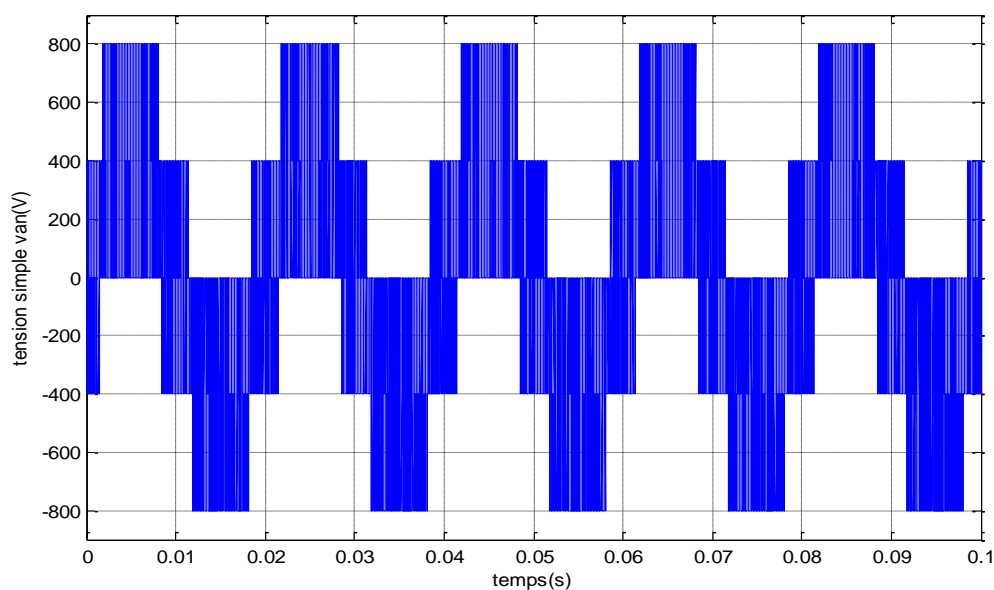


Figure 2.61 la tension simple à la sortie du convertisseur

2-13 Conclusion

Ce chapitre traite la théorie et la modélisation de la turbine, de la machine asynchrone à double alimentation et des convertisseurs statiques d'où on a obtenu des résultats de simulation en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Nous avons simulé une structure de redresseur de courant car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité relative aux autres montages.

Ensuite, nous avons abordé une commande basée sur la stratégie de modulation par largeur d'impulsion vectorielle et l'appliquer sur l'onduleur.

CHAPITRE 3

COMMANDE VÉCTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

3-1 Introduction

Dans la machine asynchrone, le couple électromagnétique est le résultat d'une interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator, et les courants induits dans le rotor. Ainsi toute variation du couple par variation des courants statoriques se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système extérieur à la machine, réaliser un découplage des réglages du couple et du flux.

Le découplage peut être réalisé par plusieurs variantes, par orientation du flux statorique, du flux dans l'entrefer, ou du flux rotorique.

Actuellement la méthode la plus utilisée, est donnée par la théorie de commande par flux orienté (F.O.C). Cette dernière a été proposée en 1972 par 'BLASCHKE', elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple par orientation d'un flux selon l'axe(d) du repère choisi. Dans ce chapitre, nous présenterons, le principe de l'orientation du flux statorique.

3-2 Principe de la commande vectorielle

Le but de cette commande, est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, en découplant la commande du couple de celle du flux.

3-3 Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

- Suivant la source d'énergie :
 - commande en tension ;
 - commande en courant ;
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - commande vectorielle de flux rotorique ;
 - commande vectorielle de flux statorique ;

-commande vectorielle de flux d'entre fer (ou du flux magnétisant).

- Suivant la détermination de la position du flux :
 - directe par mesure ou observation du vecteur (module, phase) ;
 - indirecte par contrôle de la fréquence de glissement

3-4 Choix de référentiel pour le modèle biphasé

En choisissant un référentiel biphasé d-q lié au champ tournant statorique et en alignant le

vecteur flux statoriques : $\varphi_{ds} = \varphi_s$; $\varphi_{qs} = 0$.

Une simplification des équations de la machine asynchrone (au stator et rotor) est obtenue en supposant les composantes nulles :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r I_{dr} + \omega_r \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r I_{qr} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad 3.01$$

A partir des équations des composantes directes et quadratures des flux statoriques on obtient :

$$\begin{cases} I_{qs} = -\frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ I_{ds} = \frac{\varphi_{ds} - M_{sr} I_{dr}}{L_s} \end{cases} \quad 3.02$$

D'où l'expression du couple devient :

$$C_{em} = -p \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} = -p \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_s I_{qr} \quad 3.03$$

Dans la production éolienne, on utilise les machines de moyenne et de forte puissance, sur ceux on peut négliger la résistance statorique et toujours dans la deuxième approche

suscitée (flux statorique constant), on peut écrire les expressions des tensions et des flux statoriques comme suit [32] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad 3.04$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \end{cases} \quad 3.05$$

3-5 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [11] :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad 3.06$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($\varphi_{ds} = 0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad 3.07$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions données par l'équation (3.02) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad 3.08$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive devient alors

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} \quad 3.09$$

3-6 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Remplaçant les courants statoriques donnés par l'équation (3.02) dans les flux rotoriques on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad 3.10$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées des équations (2.23) et (2.25), nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad 3.11$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad 3.12$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants désirés. L'influence des termes de couplage entre les axes en

$\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans une boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{M_{sr}V_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations 3.08, 3.09 et 3.12 permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler.

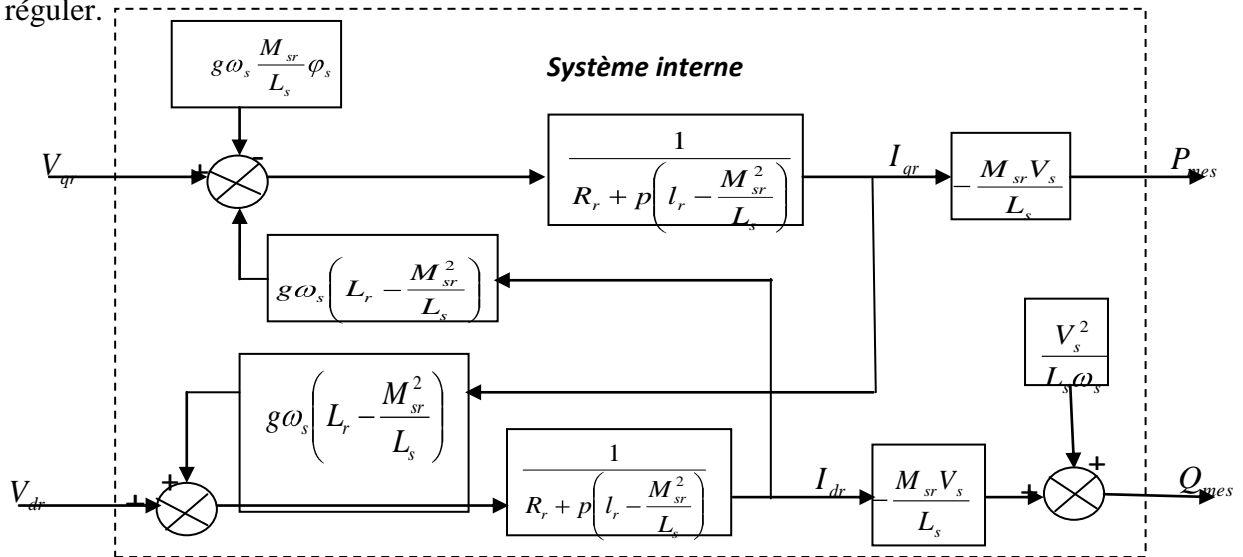


Figure 3.1 Schéma bloc du système à réguler.

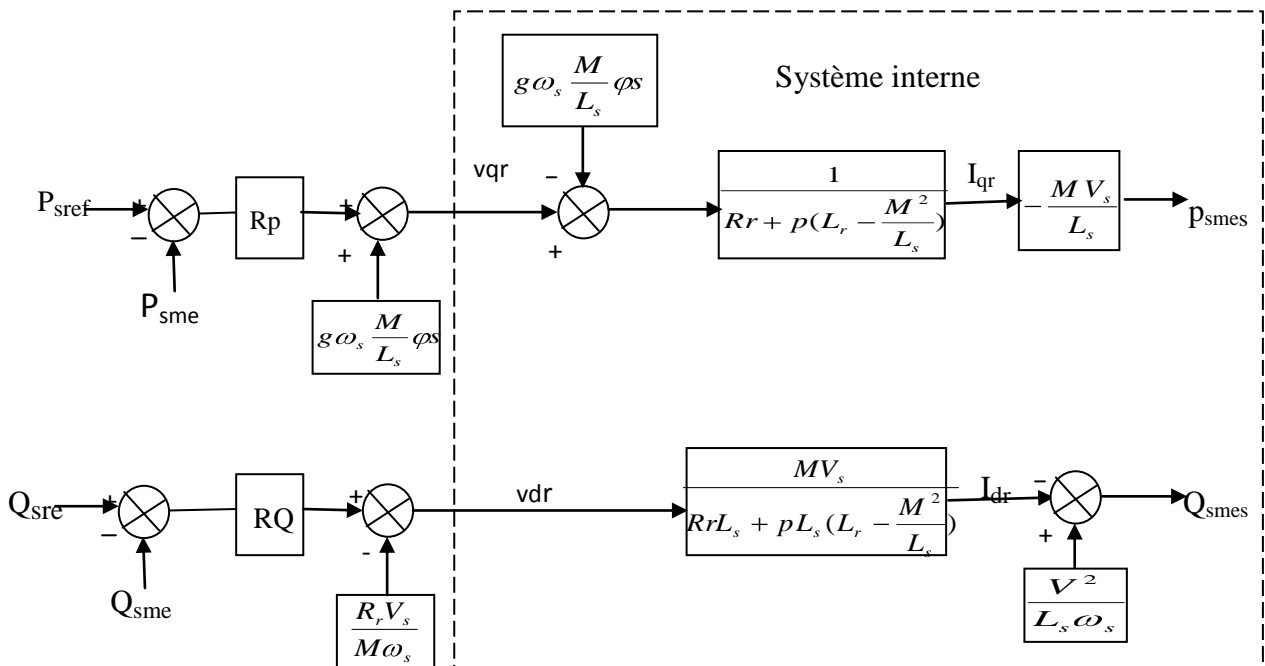


Figure 3.2 principe générale de la commande vectorielle en P et Q de la MADA.

Lorsque la machine fonctionne en mode autonome ou lorsque le réseau auquel le stator de la machine est connecté présente des variations importantes, le terme V_s est variable et la présence du régulateur PI se justifie.

Dans notre cas la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s par conséquent est constante. Chaque axe comporte un régulateur comme le montre la figure (3.3) :

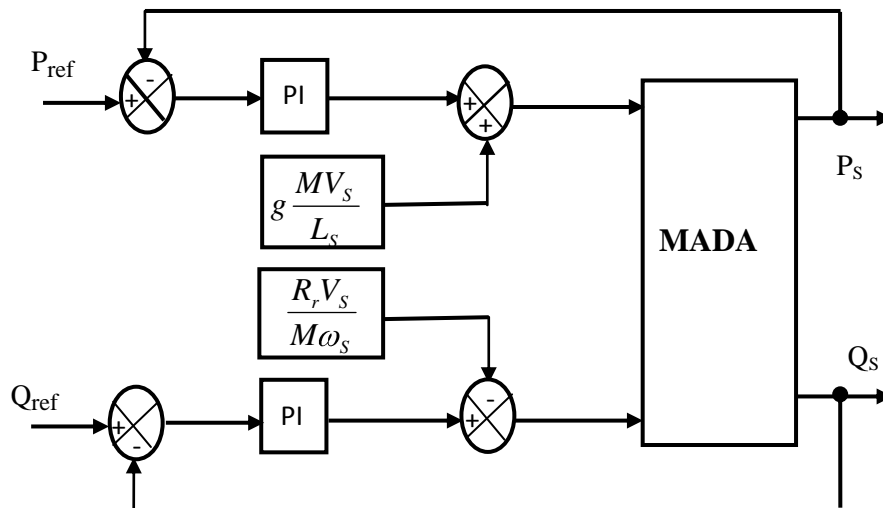


Figure 3.3 Commande vectorielle avec le même type de régulateur

Les régulateurs de la commande vectorielle seront calculés de façon à obtenir les performances les plus élevées possibles tant au niveau de la dynamique qu'à celui de robustesse et de rejet de perturbations. Ainsi au cours de synthèse de ses régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'éolien à vitesse variable ou dans un système utilisant la MADA en génératrice.

Mise en œuvre du régulateur pour le contrôle de la puissance :

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre, la figure (3.4) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI. Dans notre cas, la fonction de transfert est sous la

forme $K_p + \frac{K_i}{S}$ correspondant aux régulateurs de la figure (3.3) [35,36] .

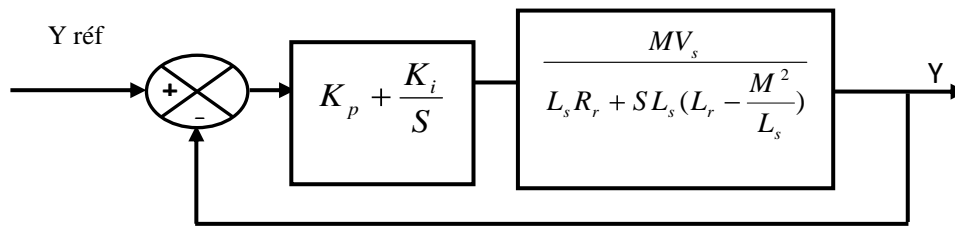


Figure 3.4 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction du transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{S + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad 3.13$$

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 :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} = \frac{R_r}{L_r - \frac{M^2}{L_s}} \quad 3.14$$

La compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres.

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

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{S} \quad 3.15$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r S} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad 3.16$$

τ_r : Temps de réponse du système.

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

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}, K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad 3.17$$

La simulation du modèle de la turbine associé au modèle de la MADA en utilisant la commande vectorielle nous a permis de déterminer pour chaque vitesse du vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale.

Résultats de simulation

Le modèle mathématique de la commande vectorielle est implémenté sous le logiciel MATLAB/SIMULINK, tel que la consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator.

La consigne de la puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale conférant le meilleur rendement au système éolien.

