

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran



**Mohamed BOUDIAF**

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE



**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MAGISTER**

SPECIALITE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

**PRESENTE PAR**

**Mr HOCINI Yacine**

**SUJET DU MEMOIRE**

**COMMANDE D'UNE GENERATRICE POUR  
ENERGIE EOLIENNE**

Soutenu le : 15 Mai 2013 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Président	Mr. Mokhtari Abdallah,	Prof (USTO)
Rapporteur	Mr. Bouhamida Mohamed,	Prof (USTO)
Examineurs	Mr. Omari Abdehafid,	Prof (USTO)
	Mr. Chenafa Mohamed,	MCA (ENSET)
	Mr. Zemalache Meguenni Kadda,	MCA (USTO)

# DEDICACES

# DEDICACES

*A ma mère qui ma soutenu pendant  
toute la durée de ces longues études,  
A la mémoire de mon père,  
A mes sœurs,  
A mes frères.*

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été préparé au sein du Laboratoire d'Automatisation et Contrôle des Systèmes, sous la direction du Pr. **Bouhamida Mohamed**, de l'université des sciences et de la technologie d'Oran.

Ainsi, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mes deux encadreurs :

Monsieur Pr. **Bouhamida Mohamed**, Professeur, à USTO MB et Monsieur **Benghanem Mustapha**, Maître de conférences, à USTO MB, m'ont avoir proposé le sujet de ce mémoire et en me faisant profiter de leur conseils judicieux, son savoir faire et leur grandes compétences dans le domaine d'automatisation et contrôle des systèmes, et de m'ont avoir aidé et guidé avec une grande efficacité. Je les félicite de la patience dont ils ont su faire preuve à mon égard et qu'ils soient assurés de ma plus profonde reconnaissance.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **Mokhtari Abdallah** Professeur, à l'Université des sciences et de la technologie d'Oran (USTO) pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire.

Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de mon mémoire. Il s'agit, en l'occurrence de :

Mr. <b>Omari Abdelhafid</b> ,	Prof (USTO)
Mr. <b>Chenafa Mohamed</b> ,	MCA (ENSET)
Mr. <b>Zemalache Meguenni Kadda</b> ,	MCA (USTO)

Je suis extrêmement reconnaissant à Messieurs Merabet Boulouiha Houari, pour son aide précieux, la pertinence de ses remarques et pour sa disponibilité sans faille.

# Sommaire

Introduction générale-----	1
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>L'Etat de l'Art des Systèmes Eoliens</b>	
I - Historique de l'éolien-----	3
II -Introduction-----	6
III-Ressources énergétiques renouvelables -----	7
III.1 Hydrauliques-----	7
III.2 Géothermie-----	7
III.3 La biomasse-----	9
III.4 Solaire-----	10
III.4.1 Le solaire thermique-----	10
III.4.2 Le solaire photovoltaïque-----	11
III.5 L'éolienne-----	11
IV-Avantages et désavantages de l'énergie éolienne-----	11
IV.1 Avantages-----	11
IV.2 Désavantage-----	12
V-Descriptif et qualités de l'énergie éolienne-----	12
V.1Définition de l'énergie éolienne-----	12
V.2Définition de l'éolienne-----	12
V.3Principaux composants d'une éolienne-----	13
V.3.1Mât-----	13
V.3.2Rotor-----	13
V.3.3Nacelle -----	14
VI- Les différents types d'éoliennes-----	15
VI.1Eoliennes à axe vertical-----	15
VI.2 Eoliennes à axe horizontal-----	17
VI.2.1 A rotation lente-----	19
VI.2.2 Rotation rapide-----	20
VI.2.2.1Amont-----	20
VI.2.2.2 Aval-----	21
VII-Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique-----	21
VII.1Loi de Betz-----	21
VIII Le vent-----	24
IX-Bilan des forces sur une pale-----	25
X-Régulation de la puissance -----	26
XI - Etat de l'art sur la conversion électromécanique -----	30
XI.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone-----	30
XI.1.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"-----	30
XI.1.2 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée-----	30
XI.1.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer-----	31
XI.1.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec	

Cycloconvertisseur-----	32
XI.1.5 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI-----	33
XI.2 Systèmes utilisant la machine synchrone-----	33
XI.2.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants -----	33
XI.3 Machines à structures spéciales-----	34
XI.3.1 Machine à réluctance variable (MRV) non excitée-----	35
XI.3.2 Machine à réluctance variable excitée par des courants triphasés au stator-----	35
XII- Conclusion-----	35

## CHAPITRE 2

### **Etude d'un système de conversion autonome**

I - Introduction-----	37
II - Modélisation du dispositif-----	38
II.1 Hypothèses simplificatrices -----	38
II.2 Modèle dynamique -----	38
II.2.1 Equations électriques -----	39
II.2.2 Equations magnétiques -----	40
II.3 Transformation du système triphasé-----	41
II.4 Auto-amorçage de la génératrice asynchrone -----	43
II.4.1 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage -----	44
II.5 Modélisation de l'autoamorçage -----	47
II.5.1 Model dynamique -----	47
II.5.2 L'inductance magnétisante et la capacité dans le fonctionnement de la SEIG-----	49
III. Modélisation de la turbine éolienne-----	50
III.1 Modèle de la turbine-----	50
III.2 Modèle du multiplicateur de vitesse-----	52
III.3 Equation dynamique de l'arbre-----	52
IV. Description du système étudié-----	53
V. Simulation et interprétation des résultats-----	53
V.1 influence de la variation des capacités-----	54
V.2 Influence de la variation de la charge-----	56
V.3 Influence de la variation de vitesse de vent-----	58
V.4 simulation de l'influence de la déconnexion brusque d'une capacité-----	60
V.I Conclusion-----	61

## Chapitre 3

### **Étude, modélisation et Stratégie de commande de la MADA**

I – Introduction-----	63
II - Description du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation-----	64
II. 1 Description sommaire de la MADA-----	64
II. 2 Principe de fonctionnement-----	66

II. 3 FONCTIONNEMENT A QUATRE QUADRANTS DE LA MADA-----	67
II. 3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone-----	68
II. 3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone-----	68
II. 3.3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone-----	69
II. 3.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone-----	69
III- Domaines d'application-----	69
IV- Avantages et inconvénients de la MADA-----	71
IV. 1 Avantages de la MADA-----	71
IV. 2 Inconvénients de la MADA-----	72
V. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation-----	72
V. 1 Modèle dynamique de la machine asynchrone-----	73
V.2 Application de la transformation de Park-----	75
V.3 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park-----	76
V.3.1 Equations électriques-----	76
V.3.2 Équations magnétiques-----	76
V.3.3 équations mécaniques-----	77
V.4 Modèle d'état de la machine asynchrone à double alimentation-----	77
VI- Modélisation du redresseur triphasé double alternance-----	78
VII- Modélisation du filtre-----	80
VIII- Onduleur-----	81
VIII. 1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé-----	81
VIII. 2 Modèle mathématique de l'onduleur triphasé-----	82
VIII. 3 Onduleur à modulation de largeurs d'impulsion (MLI) -----	83
IX- Stratégie de commande de la MADA-----	83
IX.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé-----	84
IX.1.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques-----	85
IX.1.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques-----	86
X- Etablissement des angles nécessaires aux transformations-----	88
XI- Commande vectorielle de la MADA en génératrice-----	89
XI.1- Principe général-----	89
XII- Conclusion-----	91

## Chapitre 4

### **Commande de l'éolienne et résultats de simulation**

I- Introduction-----	92
II- Synthèse du régulateur Proportionnel – intégral-----	93
III Synthèse d'un régulateur RST-----	95
III.1 La structure de correction-----	95
III.2 Equation de la boucle fermée-----	96
III.3 Résolution de l'équation de Bézout-----	96
IV- Synthèse du régulateur flou-----	98
V- Structure générale d'un réglage par logique floue-----	98
V.1- Fuzzification-----	99
V.2- Base de connaissance-----	99

V.3- Mécanisme d'inférence-----	99
V.4 - Défuzzification-----	99
VI- Définition des fonctions d'appartenance-----	100
VII- Définition des règles et leurs inférences-----	100
VIII- différentes méthodes d'inférence-----	101
IX- Description de notre régulateur FLC-----	101
X- Régulateur flou adaptatif-----	103
X.1 Généralités sur la commande adaptative-----	103
X.2 Description du régulateur flou à gain de commande adaptatif-----	104
X.3 Développement de la table d'inférence-----	104
XI- Résultats de simulation-----	106
XI.1 suivi de consigne-----	106
XI.1.1 Régulateur PI-----	106
XI.1.2 Régulateur RST-----	107
XI.1.3 régulateur flou-----	108
XI.1.4 régulateur flou adaptatif-----	109
XI.1.5 Interprétation et étude comparative-----	113
XI.2 Test de robustesse-----	114
XI.2.1 Interprétation et étude comparative-----	118
XII- conclusion-----	120
<b>Conclusion générale et perspectives-----</b>	<b>121</b>
<b>Références bibliographiques-----</b>	<b>123</b>
<b>Annexes-----</b>	<b>129</b>

# INTRODUCTION GENERALE

**L**a consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables. Plusieurs sources d'énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche dont le but de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique.

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels: la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodes de contrôle des turbines à vitesse variable. Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse de vent d'une autre part.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien. Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document, ainsi qu'une description du gisement éolien est présenté. Ceci est suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le second chapitre présente une étude sur les performances et les limites de l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée par un banc de capacités. Pour cela on a effectué des simulations pour étudier l'effet de la charge et des capacités connectés sur la tension et la fréquence, ainsi que la variation de la vitesse du rotor est également étudié.

Le troisième chapitre consiste à présenter une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients et ses domaines d'applications ainsi que sa modélisation. Une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statorique pour l'utilisation de la MADA dans un système éolien est présentée.

Enfin, Le quatrième chapitre met en œuvre la commande vectorielle basée sur quatre régulateurs linéaires de philosophies différentes pour la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en génératrice (Proportionnel Intégral utilisé comme référence, régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles, régulateur flou classique et le régulateur flou adaptatif).

Les résultats de simulation de notre étude sont présentés, permettant une étude comparative des régulateurs utilisés.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, des perspectives espérées sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

# Chapitre 1

## Etat de l'Art des Systèmes Eoliens

### **I - Historique de l'éolien**

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier et l'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Pers, en Irak, en Egypte et en Chine [17]. Elle fut utilisée pour faire avancer les navires, pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs [2]. Hammourabi, roi de Babylone avait conçu, paraît-il, dix-sept siècles avant Jésus-Christ, le projet d'irriguer la riche plaine de Mésopotamie à l'aide de l'énergie éolienne. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical, ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulin des grains depuis le septième siècle avant Jésus-Christ [82]. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical.

Trois siècles avant Jésus-Christ, l'égyptien Hérophite d'Alexandrie représente dans une étude consacrée à la pneumatique, un moulin à axe horizontal à quatre pales qui alimente en air comprimé un orgue. Les Chinois en ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau.