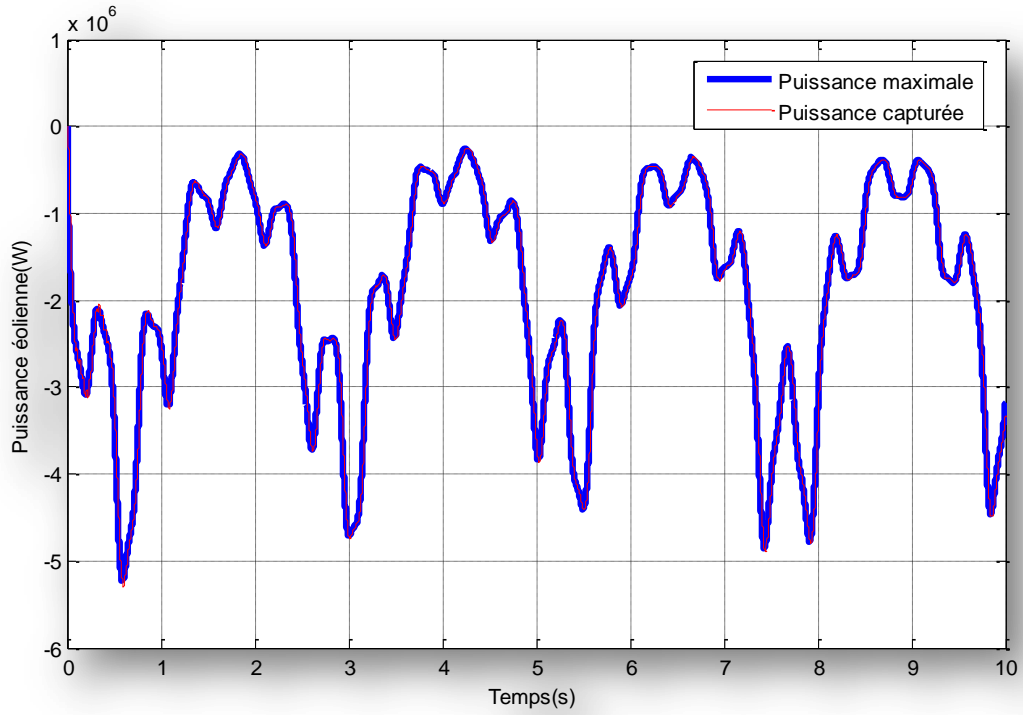


Figure 3.1 variation de puissance active mesurée et sa référence

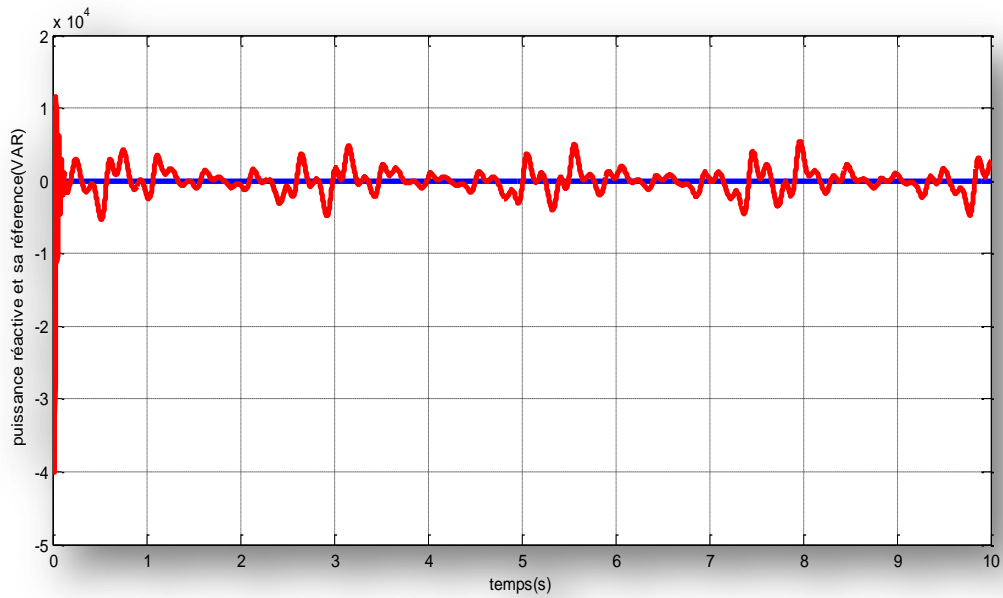


Figure 3.2 variation de puissance réactive mesurée et sa référence

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation de la commande vectorielle de la GADA avec simulation du flux statorique. Cette commande a permis de découpler les grandeurs du couple et du flux pour un contrôle facile et une commande en puissance de la machine.

Nous avons dans ce sens établi une relation liant les courants rotoriques d'axes d et q aux puissances statoriques réactives et actives respectivement, ceci nous a permis de réaliser deux boucles de régulation en utilisant le régulateur PI. Ce dernier est simple à mettre en œuvre et offre des performances acceptables.

Parfois, le couplage existant entre les variables du système, rend le contrôle plus difficile. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes non linéaires et la commande par logique floue, en est une. Cette dernière est considérée comme l'une des approches les plus simples et plus avancées pour la commande des systèmes non linéaires et ayant un modèle imprécis afin d'améliorer les performances de notre système et augmenter le degré d'efficacité obtenu en utilisant les méthodes de réglage conventionnelles (PI classique). Le chapitre suivant sera consacré à l'illustration de cette méthode.

CHAPITRE 4

UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR RÉALISER UN CIRCUIT D'ÉVALUATION DE LA PUISSANCE D'UN SYSTÈME ÉOLIEN

4-1 Introduction

La logique humaine est un enchaînement d'idée, de concepts, concrets ou abstraits, aboutissant à des conclusions qui entraînent des décisions.

Depuis la plus haute Antiquité, les penseurs ont cherché à reconstituer les mécanismes de la logique. D'Aristote à Chrysippe et bien d'autres, et bien plus tard George Boole, ce génial clergyman anglais, et depuis lors, ici et là, très nombreux, les humains les plus perspicaces ont cherché à définir les mécanismes de la logique, ce qui été le moteur de leurs déductions et actions [26].

La plupart des problèmes rencontrés sont modélisables mathématiquement. Mais ces modèles nécessitent des hypothèses parfois trop restrictives, rendant délicate l'application au monde réel. Les problèmes du monde réel doivent tenir compte d'information imprécise, incertaines. Prenons l'exemple d'une climatisation : si on veut obtenir une température fraîche, on peut se demander quelle gamme de températures conviendra (la demande est imprécise) ; de plus la fiabilité des capteurs entre en jeu (la mesure de la température ambiante est incertaine). On voit apparaître la difficulté d'interprétation des variables linguistiques comme frais, chaud, ... ainsi que du traitement de ces données entachées d'incertitude [27].

Ainsi que pour l'éolienne qui dépend essentiellement du vent soufflé, ce dernier a un comportement aléatoire .La logique floue peut être une solution afin d'exploiter le maximum de puissance de ce vent.

De nombreuses applications sont alors développées dans divers domaines là où aucun modèle déterministe n'existe pratiquement imprésentable, ainsi que dans des situations pour lesquelles l'imprécision sur les données rend le contrôle par des méthodes classiques impossible.

Dans le cadre de ce travail, on présentera dans ce quatrième chapitre un détail sur l'historique, le domaine d'application et la théorie de la logique floue et ses bases générales, puis on montrera la description de la commande par logique floue avec ses différentes étapes de fuzzification, inférence et défuzzification, et on appliquera cette commande pour assurer un maximum de puissance à chaque instant du vent soufflé.

4-2 Histoire de la logique floue

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies officiellement en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley dans sa publication de l'article Fuzzy Sets (ensemble floue) dans la revue Information and control.

A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise en compte au sérieux. En effet, les ordinateurs avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 et 0) ont commencé à se répondre sur une large échelle.

Par contre, la logique floue permet de traiter les variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0 [18].

-en 1973 : le professeur Zadeh publie un article (dans l'IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics) qui fit date.

-il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre).

-En 1974 : le docteur Mamdani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimentale sur un moteur à vapeur.

-En 1980 : -F.L.Smidth et al.A/S (au Danemark), met en application la théorie de la logique floue dans le contrôle de fours à ciment.

C'est la première mise en œuvre pratique de cette nouvelle théorie.

Dans les années 80 plusieurs applications commencent à immerger (notamment au Japon).

-En 1987: 'explosion du flou' au Japon (avec le contrôle du métro de Sendai) et qui atteint son apogée en 1990.

Aujourd'hui, une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette « produit flou ».

4-3 Définition de la logique floue

Dans le passé, la logique floue est une logique qui essaie d'associer l'imprécision inhérente aux phénomènes naturels à la puissance de calcul des ordinateurs, pour réaliser des systèmes de raisonnement intelligents, robuste et souples. Mais la logique floue, dans son utilisation courante, englobe un ensemble de discipline bien plus large. Ses différents aspects sont montrés sur la figure 4.1.

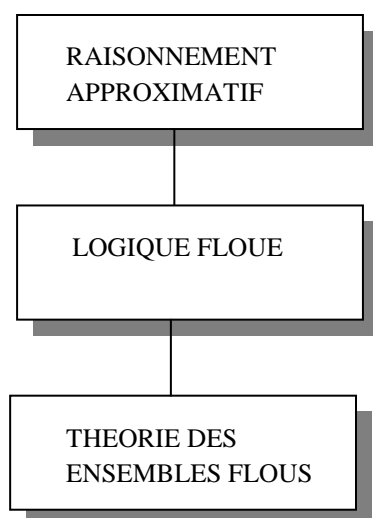


Figure 4.1 Les différents aspects de la logique floue

Au premier niveau est la théorie des ensembles flous, qui décrit la manière dont sont structurés les ensembles flous et quelles sont les opérations licites. La logique floue est proprement dite est l'ensemble des processus permettant de faire des inférences à partir d'ensemble flou. Ce dernier est l'élément de base de la logique floue. Les ensembles flous sont appelés ainsi du fait que leurs frontières sont indéfinies. Les ensembles classiques, au contraire, ont des frontières parfaitement définies. Ils peuvent être décrits par des listes ou des expressions indiquant ce qui appartient à l'ensemble et ce qui ne lui appartient pas. Un ensemble flou est constitué de trois parties : un axe horizontal représentant les éléments de l'ensemble, un axe vertical auquel sont rapportées les valeurs d'appartenances et une courbe reliant les différents points de coordonnées (élément ; valeur d'appartenance). (Figure4.2)

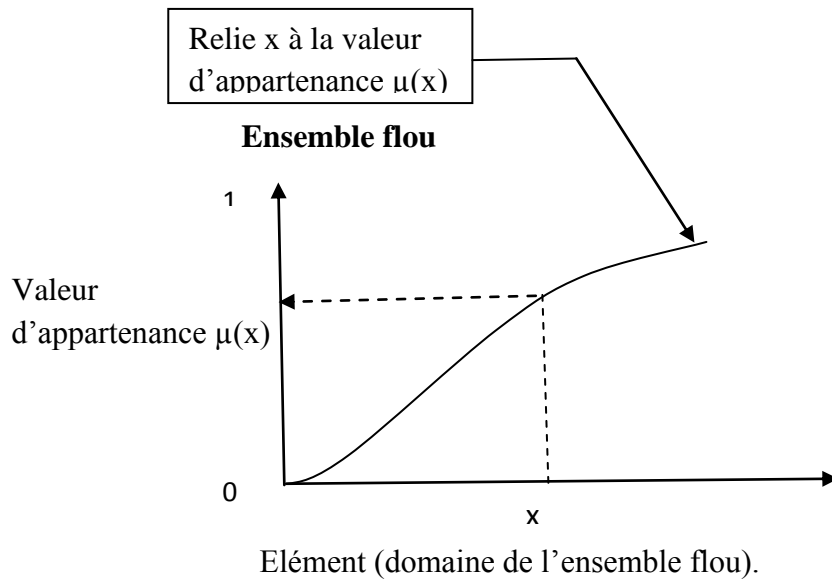


Figure 4.2 Structure d'un ensemble flou

Une illustration classique d'ensemble flou est la notion de GRAND. En logique booléenne, nous devons décider qui grand, par exemple en disant « toute personne de plus de un mètre quatre-vingt ». Formellement, cela définit la fonction d'appartenance à l'ensemble :

$$\begin{aligned} \mu_{GRAND}(x) &= 1 \text{ si } x \geq 1,80 \\ &= 0 \text{ sin on} \end{aligned} \quad (4.1)$$

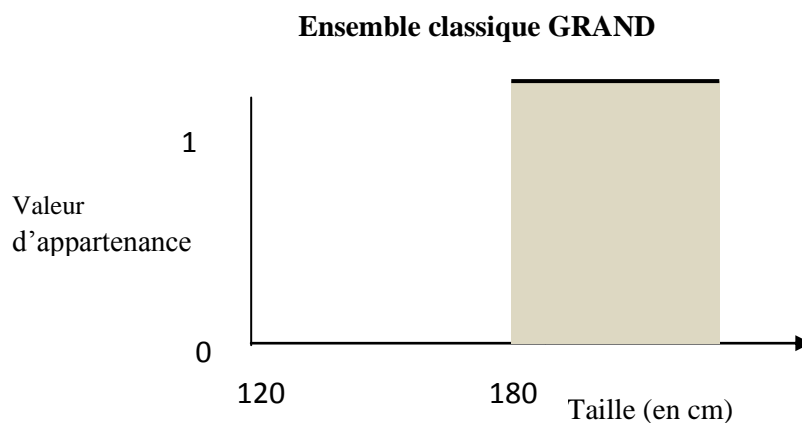


Figure 4.3 Le concept de GRAND en représentation classique

D'après la version classique, on constate que tout individu de plus de 1,80 m est GRAND. Il n'y a pas de « degré de grandeur ». Si la taille de quelqu'un est de 1,75 m, donc il est petit et s'il a exactement 1,80 m, donc il est GRAND. Dans un ensemble flou, néanmoins l'appartenance admet des degrés. Un ensemble flou indique dans quelle mesure quelque chose en fait partie. La figure suivante montre que le concept de GRAND en tant qu'ensemble flou.

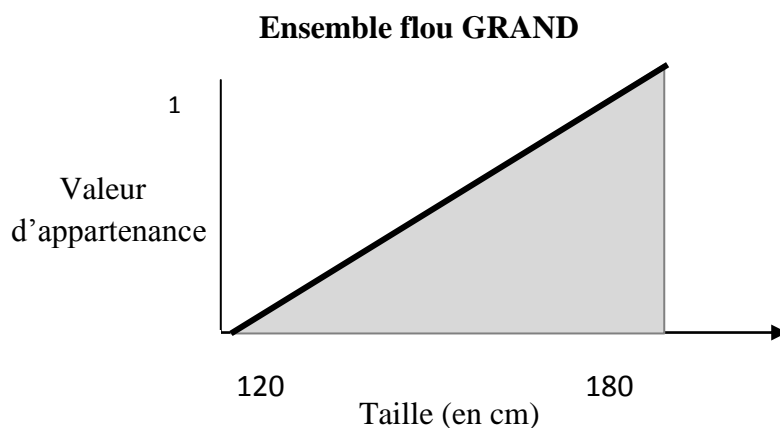


Figure 4.4 Le concept de GRAND en représentation flou

Nous pouvons constater que quelqu'un de 1,20 m n'est absolument pas GRAND. Alors quelqu'un de 1,90 m est parfaitement représentatif du concept. Les tailles intermédiaires ont des valeurs d'appartenance différentes à l'ensemble GRAND. Ces valeurs d'appartenance nous indiquent dans quelle mesure une taille donnée est compatible avec la notion de GRAND. Ainsi que l'on peut voir aussi sur cet exemple, les ensembles flous n'ont rien d'absolu et dépendent de la sémantique du modèle. La notion GRAND n'est pas la même pour un homme que pour une femme, pour un japonais que pour un américain.

4-4 Applications

Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique floue sont les suivants :

- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs,...etc.),
- Systèmes audio-visuels (appareils de photos (autofocus, caméscope à stabilisateur d'image, photocopieurs,...),
- systèmes automobile embarqués (ABS, suspension, climatisation,...etc.),
- système de transport (train, métro, ascenseur,...),

- système de décision, diagnostic, reconnaissance,
- système de contrôle /commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation,
- traitement de produit et déchet, production du fer et de l'acier, purification, de l'eau, chaînes et robots de fabrication,...
- instrumentation : capteurs, instruments de mesure, reconnaissance de voix et de caractère,
- ordinateurs : opérateur, unités arithmétique, micro-ordinateurs,...
- traitement d'information : bases de données, recherche d'information, modélisation de systèmes.

4-5 Bases générales de la logique floue

Les éléments de base de la logique floue sont :

- Les variables linguistiques,
- La définition des variables linguistiques par des fonctions d'appartenance ;
- Les déductions floues (inférences),
- Les opérateurs flous.

4-5-1 Variables linguistiques

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme :

Chaud, petit, grand, lent, rapide, froid, etc.

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonction d'appartenance.

4-5-1-1 Définition des variables linguistiques par des fonctions d'appartenance

A fin de permettre un traitement numérique des variables linguistique, il est indispensable de les définir à l'aide des fonctions d'appartenance. A chaque variable linguistique, on associe de fonction d'appartenance μ . La fonction d'appartenance est désignée par $\mu_E(x)$ L'argument x se rapporte à la variable linguistique. E représente l'ensemble flou concerné.