C'est seulement en moyen âge, que les moulins à vent font leur apparition en Europe utilisés tout d'abord pour moulin le grain [1], d'où leur nom de moulin, ils furent aussi utilisés pour assécher des lacs ou des terrains inondés, on les emploie également pour extraire l'huile des noix et des

graines, pour scier du bois, pour transformer les vieux chiffons en papier, pour la préparation des poudres de couleur entrant dans la composition des teintures et pour la fabrication du tabac à priser qui remplaçait les cigarettes autrefois, comme en Italie, en France, en Espagne et au Portugal. On les rencontre, un peu plus tard, en Grande-Bretagne, en Hollande et en Allemagne, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le XII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècle. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, figure 1.1,

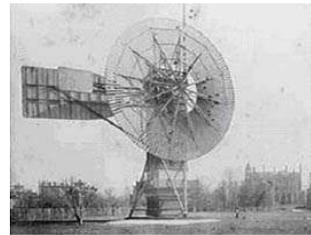


Figure 1.1 : Moulin à vent au XII<sup>o</sup> siècle      Figure 1.2 : Première éolienne à produire de l'électricité

, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259, la Hollande les utilise à partir de 1350 pour l'assèchement des polders. Vers le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, le nombre de moulins estimés en Europe était environ 200 000 moulins à vent. C'est principalement, l'arrivée des machines à vapeur industrielle qui fut la cause de leur déclin et de leur disparition progressive [30]. Ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, lorsque l'électricité prit son essor de développement, la première éolienne destinée à produire de l'électricité est construite par Cleveland en 1887, figure 1.2, composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW.

En 1891 et au Danemark le météorologue Paul la Cour [9] [40], figure 1.3, qui va améliorer le système, il a associé une turbine éolienne à une génératrice. Il est considéré aujourd'hui comme le père de l'éolienne.



Figure 1.3 : Paul la Cour, pionnier de l'éolienne

En 1939 aux États-Unis, une éolienne à deux pales, affichait 53 mètres de diamètre, tour de 33 mètres, fut montée par l'inventeur Palmer Putnam et le fabricant des turbines hydroélectriques Morgan Smith. L'éolienne fut raccordée au réseau en 1941

En France La machine expérimentale best romani d'un rotor de 30 mètres de diamètre montée en 1956, a la même période une neyrpic de 1Mw était testée a saint-remy-de landes.

en 1956, Johannes Juul, un des élèves de Paul la Cour, va construire la première éolienne à produire du courant alternatif (turbine Gedser), figure 1.4, qui sert de modèle aux éoliennes modernes. Cette éolienne se compose d'un générateur et de trois pales à pivot d'une puissance de 200 kW.



Figure 1.4 : L'éolienne de Gedser

En 1973, à cause de la crise pétrolière, et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure, les recherches dans le domaine de l'énergie éolienne relance de nouveau.

En 1979, Vestas livre ses premières éoliennes aux clients désireux d'investir dans les énergies renouvelables.

En 1980, l'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne.

En 1983, Construction de l'éolienne de Darrieus, figure 1.5, l'ingénieur français qui la breveta en 1931, elle fut la seule éolienne à axe vertical jamais construite. L'avantage était que l'éolienne pouvait capter tous les vents, d'où qu'ils viennent. Malheureusement, un brusque et fort coup de vent l'immobilisa en 1992



Figure 1.5 : L'éolienne de Darrieus

Concernant le raccordement au réseau, c'est qu'après les années 80 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé, principalement dans les années 90 qu'en marque une augmentation concernant la puissance installer, l'Allemagne dan 1er place avec une puissance de 14609MW puis les Etats-Unis avec une puissance de 6677MW puis l'Espagne 6202MW.

Actuellement, ou la terre est menacer par le danger du réchauffement climatique du gaz a effet de serre, l'énergie éolienne est en cour de recherche scientifique et revient au premier plan de l'actualité et connait un développement galopant.

## II - Introduction

Actuellement, le monde est marqué par la diminution des ressources naturelles telles que le charbon, le pétrole et le gaze naturel. L'augmentation des besoins énergétiques de la population est en pleine croissance et l'inquiétude face à l'environnement de la planète a cause aux émissions de gaze à effet serre tels que le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, le méthane CH<sub>4</sub> et l'oxyde nitreux.

Face à ces problèmes, l'énergie éolienne est placée aujourd'hui au cœur des préoccupations énergétiques de nombreux pays, et la production éolienne connaît un essor de développement considérable dans le monde au cours de ces dernières années. Ceci car elle réduit la consommation du carburant, économise de l'argent et elle diminue la pollution à l'échelle locale et mondiale, de plus le vent est un cadeau, c'est une source d'énergie gratuite et renouvelable qui n'est pas influencée par la fluctuation des prix mondiaux ni la difficulté de transport ni l'instabilité politique ou la guerre.

Investir aujourd'hui dans l'énergie éolienne rapportera un long terme en procurant l'électricité pour les générations futures.

Ces dernières décennies on observe une évolution apparente dans le monde entier de la production de la puissance éolienne, figure 1.6.

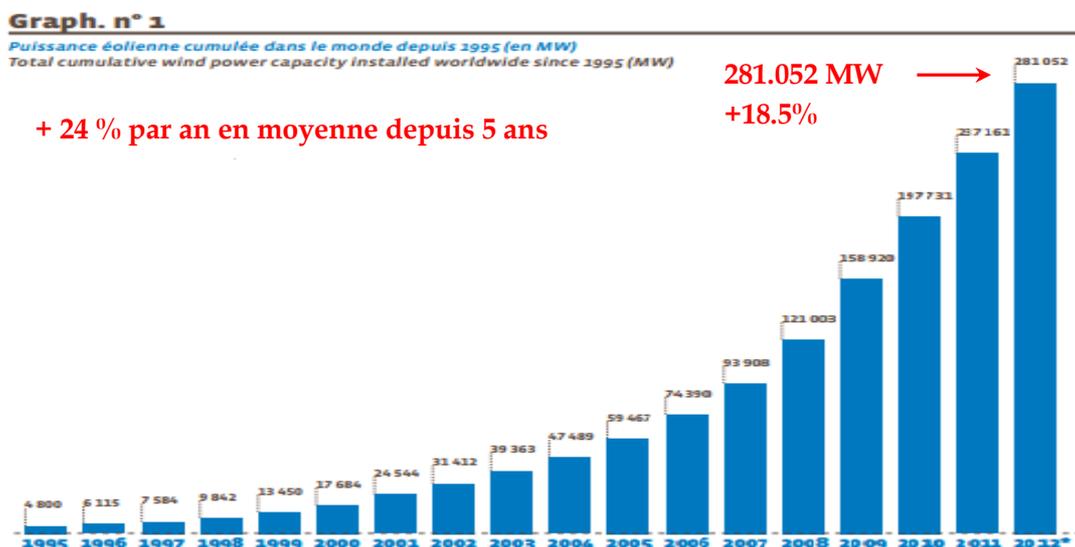


Figure 1.6 : Évolution de la puissance éolienne cumulée 1995/fin 2012 dans le monde en (MW) [32]

Cette figure montre une montée en puissance considérable, on marque une évolution de puissance de plus de 24% par an en moyenne depuis 5ans, et en fin de 2012 on marque une

puissance de 281.052 MW c'est-à-dire plus de 18.5% d'amélioration. Cette évolution essentiellement due à l'introduction de l'électronique de puissance dans la chaîne de conversion électrique, ainsi que l'amélioration des dynamiques de commande des génératrices et de l'orientation des pales.

Le présent chapitre a pour objectif de présenter une généralité sur les systèmes éoliennes, décrivons les différentes ressources énergétiques renouvelables, les caractéristiques des turbines ainsi que les diverses technologies et les principales caractéristiques des générateurs électriques pour aérogénérateurs, ainsi qu'une étude théorique est présenté.

### **III - Ressources énergétiques renouvelables**

#### **III - 1 Hydrauliques**

L'énergie hydraulique est l'une des ressources énergétiques utilisées depuis longtemps. C'était celle des moulins à eau, qui fournissaient de l'énergie mécanique pour moulinier le grain ou puiser de l'eau. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique ou hydroélectricité est une composante essentielle du parc de production d'électricité, elle est produite dans des centrales qui fonctionnent, le plus souvent en association avec, en dérivant l'écoulement naturel de l'eau, ceci est en fonction de la situation géographique des barrages par rapport à la centrale de production et de sa nature, du type de cours d'eau et de la hauteur de la chute.

On peut noter aussi dans le domaine de l'énergie hydraulique, les ressources marémotrices, de la houle et celles des courants marins. La France possède la plus grande usine marémotrice du monde (La Rance) avec une puissance de 240 MW et une production annuelle de 0,5 TWh [52].

Le développement attendu de l'énergie électrique éolienne offshore [53] pourrait être avantageusement couplé à une production par les vagues où l'on pourrait mettre en commun les coûteuses infrastructures de génie civil.

#### **III - 2 Géothermie**

Le globe terrestre est une boule de matière très chaude à l'origine, figure 1.7, la terre ne s'est pas entièrement refroidie, plus on s'approche de son centre plus la température est élevée, en moyenne 3°C tous les 100m, à 40 Km de profondeur la température de la roche atteint 1000°C, mais suivant les zones géographiques cette chaleur peut affleurer les bords de la croûte terrestre, les volcans ou les sources de l'eau chaude sont les manifestations les plus visibles ; cette chaleur, cette énergie propre, disponible et quasiment inépuisables, c'est l'objet de recherche d'expérimentation et de développement prometteur on l'appelle la géothermie [31].

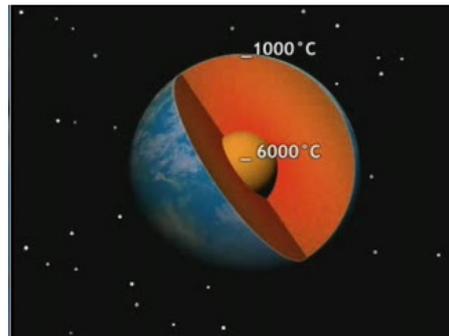


Figure 1.7: au cœur de la terre [3777]

La géothermie, du grec Géo (la terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Le principe, figure 1.8, s'agit d'extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages, plus ou moins profonds selon la température désirée ou le gradient thermique local, pour le grand public, le mode d'exploitation le plus connue de l'énergie géothermique est la pompe à chaleur, il s'agit d'un système de chauffage pour maison individuelle qui repose sur la récupération de l'énergie contenue dans le sol ou dans les nappes phréatiques à faible profondeur.

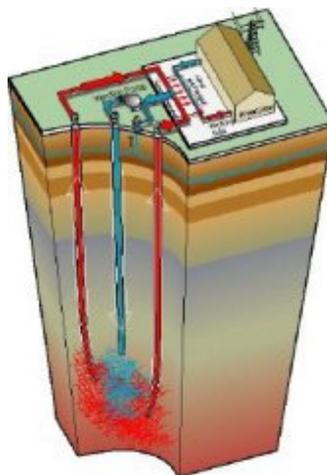


Figure 1.8 : principe de la géothermie

On distingue quatre types de géothermie selon la température de gisement :

La géothermie très basse énergie (température inférieure à 30°C) : ayant recours aux pompes à chaleur, bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le

chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture, aussi chauffage des maisons individuelles.

La géothermie basse énergie (température entre 30 et 90°C) : pour chauffage urbain collectif, le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.

La géothermie haute énergie (température supérieure à 150°C) : favorise la production de l'énergie électrique, la température des roches chaudes fracturées a grande profondeur permet de produire de la vapeur pour l'alimentation des centrales électriques.

La géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques, c'est une énergie fiable, renouvelable, propre et présente sur tous les continents, elle offre un potentiel énergétique considérable, car un km<sup>2</sup> de roche, sur une profondeur de 10 km, renferme en moyenne une quantité d'énergie équivalant à 15 millions TEP.

En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW (il s'agit de production de l'électricité donc de la géothermie grande et moyenne énergie). En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1000MW de puissance sous forme de la chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50MW installés. [80][81]

### III - 3 La biomasse

Le terme de biomasse signifie la masse totale des êtres vivants subsistant en équilibre sur une surface donnée du sol ou dans un volume donné d'eau océanique ou douce et dans le domaine énergétique, c'est l'ensemble de la matière organique, figure 1.9, d'origine végétale (paille, bois, blé, maïs, betterave, canne à sucre, colza, tournesol, soja etc. ) ou animale, Les bouses de vache par exemple, ainsi que les résidus organiques générés par l'activité humaine. Ces matières, en brûlant ou en chauffant dégagent de l'énergie, les différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz.



Figure 1.9 : exemple d'un ensemble de la matière organique

La biomasse est produite de déchets végétaux animaux ou urbain on appelle le géant qui dort, c'est l'énergie renouvelable probablement la plus importante pour le futur, ses applications son multiples, la plus réponde est la combustion du bois ou de granuler du bois pour le chauffage

domestique. En industrie ou en municipalité en vise la cogénération, figure 1.10, chaleur et électricité qui offre bien meilleur rendement globale, Elle fait partie des techniques les plus efficaces énergétiquement pour l'utilisation des énergies fossiles et renouvelables [4].

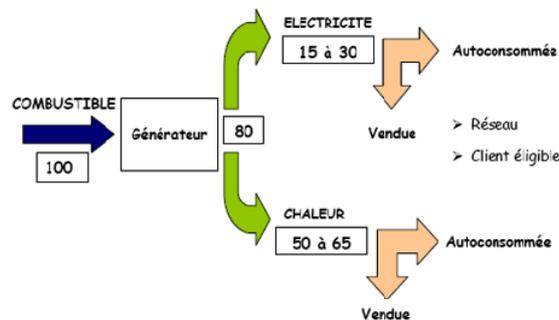


Figure 1.10 : Schéma de la cogénération

Le biogaz est produit par fermentation du déchet, tel que le lisier des vaches ou d'autres matière organiques qui produit chaleur et électricité, il est composé de méthane principalement, de gaz carbonique et de traces d'autres gaz. Il peut être employé à l'état brut sur des chaudières, groupes électrogènes, générateurs d'air chaud. Le biogaz est aussi utilisable, après épuration aux normes du gaz naturel, comme carburant automobile. [52]

Le biogaz peut servir de biocarburant gazeux, la biomasse permette aussi de produire de biocarburant en liquide, le biodiesel et bioéthanol. [1]

### III - 4 Solaire

L'énergie solaire est l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus abondantes sur terre, le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie [1].

Le système solaire est défini comme un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement ou indirectement en énergie électrique. [46] [11].

On distingue deux techniques d'exploitations de l'énergie solaire, le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

#### III - 4 - 1 Le solaire thermique

Le solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire et, dans une moindre mesure, la production combinée de chauffage par plancher chauffant (plancher solaire direct) [52], cet échauffement se produit lorsqu'un matériau est exposé au rayonnement du soleil, les atomes sont " bombardés " par les photons, sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures ont tendance à être "arrachés" , si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. Cette application de l'énergie solaire, industrialisée depuis plus de 25 ans, est actuellement en phase de croissance accélérée aux Etats-Unis, au Japon et en Europe.

### **III - 4 - 2 Le solaire photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque, fut observé la première fois, en 1839 [63], par le physicien français Edmond Becquerel. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt".

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique.

Ceci se produit lorsque une partie des électrons " décrochés " à cause du rayonnement solaire ne revient pas à son état initial, ces électrons créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique.

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.

La technique photovoltaïque est en très forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560MW [1].

### **III - 5 L'éolienne**

L'énergie éolienne représente actuellement la filière énergétique la plus dynamique parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité. Elle est l'une des plus prometteuses et ce [77], notamment en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. [52].

Ainsi, 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. [62]

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [3]. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.1015 kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.1012 kWh/an pour la part terrestre exploitable, et certainement beaucoup plus si l'on considère les zones offshore (zones situées en mer). [44]

De plus, notre pays dispos d'un potentiel de production d'électricité à partir d'énergies éoliennes non négligeables, c'est la raison pour laquelle et pour les raisons décrite précédemment, l'énergie éolienne sera l'objectif de notre présent travail.

## **IV - Avantages et désavantages de l'énergie éolienne**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie Malheureusement a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### **IV- 1 Avantages**

Le principal avantage de l'énergie éolienne est qu'elle ne nécessite pas de consommation de carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre tel que le dioxyde de soufre, ce qui crée les pluies acides et les oxydes d'azote, qui créent le smog et dioxyde de carbone notamment, qui contribue

au réchauffement climatique. De plus Chaque mégawatt -heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel [78].

Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ sont requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

#### **IV – 2 Désavantage**

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

Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.

La qualité de la puissance électrique : la 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'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a 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 [28].

### **V - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne**

#### **V – 1 Définition de l'énergie éolienne**

On appelle énergie éolienne, l'énergie produite à partir de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Le mot « éolienne » vient du grec Aeolus (Éole) le fils de Jupiter, le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique [79] [39], le terme signifie également « rapide », « vif » ou « inconstant ».

#### **V – 2 Définition de l'éolienne**

Ce sont des machines appelées aérogénérateurs ou plus communément éoliennes, ce sont des systèmes permettant de récupérer l'énergie cinétique du vent et de la convertir en énergie mécanique pour produire le plus souvent de l'électricité.

### **V - 3 Principaux composants d'une éolienne**

De manière générale, une éolienne est constituée principalement de 3 parties, le mât, le rotor et la nacelle, ces parties doivent être étudiées et modélisées minutieusement de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

#### **V - 3 - 1 Mât**

Le mât est généralement un tube en acier, son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, où la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindres, améliorant ainsi la captation de l'énergie [54], de plus il permet d'accéder à la nacelle pour des opérations d'entretiens et d'inspections. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât peut mesurer entre 10 et 80 m de haut et ce ci dépend du type d'éolienne et de sites d'implantation. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages [62]. Trois grands types de tour peuvent se rencontrer, mât haubané, tour en treillis et tour tubulaire. La tour a une forme légèrement conique ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

#### **V- 3 - 2 Rotor**

Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Son rôle est de capter l'énergie du vent et la transformer en énergie mécanique. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre [54], en plastique renforcé ou en bois. Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 et plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [62]. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Par contre pour les rotors à vitesse variable le dispositif d'orientation des pales est simplifié et une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

### V -3-3 Nacelle

La nacelle est une structure en acier ou en fonte, installée au sommet du mât ; permet de regrouper tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. Pour les grandes éoliennes, elle pèse très lourd : plus de 30 tonnes, sa taille est celle d'une mini fourgonnette. La figure 1.11 représente une éolienne avec ses principaux composants et les différents éléments d'une nacelle : [62] [54]

**V3-3-1 Le multiplicateur de vitesse** : il sert à adapté la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. (Qui est généralement entraîné a environ 1500 tr/mn) ;

**V3-3-2 L'arbre secondaire** : comporte généralement un frein mécanique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique a disque actionne en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne ;

**V3-3-3 Le système de refroidissement comprend** : généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile ou à eau pour le multiplicateur.

**V3-3-4 La génératrice** : La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW. Dans certains cas, des générateurs de conception spéciale pouvant fonctionner à la vitesse de l'arbre du rotor sans aucune boîte de vitesses. Différents types de génératrice peuvent être rencontrés comme on le verra dans ce qui suit ;

**V3-3-5 L'anémomètre et la girouette** : habituellement situés à l'arrière de la nacelle, permettent respectivement de mesurer la vitesse du vent et de déterminer sa direction, ces deux derniers émettent l'information (les données) sous forme des signaux électroniques au système de contrôle-commande pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure a 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

**V3-3-6 Le système de contrôle-commande** : comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation de la nacelle. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée.

Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour, mais au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur.

Le système de contrôle-commande permet aussi de gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation.

Enfin, Le système de contrôle-commande assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir et en cas de défaillance le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

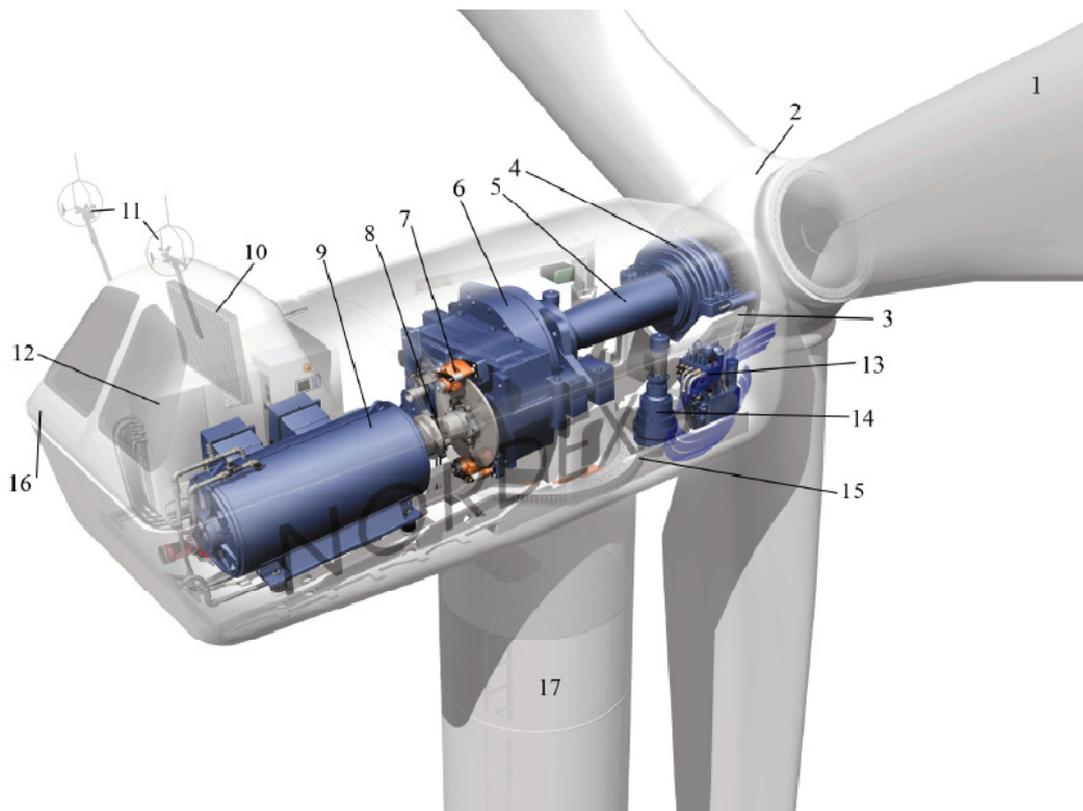


Figure 1.11 : différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW)

1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4: cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

## VI- Les différents types d'éoliennes

On distingue deux grands types d'éolienne : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

### VI-1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité [23]. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation [2]. Elles ne possèdent aucune hélice,

L'hélice a été remplacée par deux longues pales recourbées qui se rejoignent aux extrémités de l'axe.