Les fonctions généralement utilisées sont :

➤ Fonctions triangulaires

L'allure est complètement définie par trois points p_1 , p_2 et p_3 .

$$\mu(x) = \left(\min \left(\frac{x - p_1}{p_2 - p_1}, \frac{p_3 - x}{p_3 - p_2} \right), 0 \right) \quad (4.2)$$

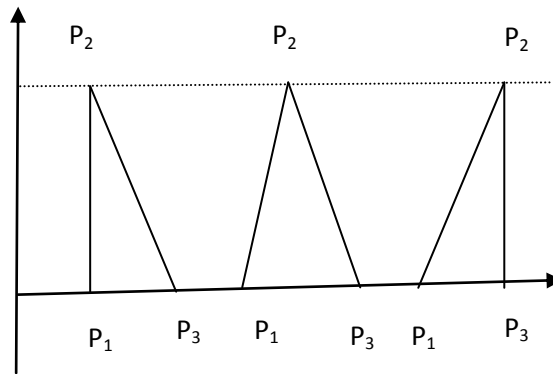
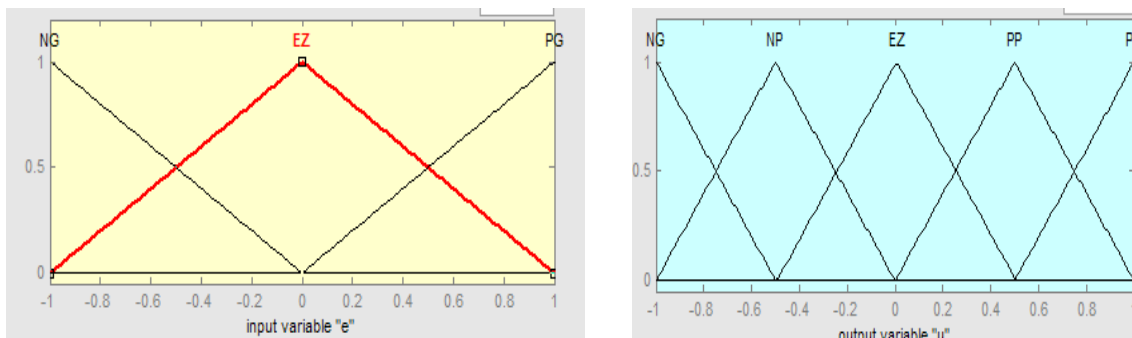


Figure 4.5 Fonctions d'appartenance de forme triangulaire



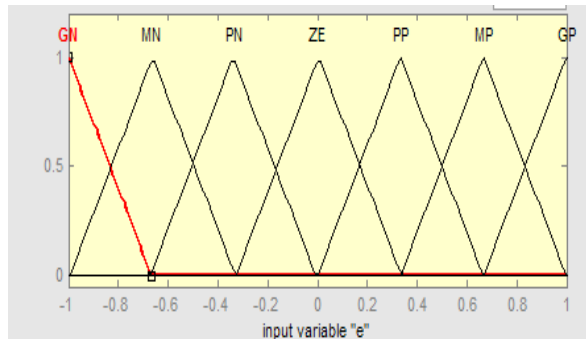


Figure 4.6 Fonctions d'appartenance de forme triangulaire avec trois, cinq et sept ensembles flous respectivement.

➤ **Fonctions trapézoïdales**

Elles sont définies par quatre points : p_1, p_2, p_3, p_4

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-p_1}{p_2-p_1}, 1, \frac{p_4-x}{p_4-p_3}\right), 0\right) \quad (4.3)$$

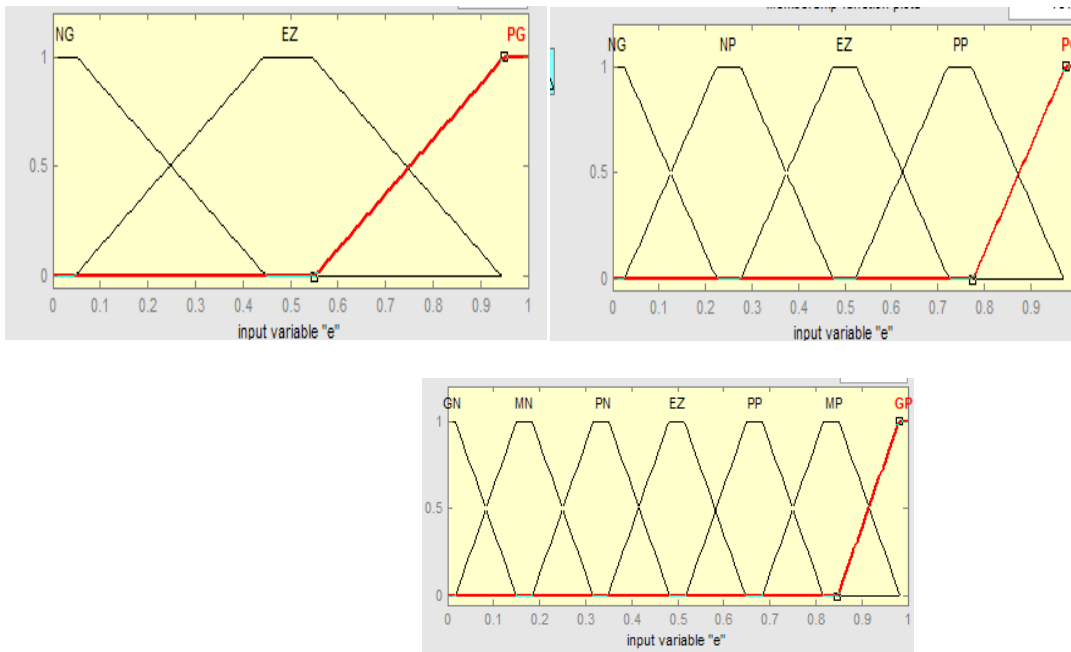


Figure 4.7 Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale avec trois, cinq et sept ensembles flous respectivement.

➤ **Fonctions rectangulaires**

La forme rectangulaire est comprise dans le trapèze si les deux points (p₁, p₂) et les deux derniers points (p₃, p₄) se trouvent sur une verticale.

➤ **Fonctions en forme de cloche**

Une première possibilité peut être exprimée par :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{(x - x_0)^2}{a}}; \quad -\infty < X < +\infty \quad (4.4)$$

Une autre possibilité s'obtient comme suit :

$$\mu(x) = \frac{1 + \cos\left(\pi \frac{x - x_0}{2a}\right)}{2}; \quad x_0 - 2a \leq x \leq x_0 + 2a \quad (4.5)$$

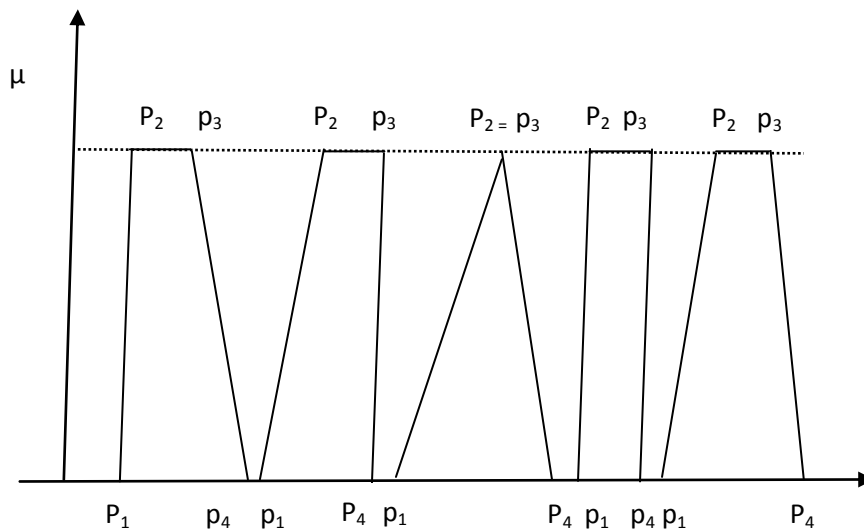


Figure 4.8 Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale avec formes triangulaires ou rectangulaires comme cas spéciaux.

4-5-2 Dédutions flous (Inférences)

En général, plusieurs valeurs de variables linguistiques, convenablement définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions.

On parle alors de déductions flous, ou inférences. On peut distinguer grosso modo deux genres de règles d'inférences :

- Inférence avec une seule règle.
- Inférence avec plusieurs règles.

Dans beaucoup d'applications, ces deux cas sont combinés.

Opération : =SI conditions 1, ALORS opération 1, OU

SI conditions 2, ALORS opération 2, OU

-
-
-

SI condition m, ALORS opération m.

4-5-2-1 Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs « ET » et « OU ». Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenances représentant les variables linguistique. De plus, il existe un opérateur Non (complément à un, négatif, inverse). Les règles de calcul pour ces opérateurs sont bien connues dans le cas de la logique classique.

Le plus souvent, les opérateurs « ET » et « OU » sont réalisés respectivement par les règles « min » et « max ». Il y a alors une certaine affinité avec les règles de la logique classique.

1)-Opérateur NON (complément)

Il est défini mathématiquement par :

$$\bar{A} = \{x / x \notin A\}$$

Et représenté par la fonction :

$$\text{non} (\mu_A(x)) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.6)$$

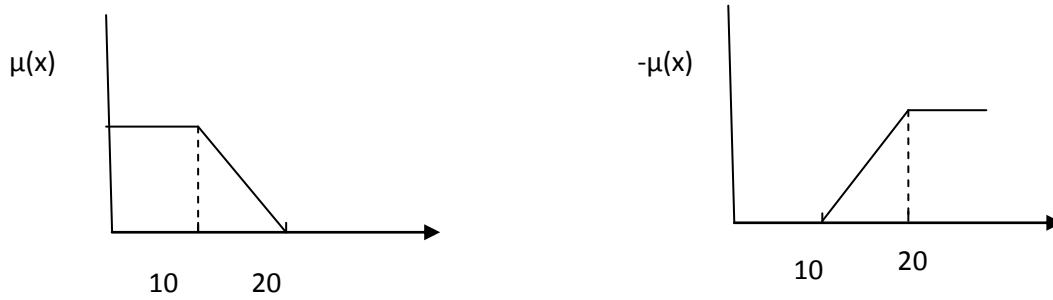


Figure 4.9 Opérateur NON

1) 1)-Opérateur ET (intersection)

Il est mathématiquement par :

$$A \cap B = \{x / x \in A \cap x \in B\}$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plus part des cas par la formation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A ET B tel que :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_C(x) \tag{4.7}$$

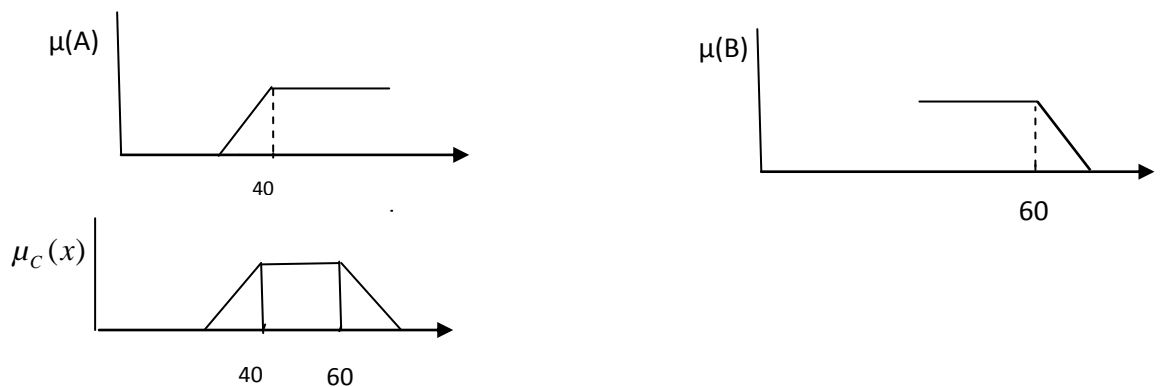


Figure 4.10 Opérateur ET, réalisé par la formation du minimum.

2)-Opérateur OU (union)

Il est défini mathématiquement par :

$$A \cup B = \{x / x \in A \cup x \in B\}$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des ensembles A et B, à savoir :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_C(x) \quad (4.8)$$

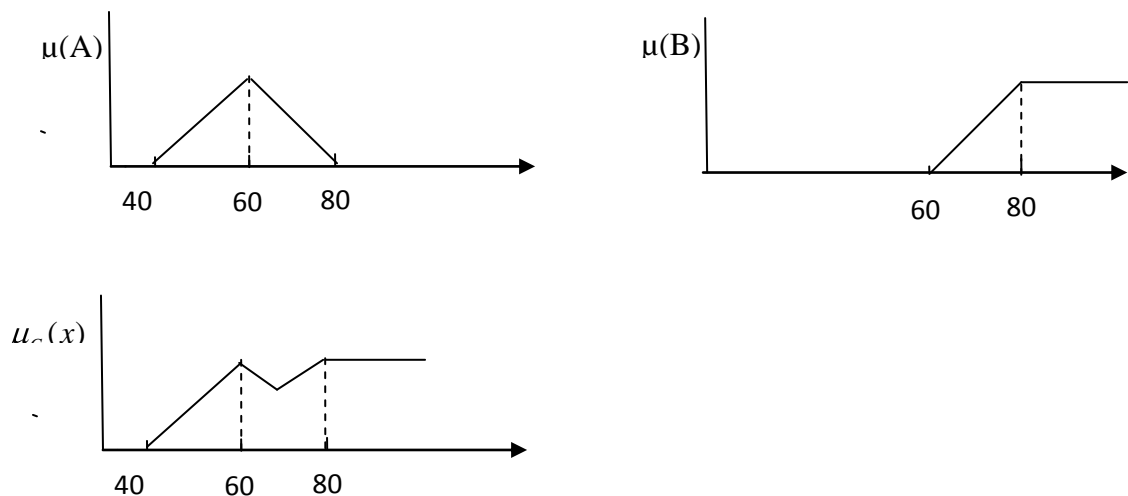


Figure 4.11 Opérateur OU, réalisé par la formation du maximum.

Dans la plus part des cas, les opérateurs « ET » et « OU » donnent des résultats convenables, surtout dans le modèle flou de Mamdani. Cependant, dans certaines circonstances, il peut être judicieux d'utiliser d'autres réalisations. Comme la formation des opérateurs arithmétiques (somme, produit), introduite dans le modèle flou de Takagi-Sugeno. Cela dépend du système physique à étudier et du modèle flou utilisé, et de la méthode d'inférence introduite [19].

4-5-2-2 Autres opérateurs de la logique floue

4-5-2-2-1 Opérateurs ET et OU, réalisé par opérations arithmétiques

Souvent, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit appliqué aux fonctions d'appartenance, suivant la relation :

$$\mu_C(x) = \mu_a(x)\mu_b(x) \quad (4.9)$$

Il s'agit de l'opérateur produit.

Le résultat de cette opération est montré à la figure 4.10. La fonction d'appartenance résultante est toujours inférieure ou égale à 1.

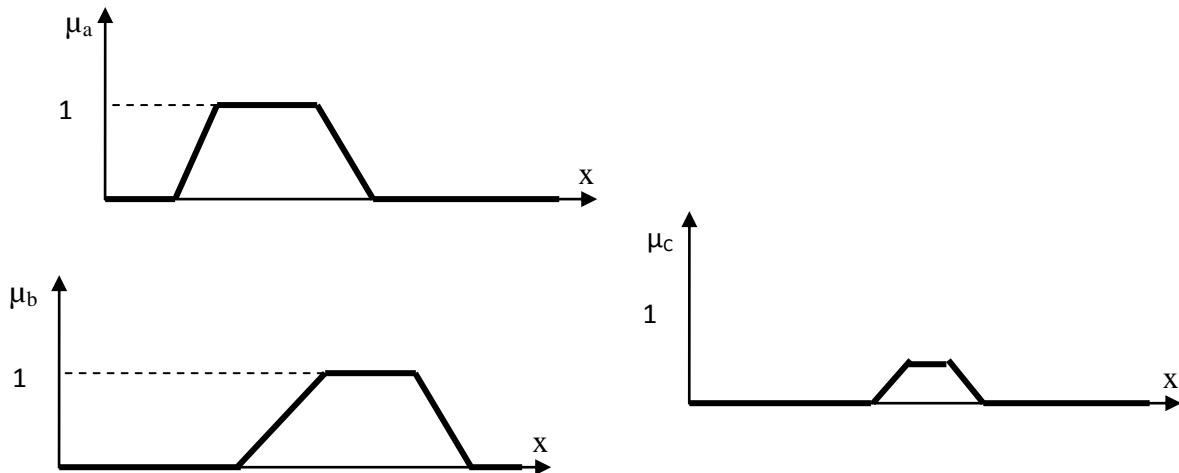


Figure 4.12 Opérateur ET, réalisé par la formation du produit.