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, ce qui permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. Aussi, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Ces les raisons pour lesquelles, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal. Il existe deux modèles caractéristiques: le type "Savonius" et le type "Darrieus".

**Le rotor de Savonius**, figure 1.12, du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920 [54]. Son fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble. Elles ne permettent pas de développer de grandes puissances et n'ont qu'un très faible rendement, ne dépassant pas 50% de la limite de Betz (pourcentage maximum théorique de l'énergie du vent pouvant être récupérée). De ce fait, elles ne connaissent pas un grand développement.

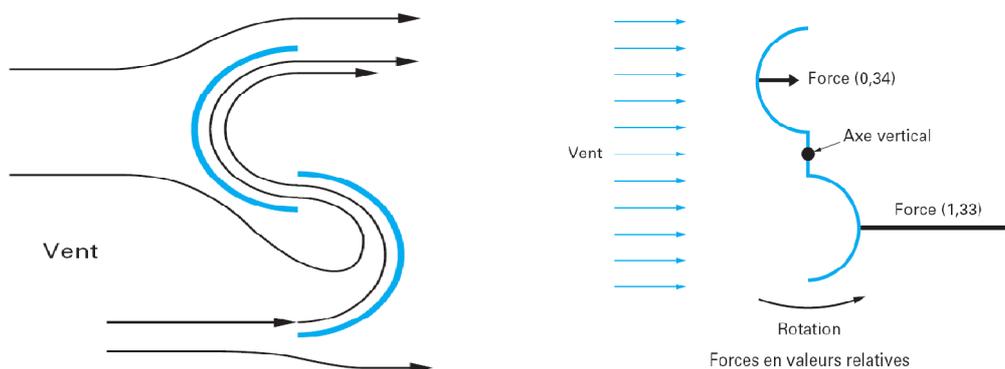


Figure1.12 a) Rotor de Savonius

b) Effet du vent sur un corps creux

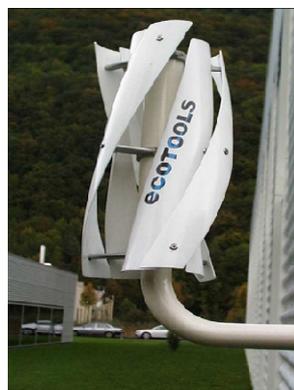


Figure 1.13 : Eolienne de Savonius

**Les éoliennes de Darrieus** Figure, 1.15, ou à variation cyclique d'incidence. Dont le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables [1]. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif, figure 1.14. Ce principe de fonctionnement a été breveté par l'ingénieur Français Georges Darrieus au début des années 1930[2]. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre du profil et de la vitesse du vent et le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, ce qui signifie que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est presque nul, cela signifie qu'une petite turbine Savonius est très souvent présente sur son axe pour rendre possible le démarrage.

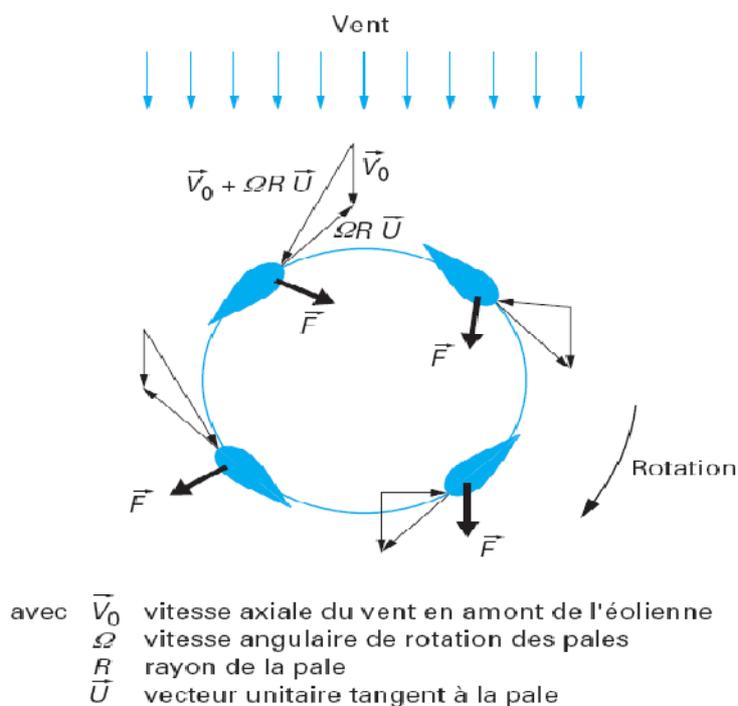


Figure 1.14 : Principe de l'incidence variable [54]



Figure 1.15 : Eolienne de Darrieus

## VI-2 Eoliennes à axe horizontal

La technologie largement dominante aujourd'hui et la plus répandue est à axe horizontal (ou à hélice) car son rendement est supérieur [38]. Ce sont les descendantes directes des moulins à vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à une, deux, trois pales (les plus courantes) et les multiples, mais 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 [23].

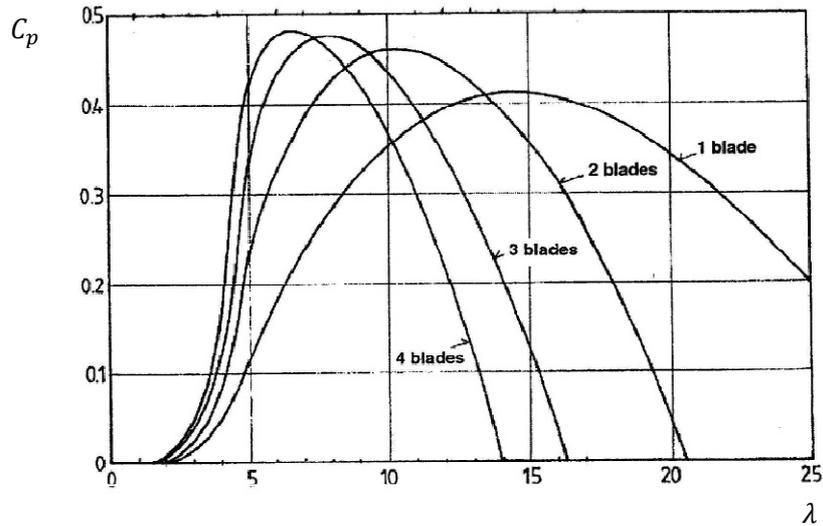


Figure 1.16 : relation entre le nombre de pale le coefficient de puissance

Théoriquement, plus le nombre de pale est élevé, meilleur est le rendement aérodynamique. On augmente alors le coefficient de puissance de 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, d' 1 % en passant de trois à quatre et ainsi de suite, figure 1.16. Les turbines à 3 pales sont dynamiquement plus stable et ont un meilleur impact visuel ; Les turbines équipées d'une seule pale nécessitent un contrepoids. D'ailleurs, dans le cadre d'éoliennes possédant une seule pale, le couple de torsion sur l'arbre est beaucoup plus important. Pour une turbine possédant 2 pales, des vibrations cycliques importantes peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontale.

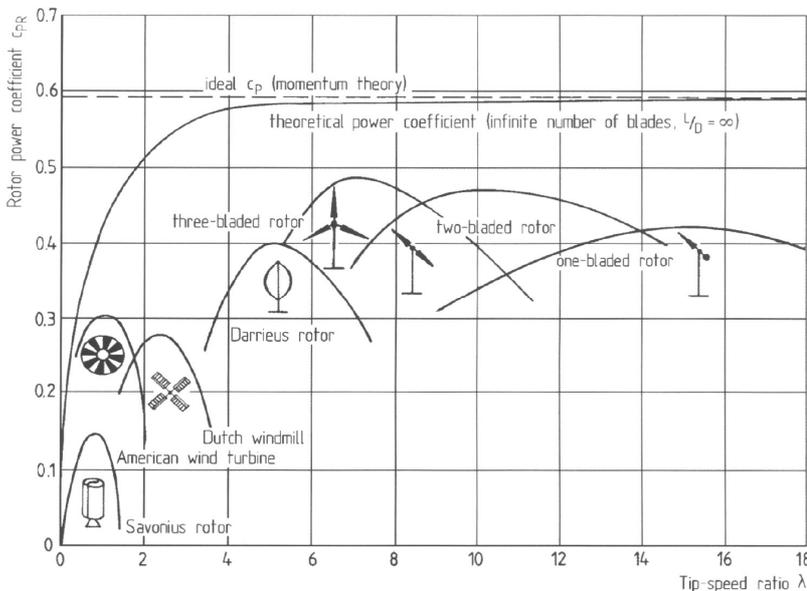


Figure 1.17 : Coefficients de puissance et en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbines

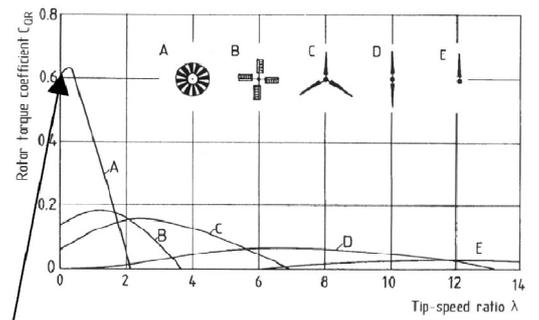


Figure 1.18 : Coefficients de couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour turbines a axe horizontal.

Les courbes donnant le coefficient de couple, figure 1.18, montrent l'évolution du couple de démarrage favorables aux éolienne multipales. Il en est de même pour les systèmes à axe vertical [9]. d'après les courbes de la figure 1.17, en remarque que la caractéristique de puissance  $C_p(\lambda)$  dépend principalement du nombre de pales [1], ces courbes montrent clairement l'avantage des éolienne à axes horizontaux en terme de puissance.

Les courbes  $C_p(\lambda)$  sont plus plates pour les éoliennes à axe horizontal à faible nombre de pales (3, 2,1) par rapport aux éoliennes à axe vertical ou aux multipales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de  $\lambda$  autour de  $\lambda^{opt}$  (fonction MPPT moins importante) [9].

Sur base du nombre de pales que compte l'hélice des éoliennes à axe horizontal on peut distinguer deux groupes: à rotation lente "multipales" et à rotation rapide "aérogénérateurs".