Par contre, l'opérateur OU peut se réaliser par la formation de la somme des fonctions d'appartenance ou plus précisément par la valeur moyenne, tel que :

$$\mu_c(x) = \left[\mu_a(x) + \mu_b(x) \right] / 2 \quad (4.10)$$

Le résultat de cet opérateur est représenté à la figure 4.11

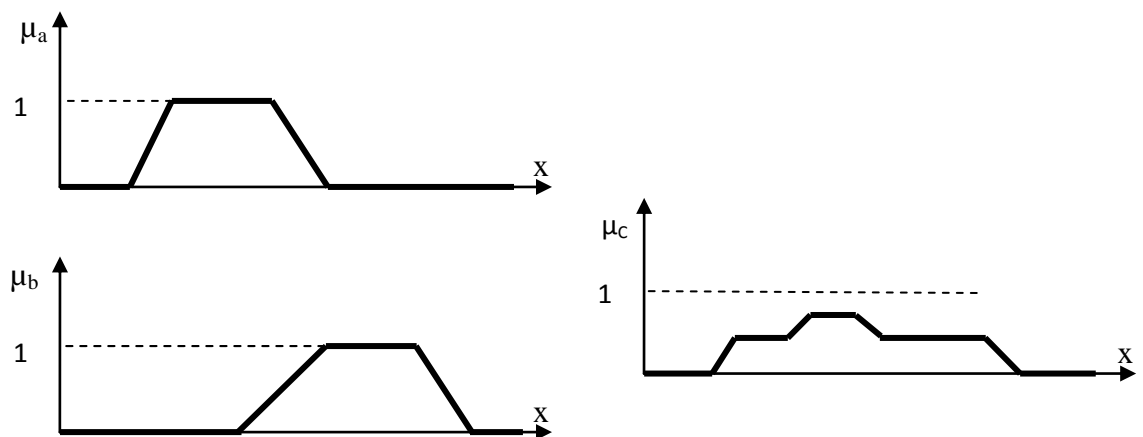


Figure 4.13 Opérateur OU réalisé par la valeur moyenne

4-6 Principe de fonctionnement [27]

Le principe de fonctionnement d'un système flou est simple. Celui-ci se décompose de trois étapes distinctes

4-6-1 Fuzzification ou quantification floue

Opération qui permet de transformer une entrée numérique en une partie floue. Pour une variable linguistique $(V, T(V), X)$, on parle de fuzzification numérique si la partie floue, résultat de la fuzzification, est définie sur l'univers X et de fuzzification symbolique si la partie floue est définie sur $T(V)$.

Cette première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état. Celui-ci est déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définies dans le système.

Les fonctions d'appartenances, qui utilisent en général entre trois et sept états flous pour chaque variable, possèdent différentes formes : en triangles, en cloche ou encore en trapèze.

4-6-2 Inférence

Le degré d'appartenance de chaque variable à chaque état permettant d'appliquer les règles floues qui ont été préalablement définies le degré d'appartenance des variables de sortie à chaque état est ainsi obtenu.

L'inférence est une opération qui transforme une partie floue en une autre partie floue. La règle compositionnelle de Zadeh est utilisée pour ce calcul. Pour ce faire, une relation floue doit être définie.

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

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont : Max-Produit, somme-produit et Max-Min (implication de Mamdani), cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur «ET » par la fonction « Min » et la liaison entre toutes les règles (opérateur « OU ») par la fonction Max.

4-6-3 Défuzzificaton

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzificaton. Etant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande Ucm précis à son entrée, il faut donc prévoir une information déterminée (physique), cette information est assurée par le bloc de défuzzification. Ce même bloc réalise la défuzzification (conversion digital/ analogique). Plusieurs stratégies de défuzzification peuvent être utilisées ; parmi les quelles on trouve :

- Méthode de défuzzification par centre de gravité.
- Méthode de défuzzification par valeur maximale.
- Méthode de défuzzification par valeur moyenne des maximas.

1)-Méthode du centre de gravité

Cette méthode est la plus souvent utilisée et donne généralement les meilleurs résultats. Elle consiste à pendre comme solution l'abscisse du centre de gravité des fonctions d'appartenance résultante.

L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, $\mu_{res}(x)$ est donnée par la relation générale suivante :

$$X_r^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} x_i^* S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} S_i} \quad 4.11$$

$$\text{Avec : } S_i = \int_{-1}^1 \mu_{oi}(X_r) dX_r \quad 4.12$$

$$\text{et : } X_r^* = \frac{1}{S} \int_{-1}^1 X_r \mu_{oi}(X_r) dX_r \quad 4.13$$

Par comparaison avec la méthode du maximum, les résultats favorisés sont biens plus stable vis-à-vis de variation minimales du sous-ensemble floue solution. Mais en contre partie, elle exige une plus grande puissance de calcul. Il apparait que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification ne devient long et coûteux [28].

La méthode des hauteurs pondérées n'est rien d'autre qu'un cas particulier des fonctions d'appartenance sans chevauchement.

Dans ce cas toutes les surfaces SE des fonctions d'appartenance sont uniformisées et prises égale à 1.

L'abscisse du centre de gravité se réduit à l'expression suivante :

$$X_r^* = \frac{\sum \mu_{ce} X_E^*}{\sum \mu_{CE}} \quad 4.14$$

2) Défuzzification par valeur maximale

La méthode de défuzzification par centre de gravité exige en général une envergure de calcul assez importante. Par conséquent, il sera utile de disposer d'une méthode plus simple quelque fois on fait appel à la méthode de défuzzification par valeur maximale. Le principe de cette méthode réside dans le choix l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante. Cependant, cette méthode présente un inconvénient. Lorsque l'abscisse de la valeur maximale est limitée entre X_{r1} et X_{r2} . (fig.) ; toutes les valeurs comprises entre ces deux limites peuvent êtres utilisées .Cette méthode n'est pas donc recommandable par le réglage par logique floue.

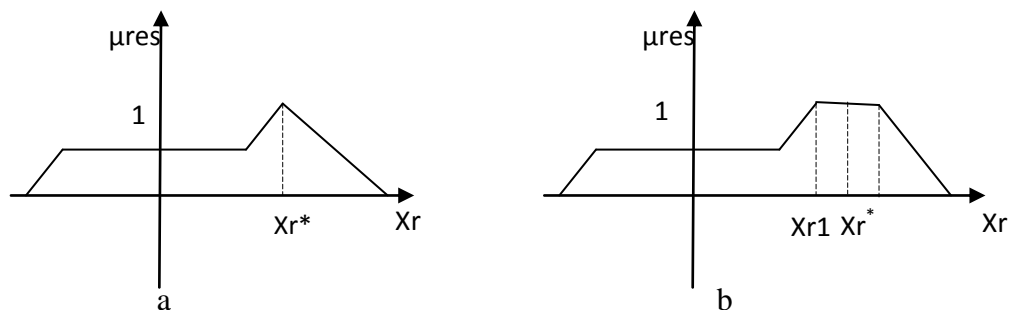


Figure 4.14 Défuzzification par valeur maximale

3) Défuzzification par la valeur moyenne des maximas

Pour éviter l'indétermination présentée lors de la méthode par valeur maximale, on fait appel à la méthode de défuzzification par valeur moyenne des maximas. Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne des abscisses de toutes les fonctions d'appartenance maximales. Cependant, cette méthode présente également un grand inconvénient qui réside dans le saut du signal de sortie si la dominante change d'une fonction d'appartenance partielle à une autre. Figure (4.13). Par conséquent, ce comportement provoque un mauvais comportement du circuit de réglage.

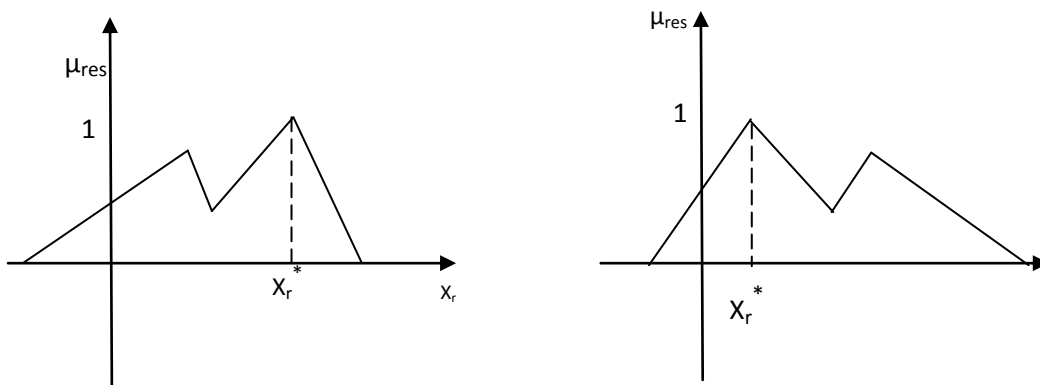


Figure 4.15 Discontinuité lors de la défuzzification par valeur maximale

4-7 Réglage par logique floue

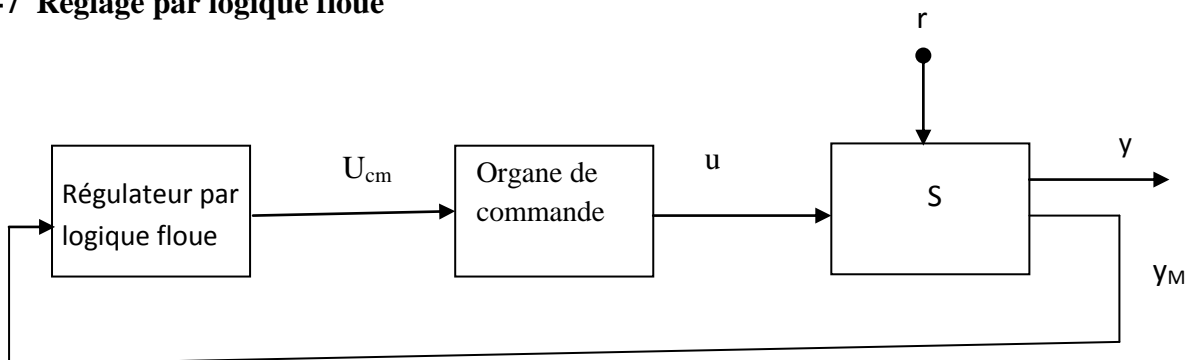


Figure 4.16 Structure générale d'un réglage par logique flou

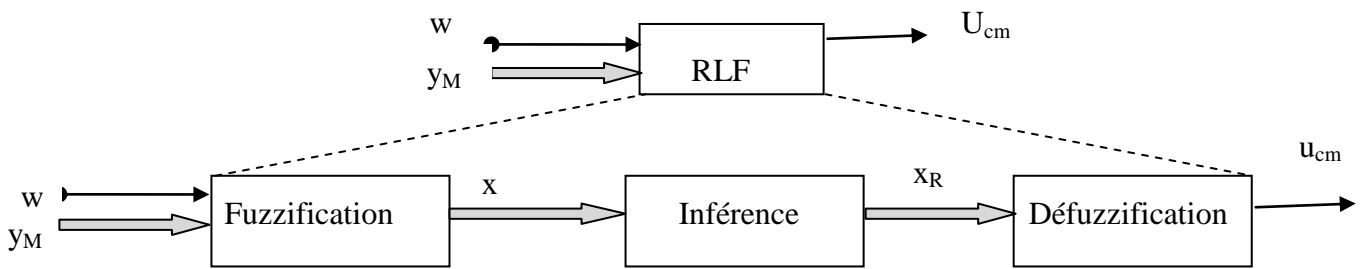


Figure 4.17 Configuration interne d'un régulateur par logique floue

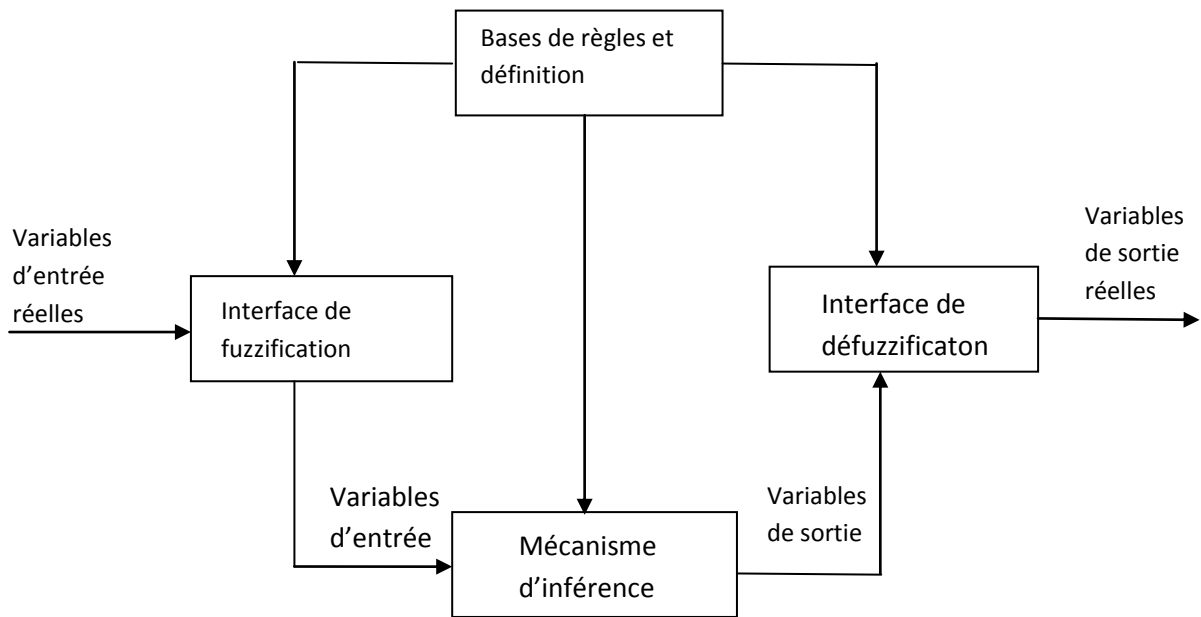


Figure 4.18 Schéma général d'une commande floue

4-7-1 Méthodes d'inférence

Pour le réglage par la logique floue, il est utilisé en général une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence max-min,
- Méthode d'inférence max-prod,
- Méthode d'inférence somme-prod.

Elles permettent un traitement numérique des inférences.

Afin de mettre en évidence le traitement numérique, on fera appel à un cas particuliers avec deux variables d'entrée x_1 et x_2 et une variable de sortie x_R . Chacune est décomposée en trois ensembles NG, EZ, PG et définie par des fonctions d'appartenance, comme le montre la

figure 4.17 .Pour les variables d'entée, on suppose que les valeurs numériques sont $x_1 = 0.44$ et $x_2 = -0.67$.

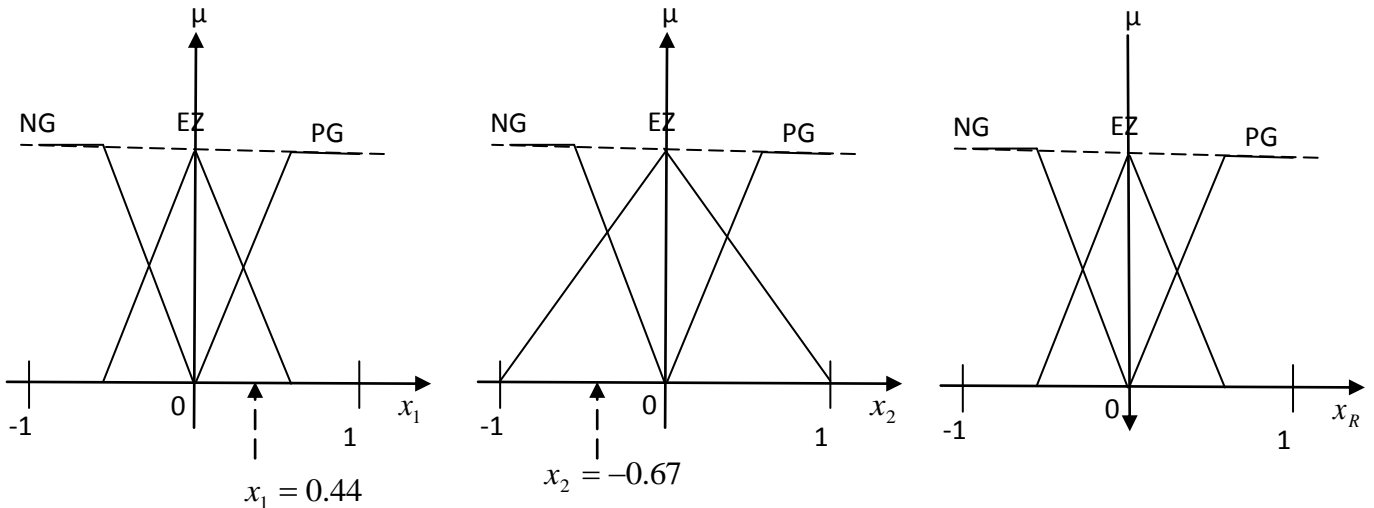


Figure 4.19 Fonction d'appartenance pour la description des méthodes d'inférence.

L'inférence est composée de deux règles :

$x_R := \text{SI} (x_1 \text{ PG ET } x_2 \text{ EZ}), \text{ ALORS } x_R := \text{EZ}, \text{ OU}$

$\text{SI} (x_1 \text{ EZ ET } x_2 \text{ NG}), \text{ ALORS } x_R := \text{NG}.$

4-7-1-1 Méthode de d'inférence MAX-MIN (Méthode de Mamdani)

La méthode d'inférence MAX-MIN introduite par « Alors », qui est réalisé par la formation du minimum. Enfin, l'opérateur « OU » lie les différentes règles, réalisé par la formation du maximum.