### VI-2-1 A rotation lente

Les éoliennes à rotation lente à axe horizontal est celle des machines multipales, figure 1.19, de faible diamètre (jusqu'à 10 m environ), sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40) qui, depuis longtemps, sont relativement répandues dans les campagnes. La masse importante de la roue aubagée, les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance servent quasi-exclusivement au pompage de l'eau. Cependant, une application récente de ce type de machine (avec des diamètres de l'ordre du mètre) est la génération électrique à bord de bateaux de plaisance ou de course au large. [54]. Elles démarrent à vide pour une vitesse de vent de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage est proportionnel au nombre de pales et au diamètre [37]. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite [23]; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [17] :

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \quad (1.1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.



Figure 1.19 – Éolienne multipale Eiffel (fin XIXe siècle)

### VI-2-2 Rotation rapide

Les éoliennes à rotation rapide en général constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, elles sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom plus courant "d'aérogénérateurs", en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé.

L'intérêt des éoliennes rapides est qu'elles sont à puissance égale beaucoup plus légère et leur prix est beaucoup plus faible que celui des éoliennes lentes. [17]

En général les éoliennes à marche rapides Possèdent entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation, la longueur des pales peut atteindre 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [23]. Les éoliennes bipales sont les plus économiques et les plus simples mais elles sont génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. L'éolienne tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde [12] [76].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur [23]

Leur coefficient de puissance, figure 1.16, atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente [23]

Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [23]. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [17]

D'après les tests effectués pour une éolienne rapide à axe horizontal, la puissance maximale peut être obtenue en appliquant la relation [17] :

$$P=0,2*D_2*V_3 \quad (1.2)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

C'est cette expression que l'on utilise en pratique pour déterminer, en première approximation, la puissance maximale susceptible d'être fournie par les éoliennes rapides qu'elles soient à 2,3 ou 4 pales. [17]

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal à rotation rapide :

#### VI-2-2-1 Amont

Les éoliennes « amont », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour avant la nacelle exposé au vent [54] comme montre la figure 1.20.a Ce sont les plus répandues [2] et la majorité des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » [54]

La formule « amont » requiert des pales rigides pour ne pas risquer de heurter la tour, ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure [2], de plus l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour, aussi l'éolienne doit être munie d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours tourné face au vent.

### VI-2-2-2 Aval

Ce sont les plus simples [2] car le positionnement du rotor est naturel (derrière la nacelle) et car aussi elles donnent de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

L'éolienne « aval » est théoriquement auto-orientable [54], mais il faut quand même prévoir un système d'orientation permettant la détorsion des câbles.

Un grand avantage de la configuration « aval » réside dans le fait que les pales du rotor sont plus flexibles ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône.

Par contre des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mat [1], en plus lorsque la pale passe dans l'ombre de pylône elle subit une forte variation, ceci augmente le risque de rupture de la pale [2], c'est la raison pour laquelle les éoliennes de ce type sont assez rares.

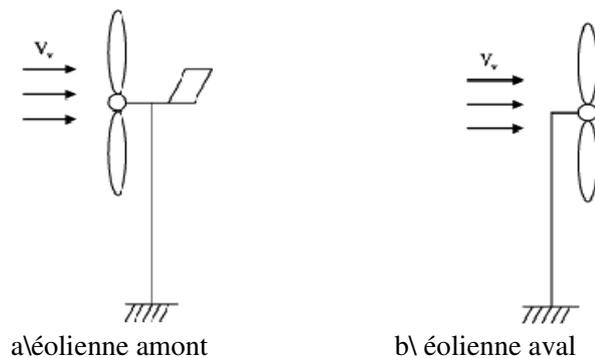


Figure 1.20 : Configurations à axe horizontal

## VII - Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique

### VII - 1 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [1]. Mais, la totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice. Le théorème du physicien allemand Albert Betz (années 1920) montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à  $16 / 27$ , soit environ 60 % de l'énergie totale du vent [55], cette théorie de Betz s'applique essentiellement aux éoliennes à axe horizontal [17].

On considère pour cela le système éolien à axe horizontal représenté par la figure 1.21 où une masse d'air traversant le disque de surface  $A$ , à une vitesse  $V$  et soient  $V_{am}$  et  $V_{av}$  les vitesses respectives en amont et en aval de la surface.

D'après les travaux de Froude, Rankine et Betz et sa fameuse loi ainsi que les travaux préliminaires d'Euler (théorème d'Euler) : La variation d'énergie de la masse d'air qui traverse un ensemble hélice est égale à la différence ou variation de la quantité d'air entre l'amont et l'aval de l'hélice, L'équation de conservation de la quantité de mouvement soit [53]:

$$F = \rho V^2 A (V_{av} - V_{am}) \quad (1.3)$$

En appliquant l'équation qui définit l'énergie, comme le produit d'une force par la vitesse, il vient :

$$P = F = \rho AV^2 (V_{av} - V_{am}) \quad (1.4)$$

Comme par ailleurs, la variation d'énergie cinétique donne :

$$P = \frac{1}{2} \rho AV (V_{av}^2 - V_{am}^2) \quad (1.5)$$

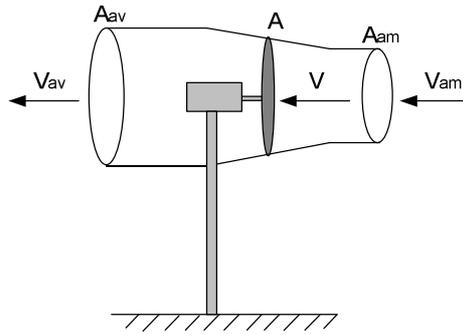


Figure 1.21 : Bilan sur une section de l'hélice

Par identification, il vient :

$$V = \frac{V_{av} + V_{am}}{2} \quad (1.6)$$

L'énergie cinétique moyenne, disponible sur un site donné, par unité de temps et par unité de surface, due à la vitesse du vent, s'écrit :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1.7)$$

En remplaçant l'équation (1.6) dans l'équation (1.7), on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V_{av}^2 - V_{am}^2) \left( \frac{V_{av} + V_{am}}{2} \right) \quad (1.8)$$

Le maximum récupéré par la roue est obtenu pour :

$$\frac{\partial P}{\partial V_{am}} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 P}{\partial V_{am}^2} = 0 \quad (1.9)$$

Soit pour :

$$3V_{am}^2 + 2V_{av}V_{am} - V_{av}^2 = 0 \quad (1.10)$$

Equation dont la solution est donnée par :

$$V_{am} = \frac{1}{3} V_{av} \quad (1.11)$$

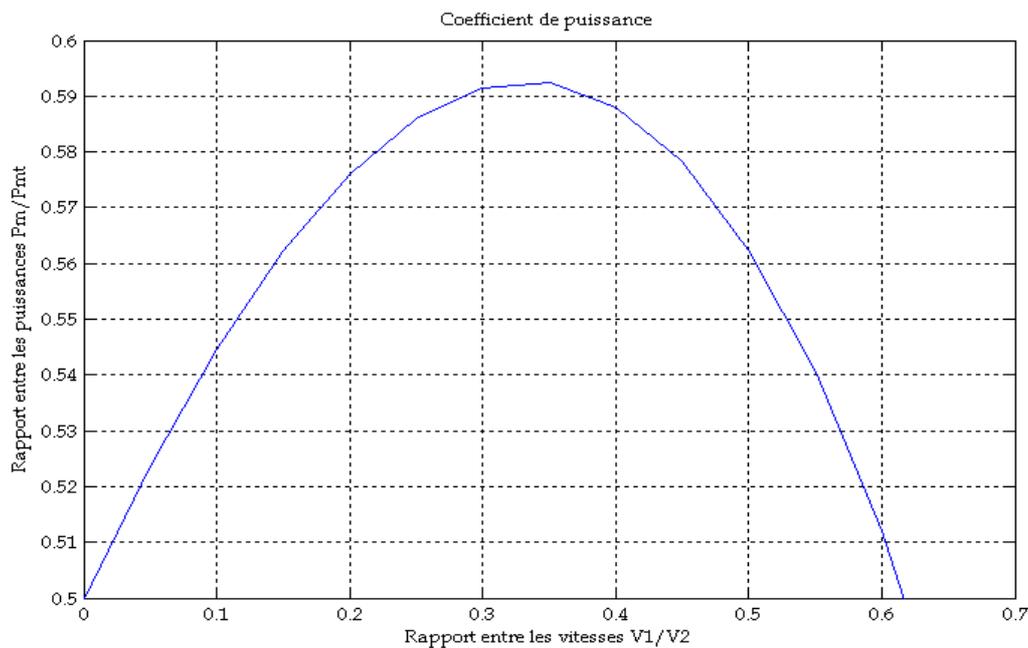
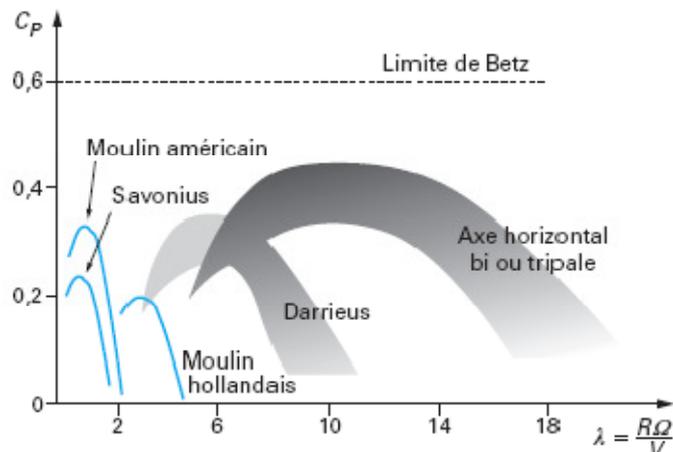
En remplaçant dans l'équation (1.8), la puissance maximale qui peut être extraite par une roue est égale à :

$$P_{Max} = \frac{1}{2} A \rho \left[ V_{av}^2 - \left( \frac{V_{av}}{3} \right)^2 \right] \left( \frac{V_{av}}{2} + \frac{V_{av}}{6} \right) \quad (1.12)$$

En se référant à l'équation (1.7), on obtient

$$P_{Max} = \frac{16}{27} P \quad (1.13)$$

C'est cette limite théorique ou le coefficient de puissance ( $C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$ ) appelée "limite de Betz" qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [23].

Figure 1.22 : coefficient de puissance  $C_p$ Figure 1.23 : limite de Betz  $C_p=f(\lambda)$  [54]

Il est donc à noter que les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65 % de la limite de Betz : on ne récupère donc globalement que 40 % de l'énergie due au vent.

## VIII - Le vent

L'atmosphère terrestre se compose de deux parties essentielles. La troposphère dont l'épaisseur représente 80% de la structure atmosphérique, son épaisseur est de l'ordre de 10 km et La stratosphère qui représente les 20%. [53]

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules concentrés dans la troposphère. Dans cette région, à cause de l'échauffement différentiel inégal de la surface terrestre par le soleil aux pôles et à l'équateur, de la rotation de la terre autour de son axe qui met l'air en mouvement et des forces de pressions dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, provoquent un déplacement d'importantes masses d'air de différentes densité d'une altitude à une autre. Le courant correspondant constitue le vent. [17]

La vitesse de vent augmente au fur et à mesure que l'on s'élève au dessus du sol. La figure 1.24 présente la carte des vents de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

On remarque que l'Algérie à un régime de vent modéré, de 2 à 6 m/s et que la vitesse augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6 m/s.

D'après [53] la région d'Oran, est classée parmi les régions ventées de l'Algérie et elle dispose d'un potentiel énergétique non négligeable où la valeur moyenne de la vitesse de vent est de 4.5 m/s.

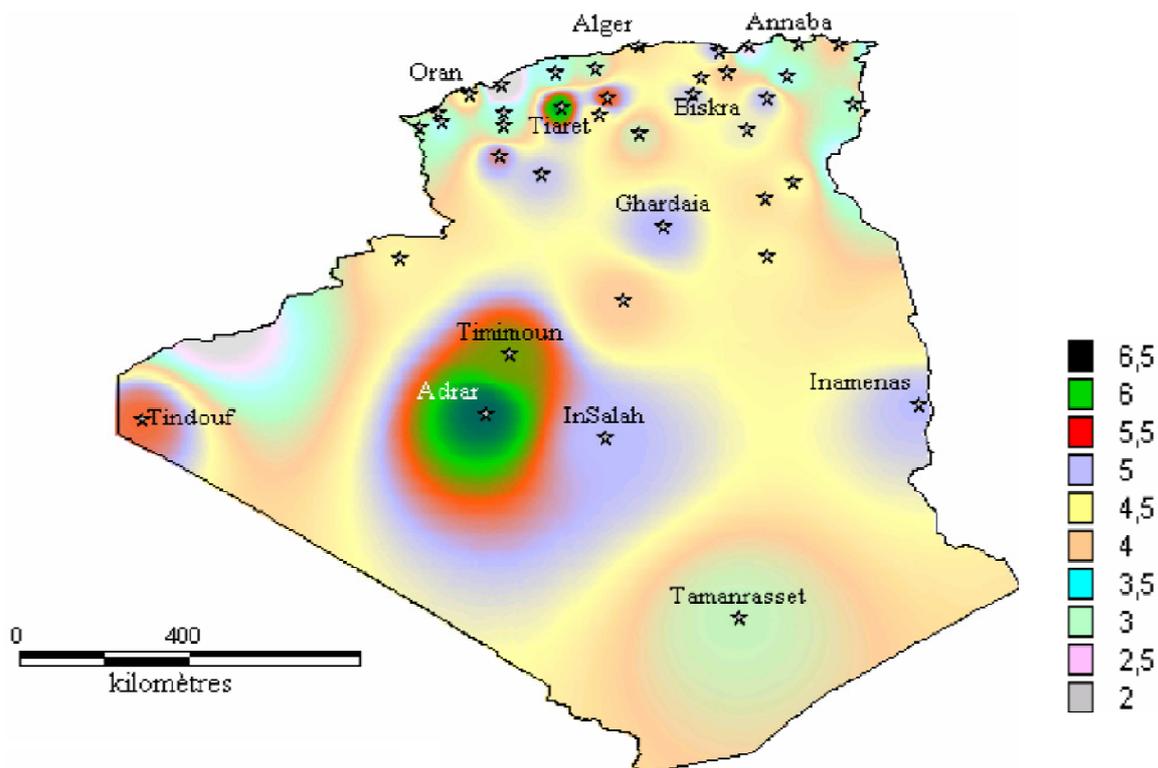


Figure 1.24 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. [53]

## IX - Bilan des forces sur une pale

Une coupe transversale d'une pale d'éolienne est représentée sur la figure 1.25 Où toutes les forces et vitesses mises en jeu sont représentées.

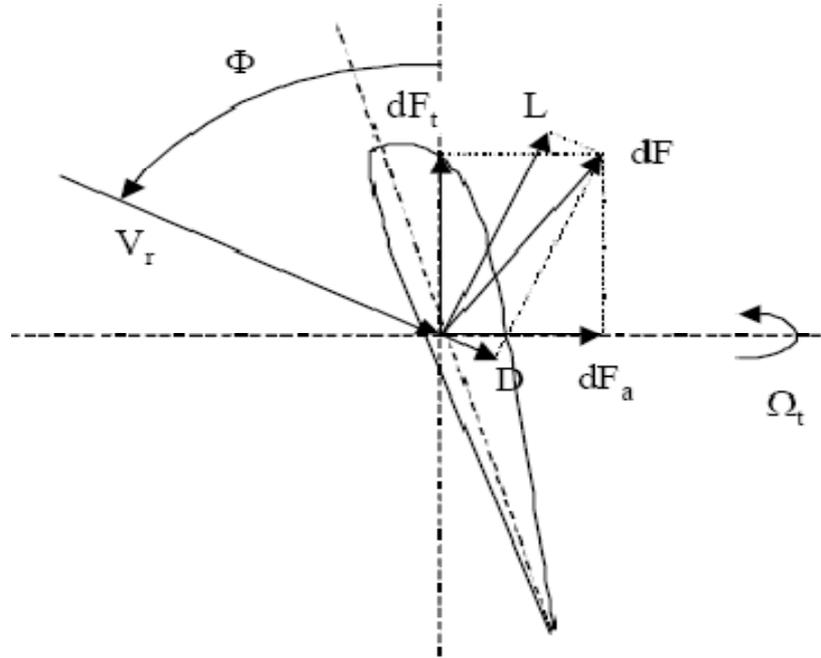


Figure 1.25 : coupe transversale d'une pale d'éolienne

La vitesse relative  $V_r$  est la vitesse du vent incident sur l'élément de pale, Elle est définie par la superposition de la vitesse du vent incident sur le rotor et de la vitesse du vent résultant de la vitesse de rotation  $\Omega_t$  du rotor. La vitesse  $V_r$  produit deux vecteurs forces, la force de portance  $L$  perpendiculaire à la direction de  $V_r$  et celle de traînée  $D$  parallèle à la direction de  $V_r$ . Ces forces ont pour expression : [28]

$$L = \frac{\rho c}{2} V_r^2 c_L \quad (1.14)$$

$$D = \frac{\rho c}{2} V_r^2 c_D \quad (1.15)$$

Avec  $c$  est la longueur de la corde du profil,  $\rho$  est la densité de l'air,  $c_L$  et  $c_D$  représentent respectivement le coefficient de portance et de traînée. Ces deux coefficients dépendent de l'angle d'attaque (fonction de l'angle d'incidence  $\Phi$  du vent sur le rotor et de l'angle de calage  $\beta$  des pales) et du type de profil de la pale.

L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale  $dF_a$  et tangentielle  $dF_t$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est dimensionnée de telle sorte que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent donnée. Lorsque la vitesse de vent est très importante ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être limitée à sa valeur nominale ou annulée, suivant la force du vent. [23]

Ces deux forces sont calculées à partir des expressions de la portance et la traînée [28] :

$$dF_a = \frac{\rho c}{2} V_r^2 (c_L(\alpha) \cos(\Phi) + c_D(\alpha) \sin(\Phi)) \quad (1.16)$$

$$dF_t = \frac{\rho c}{2} V_r^2 (c_L(\alpha) \sin(\Phi) + c_D(\alpha) \cos(\Phi)) \quad (1.17)$$

Pour calculer la force de poussée axiale et du couple aérodynamique (couple capté par la turbine), il suffit de faire la somme des intégrales sur toutes les pales, des composantes horizontales et verticales des forces de portances et de traînée. Où ces expressions sont les suivantes :

$$F_a = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a(r) dr \quad (1.18)$$

$$T_t = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r dF_t(r) dr \quad (1.19)$$

Où  $N_p$  est le nombre de pales,  $R$  est le rayon de l'aéroturbine et  $R_m$  est la distance du centre du moyeu au coin de la pale côté moyeu.

La figure 1.26 représente la déformation d'une pale d'éolienne en traction sous l'effet de la rotation (la résistance du vent axial).

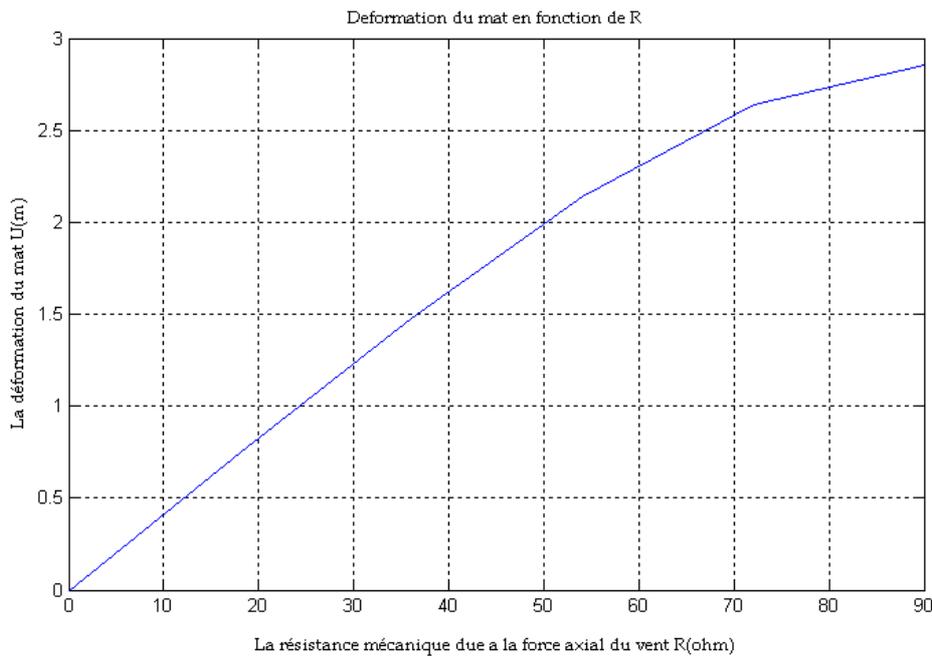


Figure 1.26 : Déformation d'une pale d'éolienne.