La figure 4-18 représente graphiquement le principe de la méthode d'inférence max-min.

La condition $x_1 \text{ PG ET } x_2 \text{ EZ}$ de la première règle implique pour $x_1 = 0.44$ et $x_2 = -0.67$ les facteurs d'appartenance $\mu_{\text{PG}}(x_1 = 0.44) = 0.67$ et $\mu_{\text{EZ}}(x_2 = -0.67) = 0.33$, ce qui implique que la condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{c_1} = 0.33$, (minimum des deux valeurs à cause de l'opérateur ET). La fonction d'appartenance $\mu_{\text{ZE}}(x_R)$ pour la variable de sortie est donc

écrêtée à 0.33 (à cause de la formation du minimum lié à ALORS). La fonction d'appartenance partielle $\mu_{R1}(x_R)$ pour x_R est mise en évidence par un trait renforcé.

La deuxième règle implique par une condition ($x_1 EZ$ ou $x_2 NG$) les facteurs d'appartenance $\mu_{EZ}(x_1 = 0.44) = 0.33$ et $\mu_{NG}(x_2 = -0.67) = 0.67$. Ainsi, la condition possède le facteur d'appartenance $\mu_{C2} = 0.67$ (maximum des deux valeurs à cause de l'opérateur OU). La fonction d'appartenance $\mu_{NG}(x_R)$ est donc écrêtée à 0.67 (à cause de la formation du minimum liée à ALORS). La fonction d'appartenance partielle $\mu_{R2}(x_R)$ est également mise en évidence par un trait renforcé.

Puisque chacune des règles exige une intervention, il faut encore déterminer la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_R)$. Elle s'obtient par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance partielles, étant donné que les deux règles sont liées par l'opérateur OU. Cette fonction d'appartenance résultante est hachurée à la figure 4.19

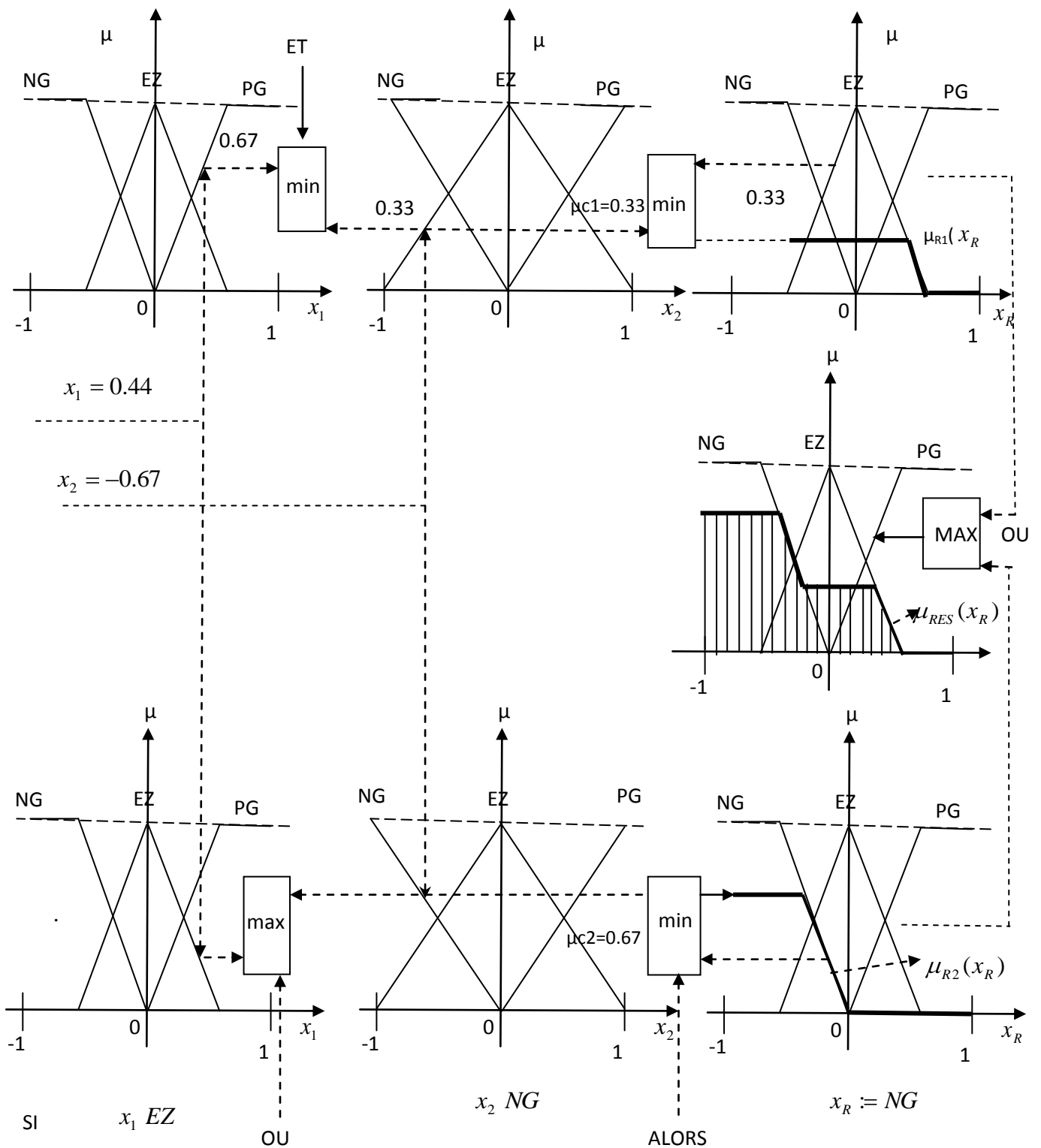


Figure 4.20 Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrée et deux règles.

4-7-1-2 Méthode d'inférence : MAX-PRODUIT (*Méthode de LARSEN*)

La méthode d'inférence MAX-PRODUIT (méthode de LARSEN), réalise en général au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur « ET » par la formation du minimum. Par contre la conclusion 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.

Comme on le voit, le OU, liant les règles est réalisé par la formation du maximum et le ALORS est réalisé par la formation du produit, d'où la désignation de cette méthode d'inférence par max-prod.

La représentation graphique de principe de la méthode d'inférence max-prod se trouve à la figure (4.20).

Comme dans le cas du paragraphe précédent, la première condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{C1} = 0.33$. La fonction d'appartenance $\mu_{EZ}(x_R)$ pour la variable de sortie est cette fois-ci multipliée par ce facteur (à cause de la formation du produit lié à ALORS). Cette fonction d'appartenance partielle $\mu_{R1}(x_R)$ est mise en évidence par un trait renforcé.

La deuxième condition possède le facteur d'appartenance $\mu_{C2} = 0.67$, comme dans le paragraphe précédent. La fonction d'appartenance $\mu_{NG}(x_R)$ est multipliée par ce facteur (formation du produit), et l'on obtient la fonction d'appartenance partielle $\mu_{R2}(x_R)$.

La fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_R)$ s'obtient également par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance partielles, réalisant ainsi l'opérateur OU.

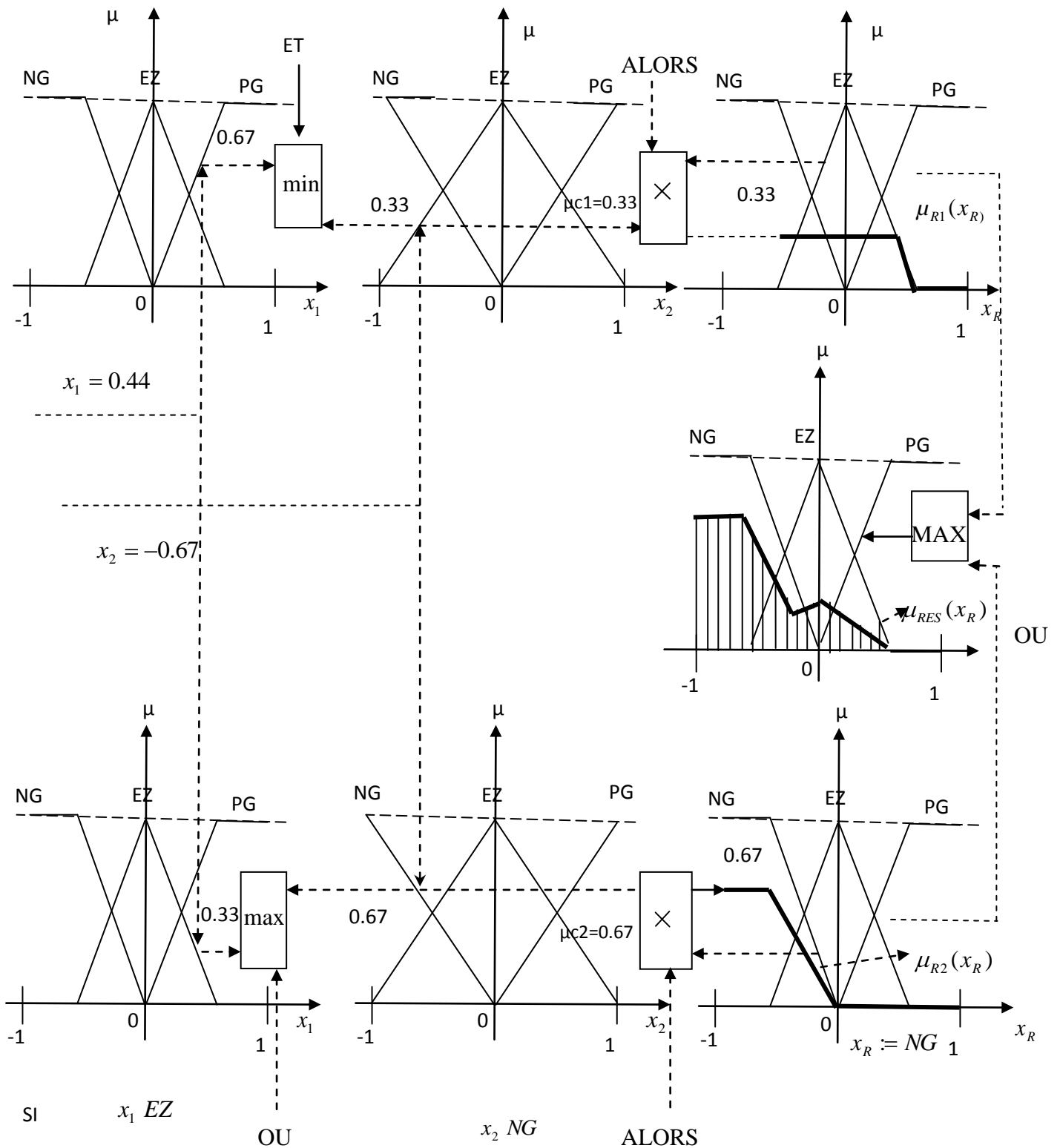


Figure 4.21 Méthode d'inférence max-prod pour deux variables d'entrée et deux règles.

4-7-1-3 Méthode d'inférence somme-produit (Méthode de SUGENO)

La méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle, procédée par ALORS, liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur ET, est réalisée par la formation de la somme, donc de la valeur moyenne.

Dans ce cas, le OU liant les règles est réalisé par la formation de la somme et le ALORS est réalisé par la formation du produit.

La méthode d'inférence somme- produit est représentée graphiquement à la figure (4.21).

Avec les facteurs d'appartenance $\mu_{PG}(x_1 = 0.44) = 0.67$ et $\mu_{EZ}(x_2 = -0.67) = 0.33$, la première condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{C1} = 0.22$ (produit de deux valeurs).

La fonction d'appartenance $\mu_{EZ}(x_R)$ pour la variable de sortie est multipliée par ce facteur (puisque le ALORS est réalisé la formation du produit). On obtient ainsi la fonction d'appartenance partielle $\mu_{R1}(x_R)$.

La condition de la deuxième règle possède le facteur d'appartenance $\mu_{C2} = 0.5$, à cause de la formation de la somme des deux facteurs d'appartenance

$\mu_{EZ}(x_1 = 0.44) = 0.33$ et $\mu_{NG}(x_2 = -0.67) = 0.67$ pour l'opérateur OU. Ainsi, la fonction d'appartenance $\mu_{NG}(x_R)$ est multipliée par le facteur $\mu_{C2} = 0.5$. il en résulte ainsi la fonction d'appartenance partielle $\mu_{R2}(x_R)$.

La fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_R)$, hachurée à la figure (4.21), s'obtient par la formation de la somme des deux fonctions d'appartenance partielle.

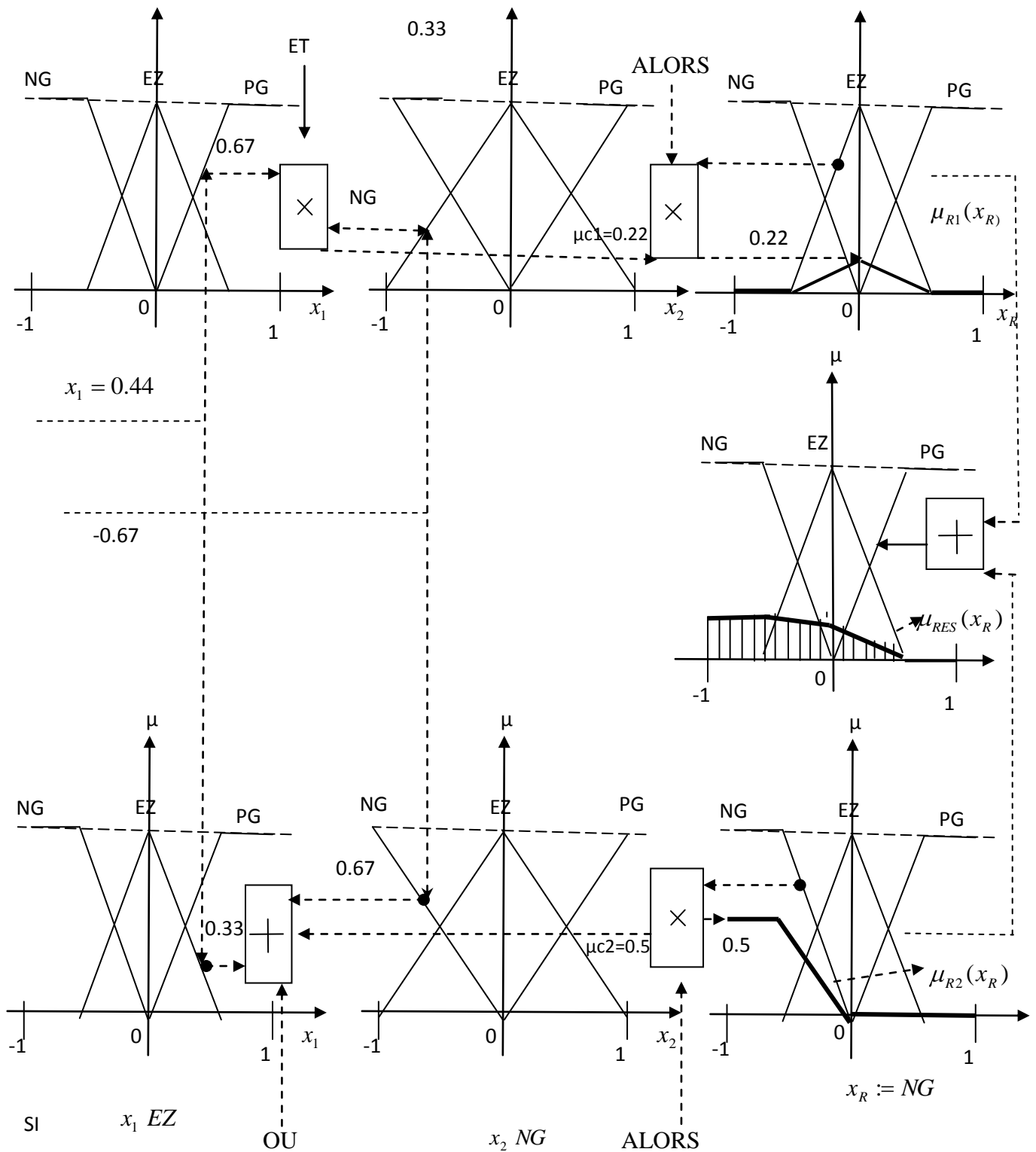


Figure 4.22 Méthode d'inférence somme-prod pour deux variables d'entrée et deux règles.

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma ci-après proposé par Mamdani :

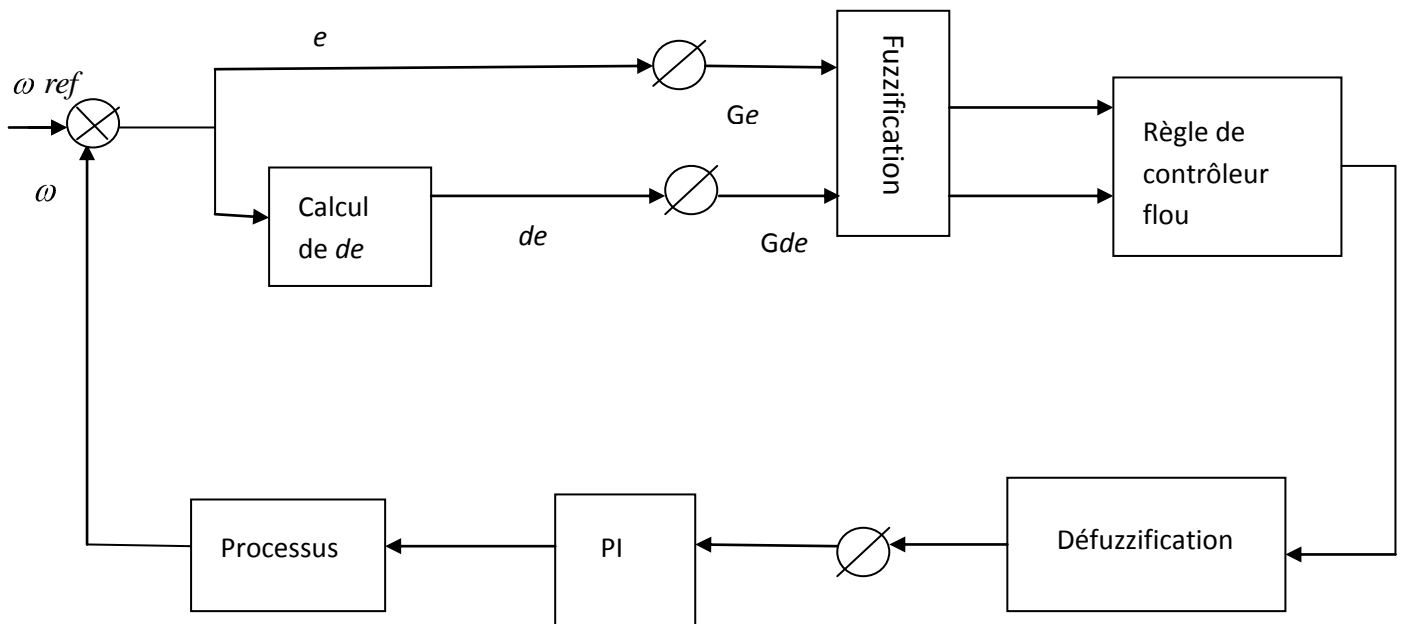


Figure 4.23 Schéma de régulateur flou de Mamdani.

Le système est composé :

1-de processus à contrôler.

2-du contrôleur flou qui comprend :

-un bloc de calcul de variation de l'erreur e au cours de temps,

-des facteurs d'échelle associés à l'erreur e , à la variation de la commande U_{cm} ,

-des règles de contrôle flou,

-un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation,

-d'un bloc d'inférence,

-un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande floue en valeur physique.

4-7-2 Différents types de RLF

Dans le cas de la régulation de vitesse, les régulateurs les plus utilisés sont les RLF de types PD, PI et PID.

4-7-2-1 Régulateur flou de type PD

C'est un régulateur flou de type standard auquel on rajoute un dérivateur à sa sortie et que l'on applique directement au processus à réguler.

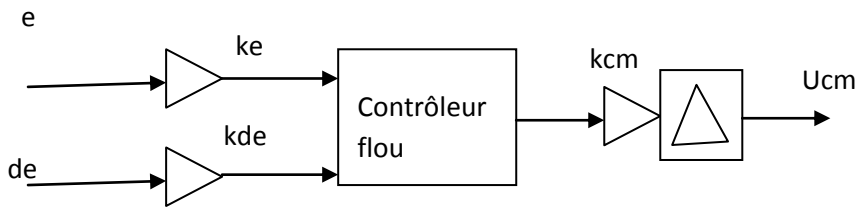


Figure 4.24 Contrôleur flou de type PD.

4-7-2-2 Régulateur flou de type PI

Si la sortie du régulateur est suivie d'un intégrateur, celui-ci est appelé contrôleur flou de type PI.

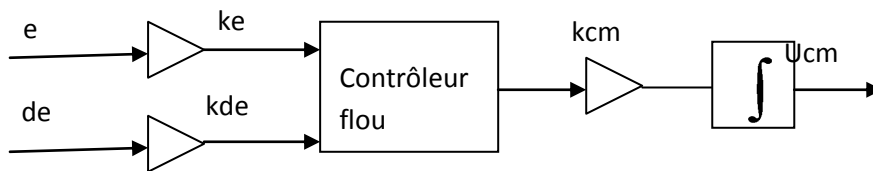


Figure 4.25 Contrôleur flou de type PI.

4-7-2-3 Régulateur flou de type PID

Le régulateur de type PID peut être obtenu en combinant des régulateurs de types PD et PI de façon suivante :

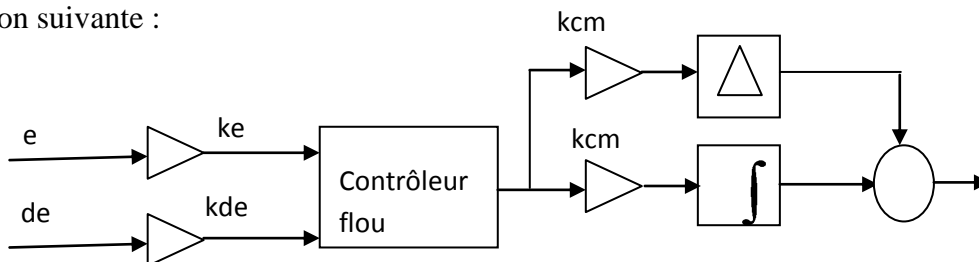


Figure 4.26 Contrôleur flou de type PID.

4-7-3 Structure de base d'une commande floue

L'observation du processus montre que les grandeurs les plus significatives pour le contrôle sont l'erreur de vitesse et la variation de cette erreur. On adoptera donc, pour les entrées du correcteur flou, ces deux grandeurs notées e et de . Quant à sa sortie celui-ci correspondant à la valeur du couple de référence C_{emref} . Cette configuration, analogue à celle d'un PI conventionnel, est souvent qualifiée par un PI flou.

La configuration de la boucle de vitesse est illustrée par la figure (4.26).

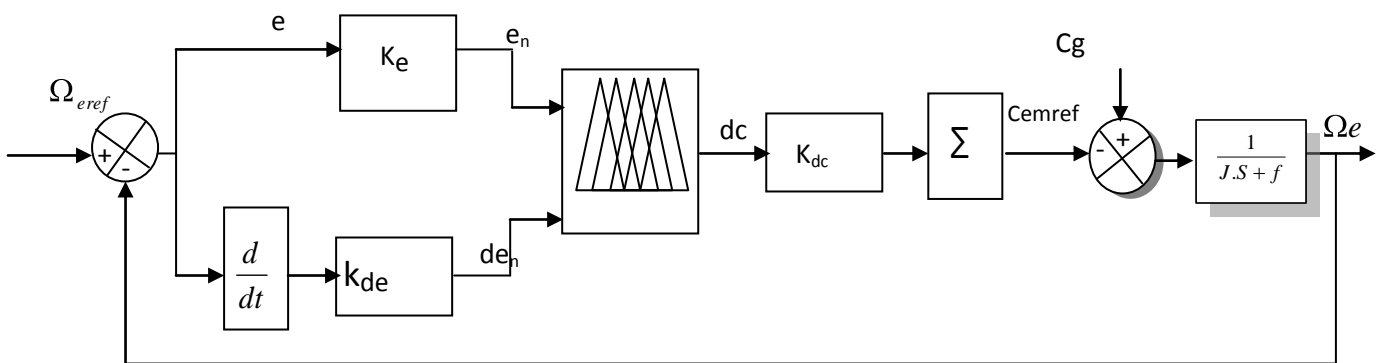


Figure 4.27 Schéma synoptique d'un régulateur flou de vitesse.

Avec :

e : l'erreur tel que : $e(k) = \Omega_{eref}(k) - \Omega_e(k)$.

de : la variation de l'erreur : $de(k) = e(k) - e(k-1)$

dc : l'incrément de la commande à la sortie du régulateur :

k_e, k_{de}, k_{dc} : des gains associés à e, de et dc respectivement. On les appelle facteurs d'échelle.

Les grandeurs indicées « n » sont les grandeurs normalisées à la sortie du régulateur flou [26].

Nous allons expliciter les notations des ensembles flous utilisés pour fuzzifier les trois variables précédentes en utilisant soit, trois, cinq ou sept ensembles flous :

➤ Pour trois ensembles flous :

-N: Négatif ;

-Z : Zéro ;

-P : Positif.

➤ Pour cinq ensembles flous :

-NG : Négatif Grand ;

-NP : Négatif Petit ;

-EZ : Environ Zéro ;

-PG : Positif Grand ;

- PP : Positif Petit.

➤ Pour sept ensembles flous :

-NG : Négatif Grand ;

-NP : Négatif Petit ;

-NM : Négatif Moyen ;

-EZ : Environ Zéro ;

-PG : Positif Grand ;

- PM : Positif Moyen ;

- PP : Positif Petit.

Ces ensembles flous peuvent être représentés par les matrices d'inférence suivantes :

de \ e	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Figure 4.28 Matrice d'inférence pour trois ensembles flous

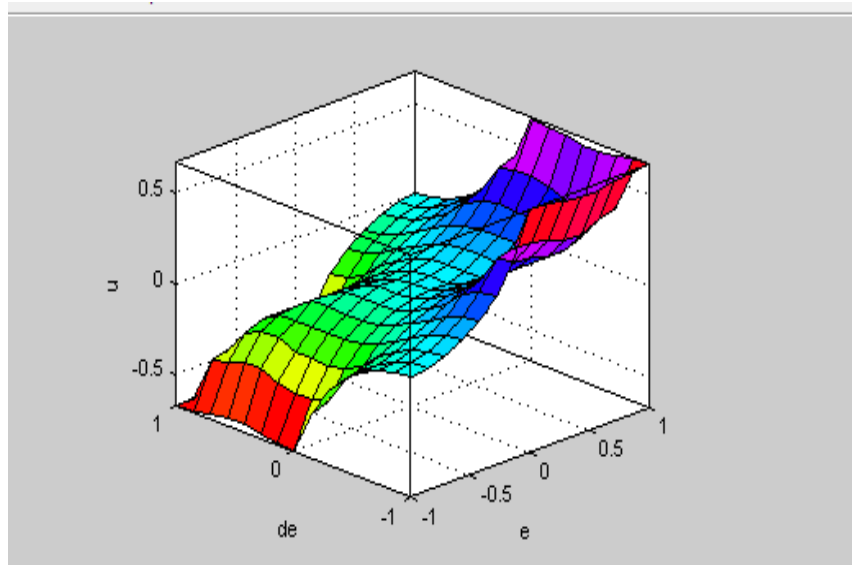


Figure 4.29 Représentation dans l'espace d'état tridimensionnel pour trois ensembles flous

de \ e	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	EZ
NP	NG	NP	NP	EZ	PP
ZE	NG	NP	EZ	PP	PP
PP	NP	EZ	PP	PP	PG
PG	EZ	PP	PP	PG	PG

Figure 4.29 Matrice d'inférence pour cinq ensembles flous [32]

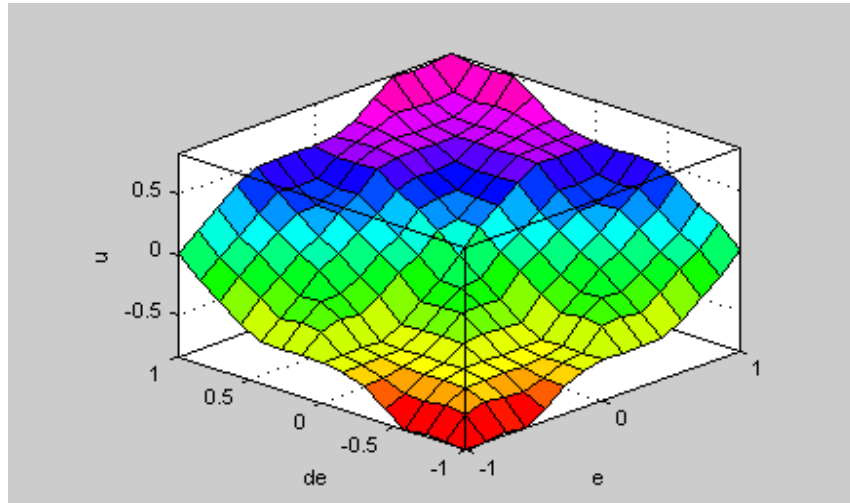


Figure 4.30 Représentation dans l'espace d'état tridimensionnel pour cinq ensembles flous

de \ e	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GN	GN	GN	MN	MN	PN	PN	ZE
MN	GN	MN	MN	PN	PN	ZE	PP
PN	MN	MN	PN	PN	ZE	PP	PP
ZE	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP
PP	PN	PN	ZE	PP	PP	MP	MP
MP	PN	ZE	PP	PP	MP	MP	GP
GP	ZE	PP	PP	MP	MP	GP	GP

Figure 4.31 Matrice d'inférence pour sept ensembles flous

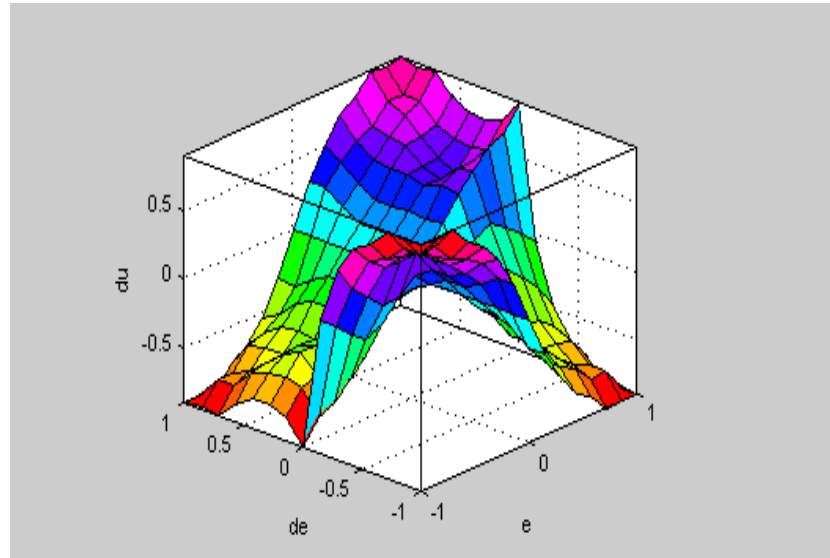


Figure 4.32 Représentation dans l'espace d'état tridimensionnel pour sept ensembles flous.

4-8 Résultats de simulation

De la même manière que pour le deuxième chapitre, nous avons simulé le système étudié en utilisant le régulateur PI par logique floue au lieu du régulateur PI classique afin d'assurer la MPPT pour le système éolien.

Dans le but d'avoir des meilleurs résultats, Nous avons opté pour trois méthodes : avec trois ensembles flou, cinq ensembles flous et sept ensembles flous.

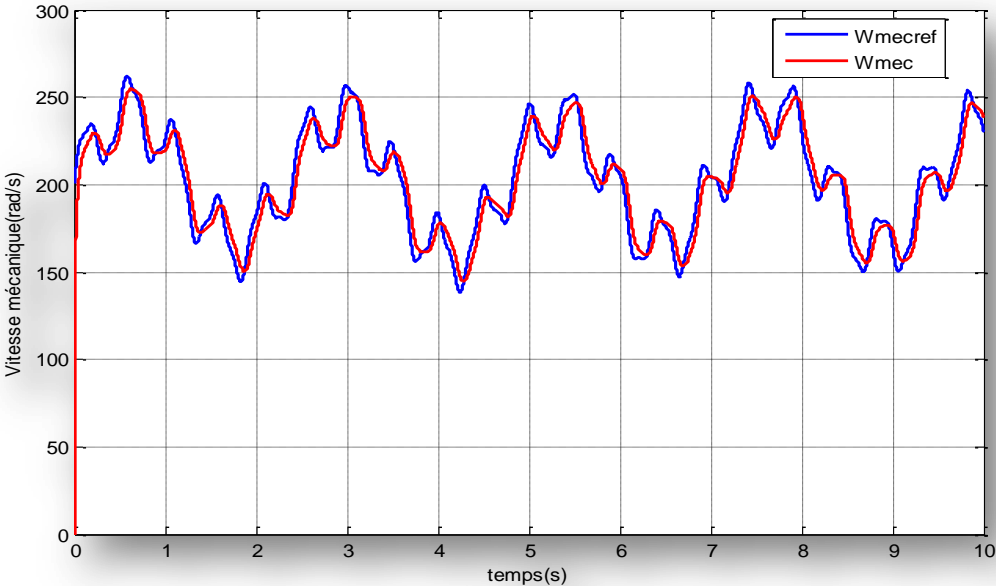


Figure 4.33 Evolution de la vitesse éolienne et se référence en utilisant trois ensembles flous.