## X – Régulation de la puissance

La formule de Betz montre clairement que la puissance extraite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho S V_{\text{vent}}^3 \quad (1.20)$$

L'aérogénérateur est dimensionné pour développer une puissance nominale [52], il ne peut donc pas supporter des grandeurs supérieures à certaines limites. De ce fait lorsque le vent devient trop important, où sa vitesse est supérieur a la vitesse nominal  $V_n$  pour laquelle l'éolienne a été conçue, Il faut donc limiter la puissance captée par l'éolienne de sorte que sa vitesse de rotation

reste pratiquement constante, ou même d'arrêter le transfert de l'énergie lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne, afin d'éviter la destruction mécanique et d'assurer sa sécurité. [9] [69]

La figure 1.27 représente la caractéristique de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. On distingue quatre zones [54] [9] [52] :

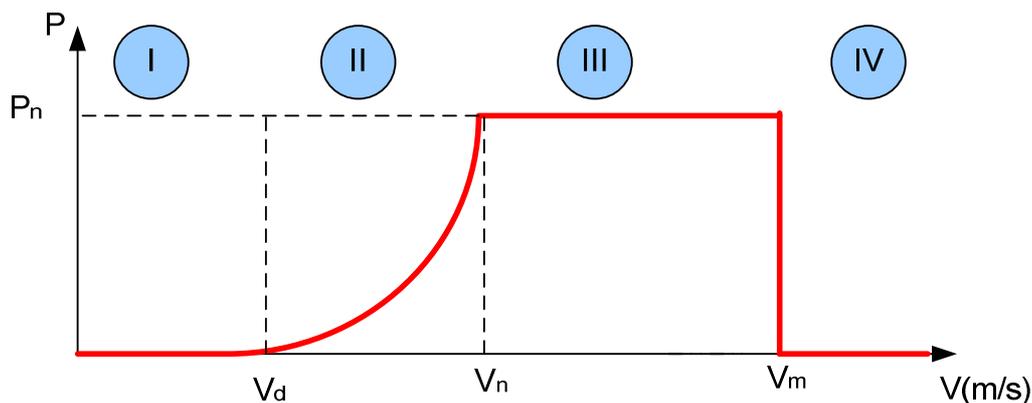


Figure 1.27 : caractéristique de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

- la zone I, où  $P$  est nulle (la turbine ne fournit pas de puissance) car la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage  $v_D$  de l'éolienne.
- la zone II, dans laquelle la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, c'est la zone d'optimisation de la conversion d'énergie (MPPT) dans laquelle la vitesse du vent évolue dans le domaine  $[V_d, V_n]$ , c'est la zone dans laquelle il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation, la puissance récupérée est donc variable.
- la zone III, la puissance nominale est atteinte, elle doit être donc limitée ou maintenue la vitesse de rotation constante par un dispositif de régulation.
- la zone IV, Au delà d'une certaine limite de vitesse du vent où elle dépasse la valeur maximale admissible, le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

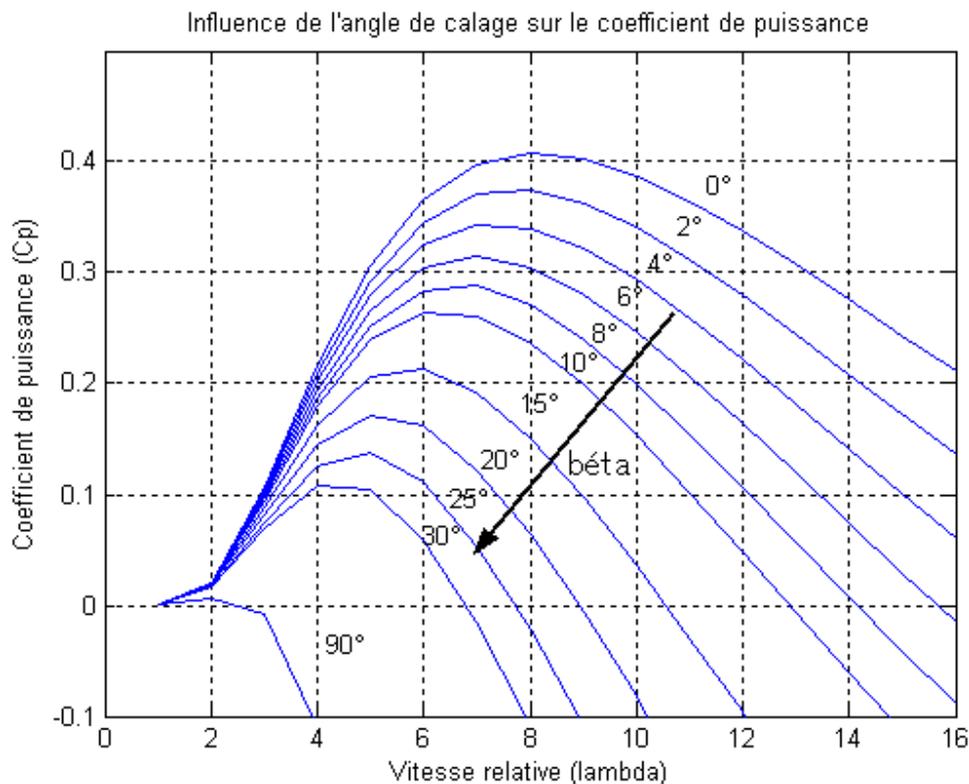
Pour contrôler la puissance aérodynamique extraite par la turbine, La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes :

**La première** est une technique de régulation complexe et assez onéreuse appelée pitch control ou « régulation par variation d'angle de calage » [1] [69] [28], elle consiste à contrôler activement le comportement aérodynamique de la turbine en modifiant l'angle de calage des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses [52], ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire par la mise en drapeau des pales ( $\beta = 90^\circ$ ) [69].

L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique commandé par vérins hydrauliques, ce système est néanmoins le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance, ou par des moteurs électriques pour les très grandes éoliennes [28])

Ce système de régulation offre les avantages suivants : [9] [54]

- démarrage rapide par changement de l'angle de calage.
- l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue. entre les limites  $[v_D, v_n]$  en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite.
- la régulation par limitation de la puissance pour  $v > v_n$ .
- la protection de l'éolienne contre les vents trop violents  $v > v_m$ .
- il n'y a pas besoin de freins puissants pour les arrêts d'urgence.



La figure 1.28 : l'effet de l'angle de pas sur le coefficient aérodynamique de puissance CP

La figure 1.28 montre l'effet de l'angle de pas sur le coefficient aérodynamique de puissance  $C_p$ . On voit bien que la variation de la position angulaire des pales sur leur axe résulte d'un décalage dynamique de la courbe du coefficient de puissance de la voilure, sachant qu'une valeur négative de ce dernier ( $\beta=90^\circ$ ) correspond à un fonctionnement frein et un angle nul de pas correspond à une pale face au vent.

**La seconde** s'agit d'un système de contrôle passif qui réagit au-delà d'une certaine vitesse du vent, car au-delà d'un certain angle de calage des pales la portance générée par le profil croît, passe par un maximum et décroît brutalement (pas besoin de système d'orientation des pales). [55] [9]. Grâce au profil de la pale plus bombé à l'extrados, l'aire qui circule au-dessus à plus de chemin à parcourir que l'aire qui circule en dessous (l'intrados), et comme les molécules de l'air partent au même temps début du profil et arrivent au même temps à la fin, l'écoulement de l'air est

plus rapide sur l'extrados. Et quand l'air va plus vite il exerce moins de pression. La dépression qui en résulte à l'extrados l'aire est aspirer vers le haut et crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler, et dans le cas d'une éolienne la pale est aspirer vers l'avant. Ici, il consiste à pivoté les pales de l'éolienne de telle façon à régler l'angle de d'incidence Pour avoir un écoulement de l'aire turbulent, donc, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle «le décrochage aérodynamique ou système stall » [50]. Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle stall-actif plus robuste.

les avantages suivants : [50] [9]

- Il y a possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation.
- pas de système de contrôle d'angle de calage
- construction plus simple et moins coûteuse du rotor
- maintenance plus aisée ou meilleure fiabilité (nombre plus réduit de pièces mécaniques en mouvement).

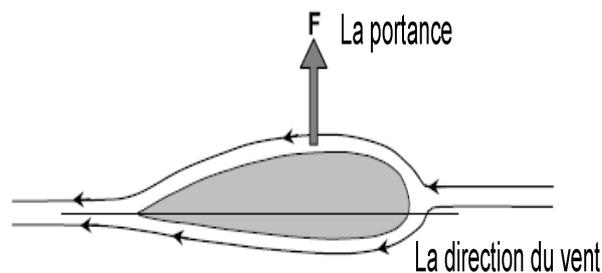


Figure 1.29 : Ecoulement d'air autour d'une pale en régime normal.

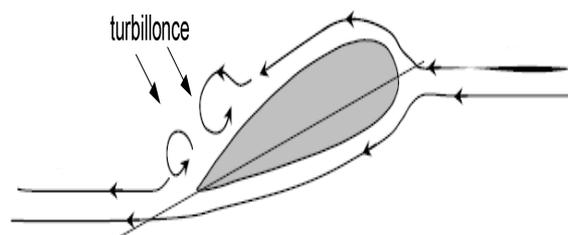


Figure 1.30 : Ecoulement d'air sur une pale en situation de décrochage aérodynamique

## XI - Etat de l'art sur la conversion électromécanique

### XI - 1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

#### XI - 1 - 1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné est une machine à induction triphasée, à une double accessibilité au stator et au rotor. Son stator est identique à

celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil, son rotor est composé d'enroulement triphasé disposé de la même manière que les enroulements statoriques, accessibles par trois bagues munies de contacts glissants.



Figure 1.31 Machine à induction à rotor bobiné [71], [62]

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines. [1]

#### **XI - 1- 2 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée**

Ce type de machine comme il est montré sur la figure 1.32, a été utilisé par le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" où le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [23]. Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur, qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotorique, figure 1.33.

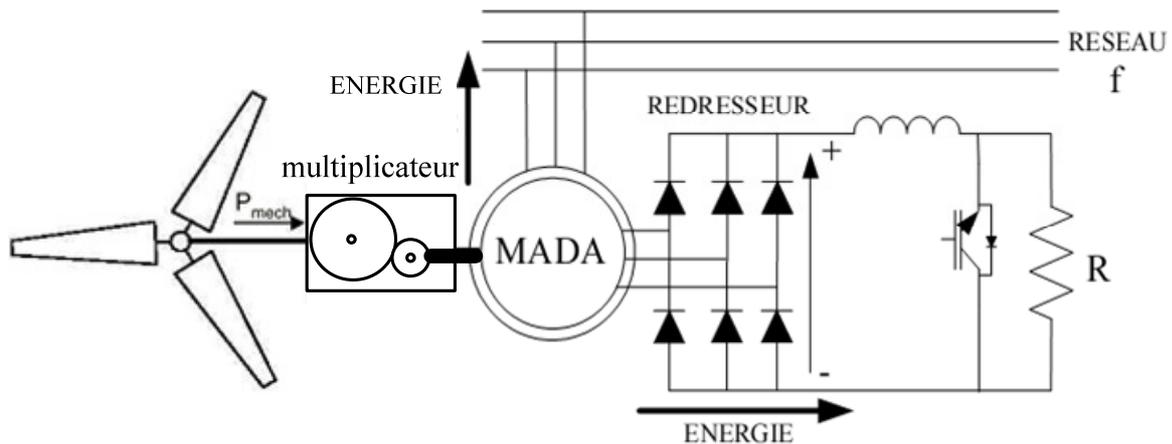


Figure 1.32 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

L'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs diminue le rendement du système de conversion [43].