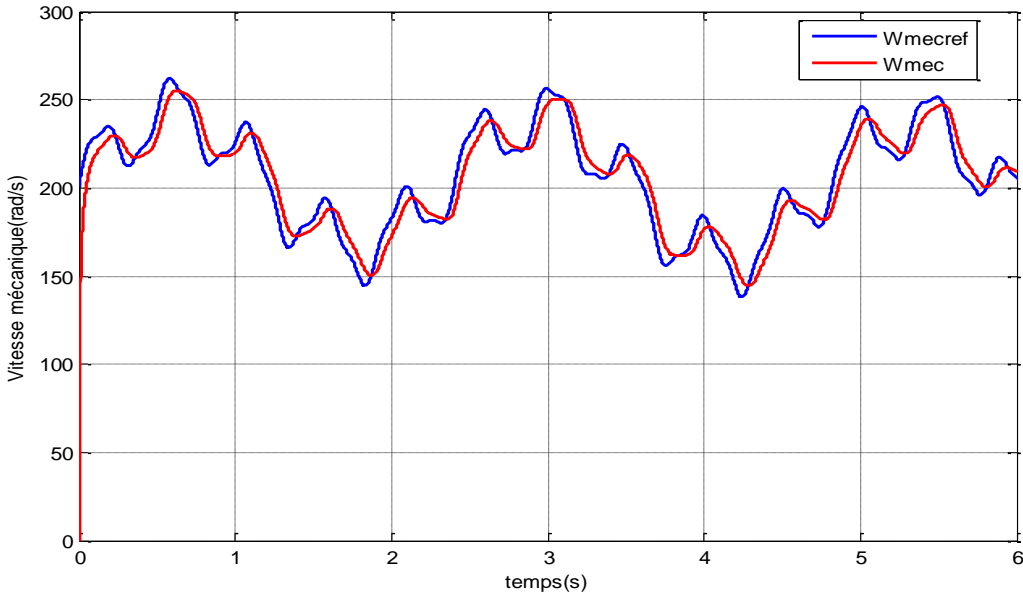


Figure 4.34 Zoom de la vitesse éolienne et sa référence

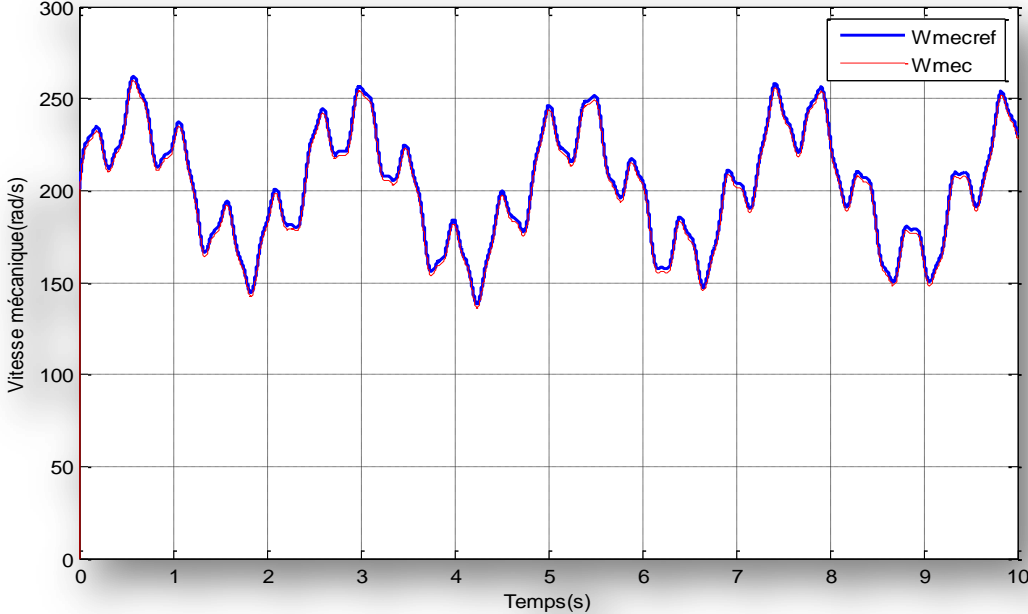


Figure 4.35 Evolution de la vitesse éolienne et se référence en utilisant cinq ensembles flou

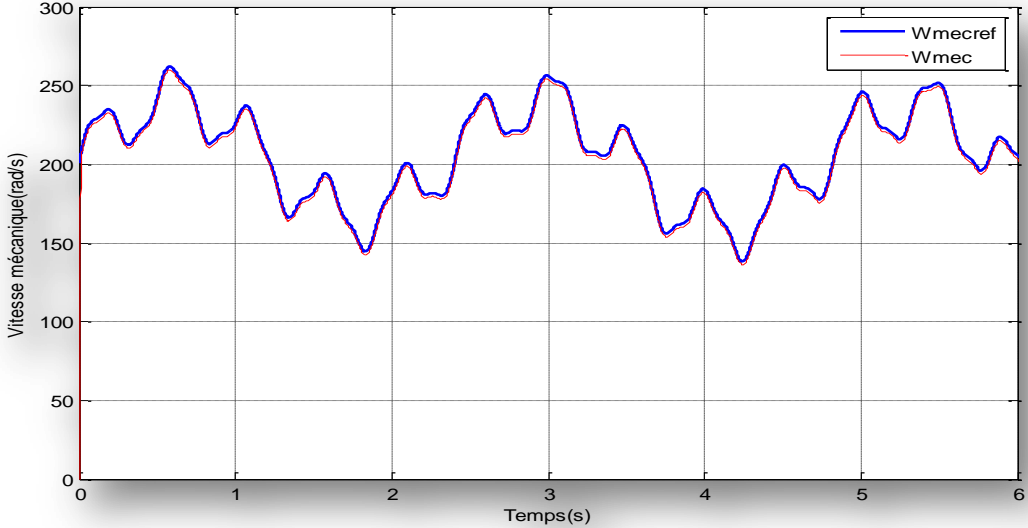


Figure 4.36 Zoom d e la vitesse éolienne et sa référence

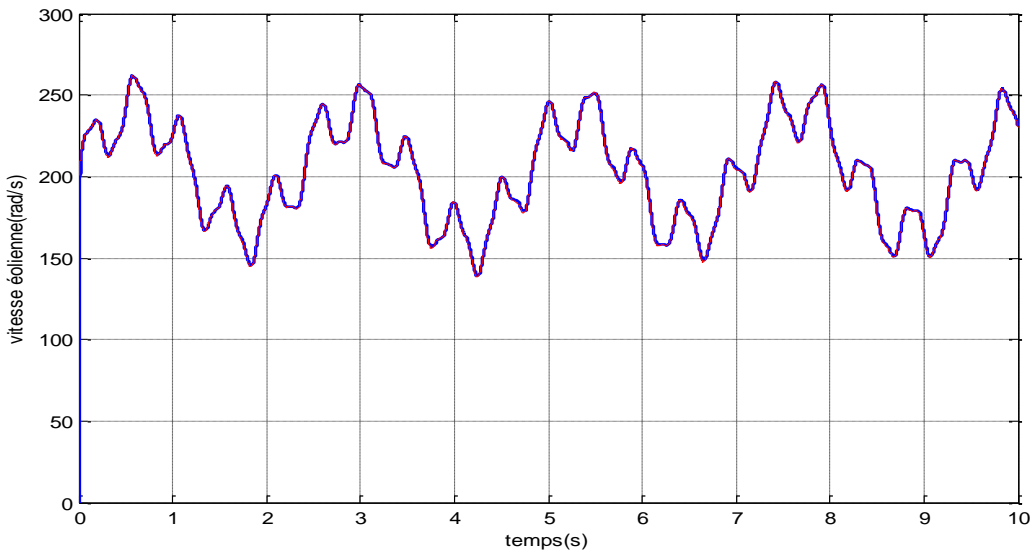


Figure 4.37 Evolution de la vitesse éolienne et se référence en utilisant sept ensembles flous

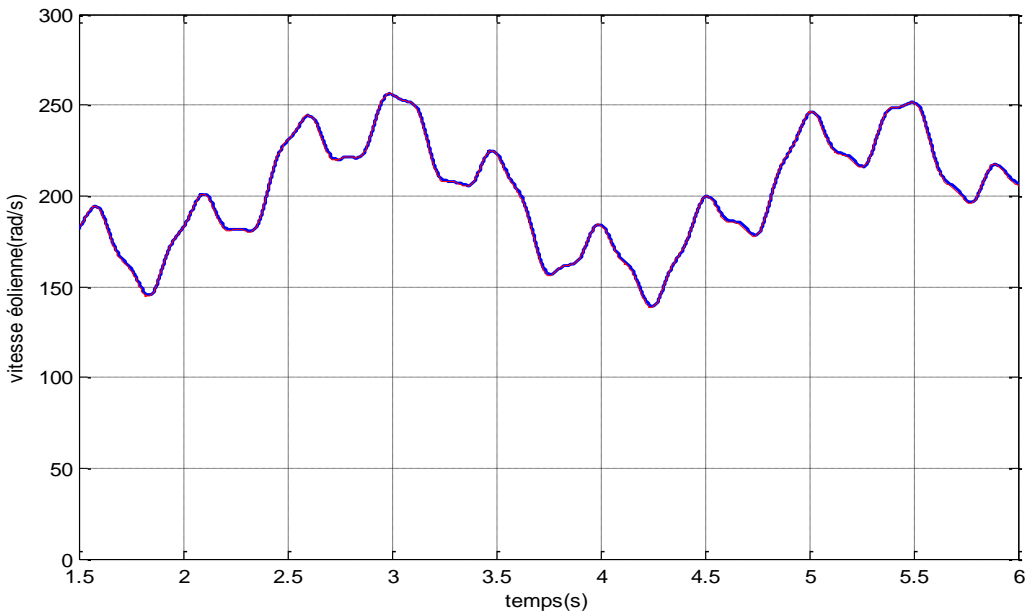


Figure 4.38 Zoom d e la vitesse éolienne et sa référence

Interprétation des résultats et conclusion

D'après les résultats obtenus ci-dessus en utilisant trois ensembles flous, cinq et sept ensembles flous, nous avons constaté que la vitesse de rotation mesurée suit sa référence. En comparant les trois figures du suivi de la référence, nous avons observé qu'un meilleur suivi est constaté dans la figure où nous avons utilisé sept ensembles flous.

Les performances obtenues avec la commande par logique floue sont très satisfaisantes comme la montre la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leurs références désirées surtout en augmentant le nombre d'ensemble flou.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DE SIMULATION DU

SYSTÈME GLOBAL

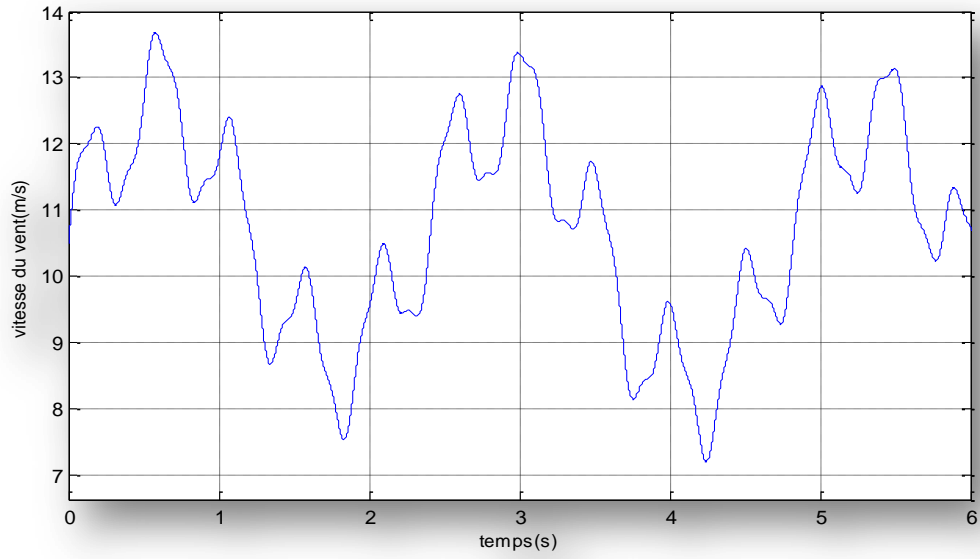


Figure 5.2 Profil du vent appliqué au système

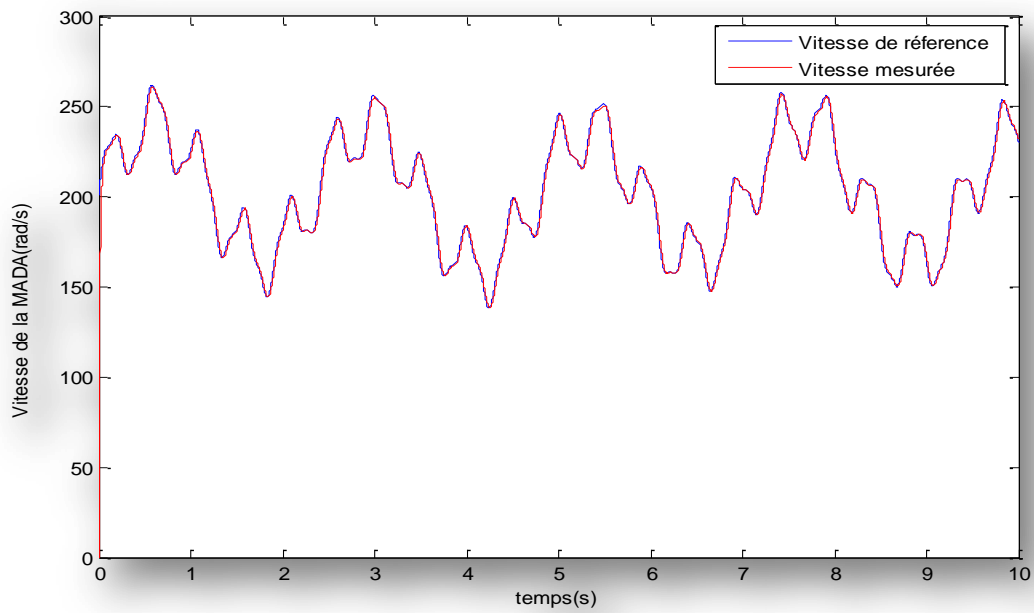


Figure 5.3 Les vitesses de rotation mesurée et de référence

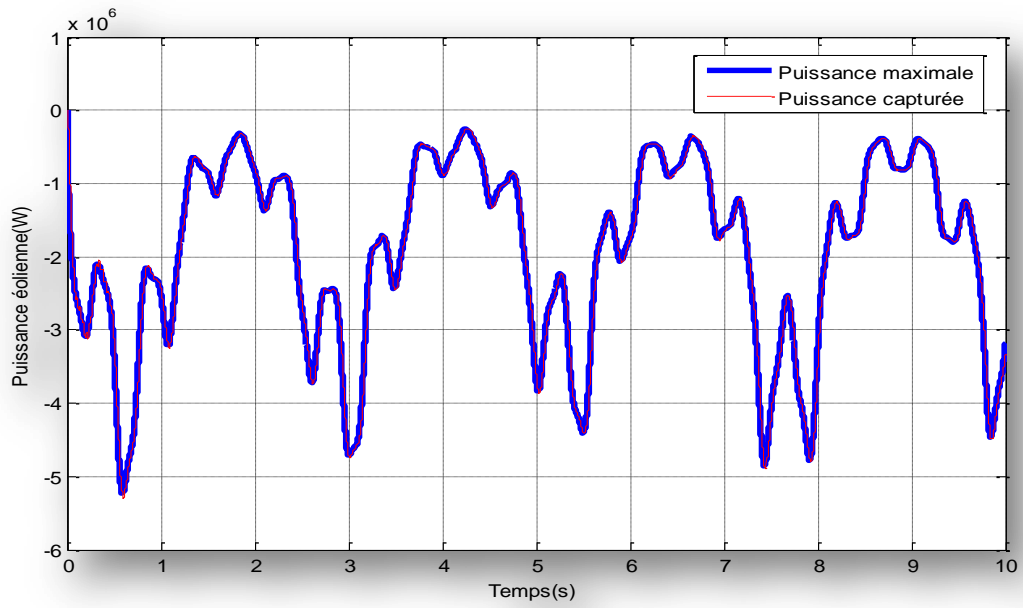


Figure 5.4 La puissance maximale et la puissance capturée

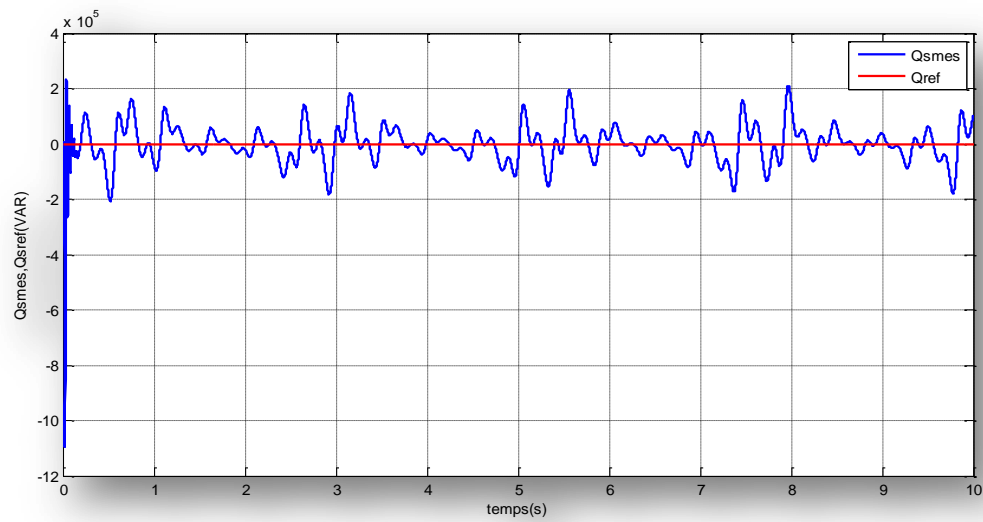


Figure 5.5 la puissance réactive mesurée et celle de référence

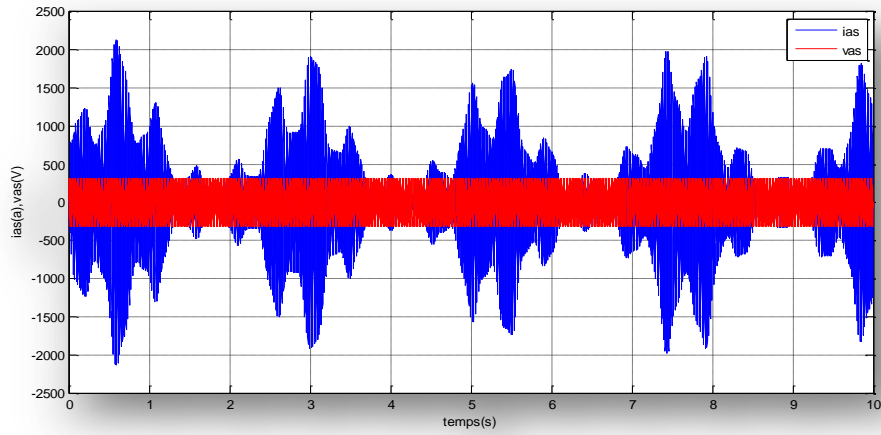


Figure 5.6 Tension et courant statorique

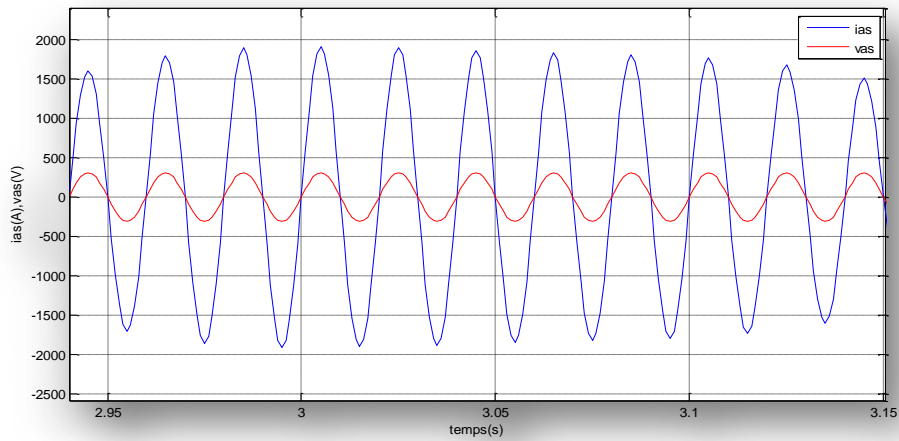


Figure 5.7 Zoom de la tension et du courant statorique

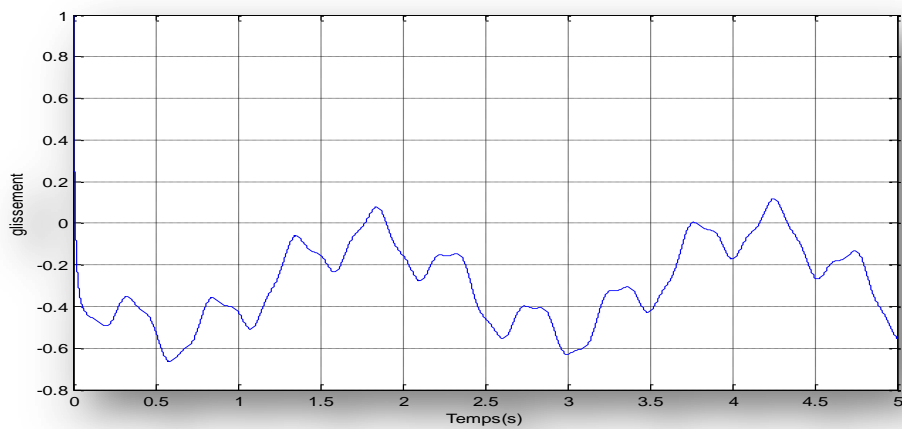


Figure 5.8 Allure de glissement

5-3 Interprétation des résultats

Le profil du vent est représentée par la figure 5.1, la vitesse mécanique de la MADA suit parfaitement celle de la référence .Cette dernière est issue de l'asservissement de vitesse (figure5.2) ;

La figure 5.4 nous montre le suivi de la référence pour la puissance mécanique en utilisant le régulateur PI par logique floue ;

La figure 5.6 montre le suivi de la référence pour la puissance réactive ;

Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'allure de la tension ainsi que celle du courant statorique ;

La figure 5.8 montre l'allure du glissement qui a la même allure que le profil du vent appliqué à notre système ;

Les figures 5.8 et 5.9 montrent l'allure des puissances active et réactive produite par l'aérogénérateur où la puissance active est transmise au réseau et la puissance réactive est nulle.

5-4 Conclusion

Vu le caractère aléatoire du vent, la puissance extraite de l'installation éolienne doit être le maximum et ceci n'est pas garanti par la régulation classique et les correcteurs conventionnels, le recours vers les méthodes basées sur l'intelligence artificielle est une nécessité. Dans le but d'obtenir une meilleure performance du système, nous avons adopté la méthode de réglage par logique floue pour asservir la vitesse du vent.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et l'application de la commande par logique floue sur le système éolien qui nous permet de maximiser la puissance, pour ce faire on a utilisé l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre. La mise en équation de différentes grandeurs caractérisant la machine étudié nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

La génératrice asynchrone est destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien. Il est donc très utile de raisonner en termes de puissance. Pour cette raison, la commande vectorielle présentée dans le troisième chapitre est en puissance active et réactive statorique. Cette partie est consacrée à l'étude théorique de la commande vectorielle où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée.

Après l'approche de la commande par logique floue qui a été présentée avec succès à la conception d'un régulateur proportionnel intégral par logique floue. En effet, cette technique grâce à sa facilité d'implantation et sa capacité de traiter l'imprécis, nous a permis aussi d'obtenir de bonnes performances de la commande de vitesse en assurant la poursuite de la consigne optimale.

Au dernier chapitre, nous avons donné les résultats de simulation du système éolien en utilisant l'environnement MATLAB/SIMULINK.

En fin, et à l'issue de ce travail réalisé sur l'apport de MADA, on peut avancer un certain nombre de perspectives :

- Etude de la MADA associée à d'autres stratégies de commande ;
- Développement d'un contrôle vectoriel sans capteurs de vitesse mécanique et du vent ;
- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique et la résistance de la phase statorique;
- Etude des perturbations inhérentes au couplage du dispositif avec le réseau ;
- Etude du système éolien prenant en compte les vitesses élevées du vent pour appliquer la stratégie de réglage mécanique de la vitesse en utilisant l'une des deux techniques : « le pitch control » ou le stall control ».

ANNEXE

Paramètres de la chaîne éolienne de 1.5MW basée sur la MADA

Valeur numérique du paramètre	Signification
$R = 35.25$	Rayon de l'éolienne [m]
$G = 90$	Gain de multiplicateur de vitesse [m]
$\rho = 1.22$	Masse volumique de l'air [Kg/m^3]
$R_s = 0.012$	Résistance statorique [Ω]
$R_r = 0.021$	Résistance rotorique [Ω]
$M = 0.0135$	Inductance mutuelle [H]
$L_s = 0.0137$	Inductance statorique [H]
$L_r = 0.0136$	Inductance rotorique [H]
$J = 1000$	Inertie de l'arbre [$\text{Kg}.\text{m}^2$]
$f_r = 0.0024$	Coefficient de frottement de la MADA
$P = 2$	Nombre de paires de pôles
$V_s = 690$	Tension composée efficace [V]
$f = 50$	Fréquence du réseau [Hz]

Références Bibliographiques

- [1] **S. Belkehal**, « conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [2] **A. Boyette**, « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [3] **A. Miriki**, « étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat en génie électrique, Toulouse, 2005.
- [4] **T. Sun, Z. Chen, and F. Blaaregabj**, "Fliker study on variable speed wind turbines with Doubly Fed Induction Generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 20, NO.4, December, 2005.
- [5] **F. kendouli**, « Etat de l'art et modélisation des microcentrales », thèse de magister, Université de Constantine, 2007.
- [6] **Site internet, [http : www.energie renouvelable, wiki pédia.org](http://www.energie_renouvelable_wiki_pedia.org).**
- [7] **B. Beltran** « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », thèse de doctorat, université de Bretagne occidentale, 2010.
- [8] **S. El Aimani**, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [9] **M. Adjoudj, M. Abid, A. Aissaoui, Y. Ramdani, H. Bounoua**, « commande par mode glissant d'une MADA montée dans une éolienne », Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbas **Algérie, revue « nature et technologie » n°02/Janvier 2010, page 27 à 34.**
- [10] **C. Benoudjit** « étude pour la conception d'un banc d'essais pour «énergie éolienne ».Mémoire de magistère de l'université Batna, juin 2005.

- [11] **F. Poitiers**, « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome.-Machine asynchrone à double alimentation relié au réseau », thèse de doctorat en électronique et génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [12] **D-H. Tran** « Conception optimale d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale », thèse de doctorat en génie électrique, Toulouse, 2010.
- [6] **Ming Yin, Geng Yin, Ming Zhou, Chen Gyng Zhao**, "Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration", Power Engineering Society General Meeting, juin 2007, PP1-6.
- [9] **M. Boutoubat, L. Mocrani, M. Machmoum**, "A Fuzzy MPPT for DFIG Driven by a Variable Speed Wind Turbine", EFEE'10 International Symposium on Environment Friendly Energies Application, 2-4 November 2010, GHARDAIA, ALGERIE.
- [10] **M.udinger,D.Leray, Y.Deblezer**, « A Fuzzy Logic Contolled power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems », Revue 3EI N°21.juin 2000.
- [11] **A. Arbaoui**, «Aide à la décision pour la définition d'un système éolien adéquation au site et à un réseau faible », thèse de doctorat en mécanique, E.N.S.A.M centre de Bordeaux, 2006.
- [12] **D-H. Tran**, « Conception optimale intégrée d'une chaîne éolienne « passive » ; Analyse de robustesse, validation expérimentale », thèse de doctorat, en génie électrique, Toulouse, 2010.[13] **B. Multon, G.Robin**, « Le génie électrique dans le vent : Etat de l'art et recherche dans le domaine de génération éolienne », C.G.E'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [14] **H. Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par les aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat en Automatique, Bordeaux, 2003.
- [15] **N. Laverdure**, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », thèse de doctorat en génie électrique, Grenoble, 2005.
- [16] **Site Web: <http://windpower.dk>**, « Aérogénérateurs électriques », Master recherche ; paris-ENS Cachan, 2007.

- [17] **A.Abdelli**, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat, Toulouse, 2007.
- [18] **H. Buhler**, « Réglage par la logique floue », Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes, 1994.
- [19] **Earl.D.Cox et Maurice Clerc**, « Traduction de la logique floue », Edition Thomson Paris, 1997.
- [20] **S.Rafa, H.Zeroug, L.Hocine, K/Boudjit**, « Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension à modulation vectorielle ».
- [21] **S.Bacha**, « modélisation et commande des convertisseurs à découpage symétrique » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble(INPG), janvier 1993.
- [22] **Y.Alhassoun**, « Etude et mise en œuvre de machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse », thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 mai 2005.
- [23] **P-E Vidal**, « commande non-linéaire d'une la machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat en génie électrique. Toulouse 2004.
- [24] **A.L. Nemours**, « contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation » mémoire de Magister, université de Batna, Algérie, 2002
- [25] **R. Melico, V.M.F.mendes, J.P.S. Cotaloã**, Computer Simulation of Wind Power Systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis", International Conference on Power System Transients (IPST 2009, Kyoto, Japon, 3-6, Juin 2009.
- [26] **Y. Alhassoun**, « Etude et mise en œuvre de machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse », thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 mai 2005.]
- [26] **L. Baghli**, "Contribution de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 1999.
- [27] **Gille Balmisse**, « gestion des connaissances-outils et applications du Knowledge management » Septembre 2002.

[28] **F. Sur**, « Présentation de la logique floue », Magister de mathématiques, Mémoire de première année 1997/1998. Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[29] **V. Rogez**, « modélisation de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », thèse de doctorat en génie électrique, Lille, 2004.

[30] **T. Belkacem**, « modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », thèse de magister, Batna, 2010.

[31] **D. Aouzellagh, K.Ghadamsi, E.M Berkouk**, « Power Control of a Variable Speed Wind

Turbine Driving an DFIG. Electrical engineering Departement, Bejaia.

[32] **M. Boutoubat, L. Mokrani, M. Machmoum**, « A Fuzzy MPPT For Driven by A Variable Speed Wind Turbine », EFEEA'International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications. 2-4 November 2010, Ghardaia, Algeria.

[33] **M. Rivoire, J-L. Ferrier**, « MATLAB Simulink Stateflow avec des exercices d'automatique résolus » Editions Technip, France, 2001.

[34] **B. Boukhezzar**, « sur les stratégies de commande pour l'optimisation de puissance des éoliennes à vitesse variable », thèse de doctorat, Paris XI. ORSAY, 2006.

[35] **Kaci GHEDDAMSI**, « contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct à fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone » Ecole nationale polytechnique laboratoire de commande des processus, soutenu le 14/12/2008.

[36] **Boukas El-kebir**, « système asservis » Edition de l'Ecole polytechnique de Montréal, 1995.

Titre Evaluation de la puissance d'une installation éolienne

Mots clés : installation éolienne, machine asynchrone à double alimentation, Structure de commande de MPPT, modélisation, commande par logique floue.

Résumé : une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion. Différentes structures de commande ont été développées selon la caractéristique puissance-vitesse pour extraire une puissance maximale. Le but de ce travail est d'explorer les structures et les approches (logique floue, réseaux de neurone ...) pour la poursuite du point de la puissance maximale MPPT. Adopter une approche d'eux et l'appliquer sur l'ensemble turbine-machine asynchrone à double alimentation.

Abstract :

A wind energy system has for role to convert the kinetic energy of wind in electric energy. Its different elements are conceived to maximize this conversion. Different structures of control have been developed according to the feature power - speed to extract a maximal power.

The aim of this work is to explore the structures and the approaches (fuzzy logic, neural networks...) for the pursuit of the point of the power maximal MPTT. To adopt an approach of them and to apply it on the whole turbine-doubly fed induction generator