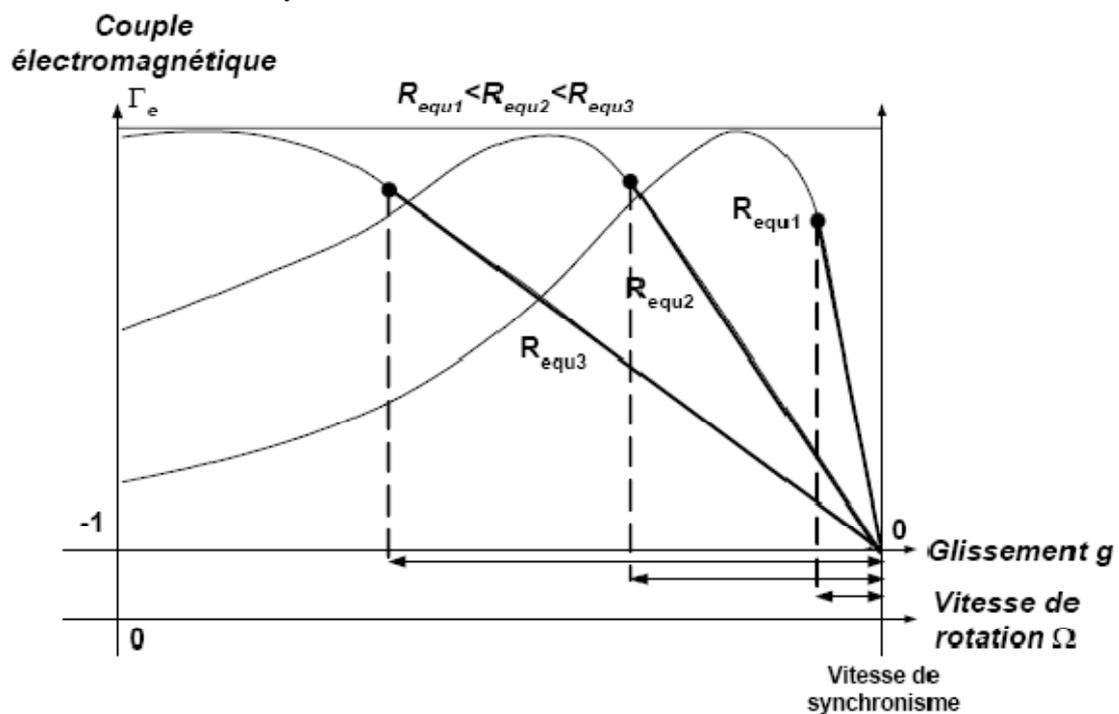


Figure 1.33 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

### XI - 1 - 3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Pour minimiser les pertes d'énergie dues à la structure du dispositif précédent le physicien Kramer a remplacés le hacheur et la résistance par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau, figure 1.34

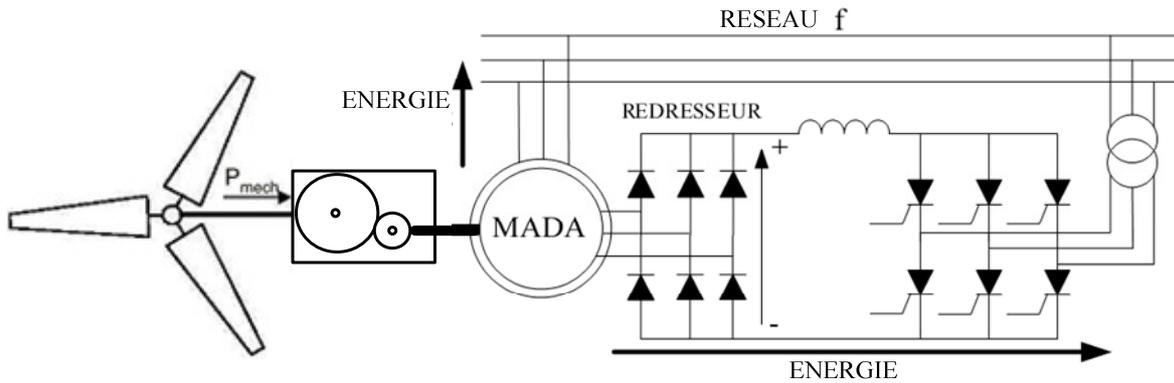


Figure 1.34 : MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone, figure 1-17. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de *Scherbius* avec convertisseurs à IGBT [23].

#### XI-1-4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur

La structure de Scherbius est une amélioration de la structure précédente où le système redresseur-onduleur est remplacé par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, figure 1.35.

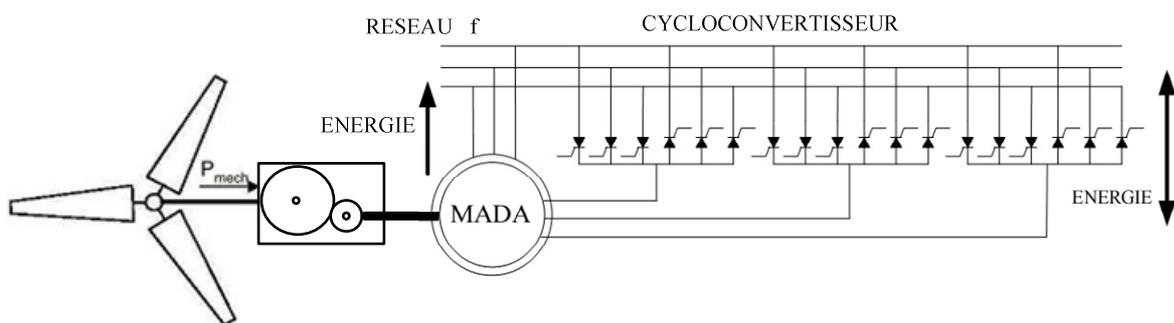


Figure 1.35 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [62]. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au

remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

#### XI-1-5 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Dans cette structure l'enroulement rotorique est connecté à un ensemble à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI, en cascade, est inséré afin de contrôler le flux et la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du coté de la machine et contrôle aussi des puissances actives et réactives transitées du coté du réseau.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

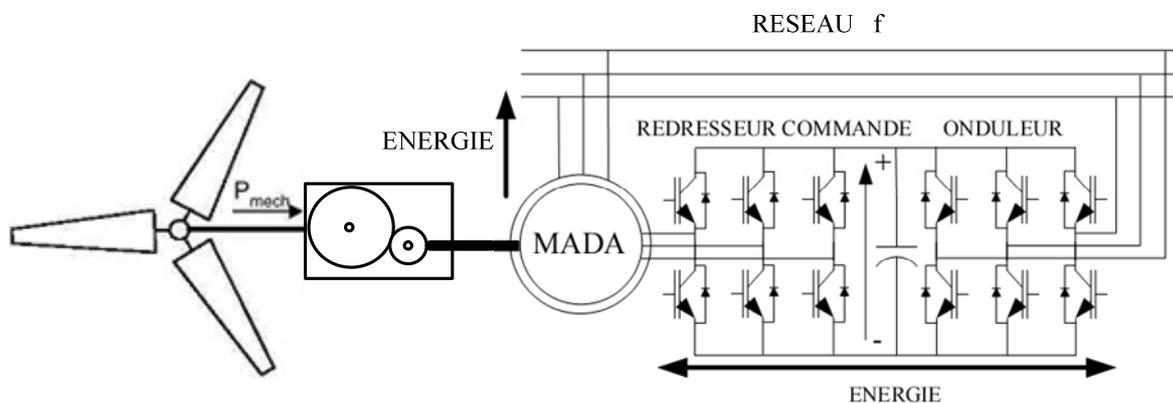


Figure 1.36 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Un tel dispositif a l'avantage de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, de plus, il permet de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des  $(dv/dt)$  importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevées dans ces mêmes enroulements [9]. On outre, ce dispositif propose un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine

## XI - 2 Systèmes utilisant la machine synchrone

### XI – 2 - 1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Les machines synchrones sont utilisées dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique) car elles offrent des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Leurs performances, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à

entraînement direct sont toutes à vitesse variable [52]. La figure 1.37 [23] présente l'exemple d'une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau.

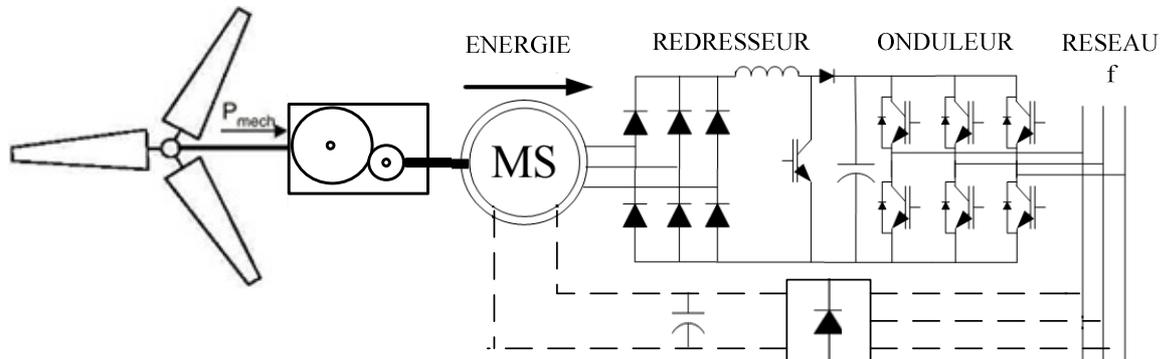


Figure 1.37 : Machine synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses, le principal fabricant est Enercon (plusieurs milliers de machines sont déjà en service, 300 kW, 600 kW, 1 MW et 1,8 MW). L'inducteur (rotor) est bobiné, il nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI. Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie, 750 kW) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné [10]. Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [45].

### XI - 3 Machines à structures spéciales

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable. C'est leur potentiel de faible coût et de robustesse qui conduit à ces recherches. Des machines à réluctance variable excitées par des bobinages inducteurs ou par des aimants peuvent également être envisagées [9]. Leur principe est simple, il consiste à modifier l'inductance propre d'une bobine, ou l'inductance mutuelle de plusieurs bobines judicieusement alimentées, par déplacement d'une pièce en matériau ferromagnétique.

#### XI - 3 - 1 Machine à réluctance variable (MRV) non excitée

Les machines MRV non excitée, figure 1.38, comprend 48 dents au stator réparties sur douze plots et 64 dents au rotor [23]. C'est d'une machine triphasée à deux paires de pôles caractérisée par un pas dentaire statorique égal à celui du rotor. La forme et les dimensions des encoches sont optimisées à l'aide d'une méthode génétique couplée à la méthode des éléments finis.

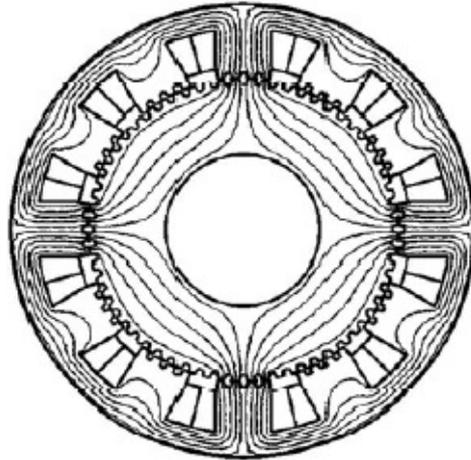


Figure 1.38: Prototype de MRV non-excitée

### XI - 3 - 2 Machine à réluctance variable excitée par des courants triphasés au stator

La machine à réluctance variable excitée par des courants triphasés au stator comprend  $N_s$  dents au stator et  $N_r$  dents au rotor dotée de deux bobinages triphasés au stator de polarité différentes  $p$  et  $p'$ . En respectant la condition de base entre les dentures et les polarités, à savoir  $\pm N_s \pm N_r = \pm p \pm p'$  elle génère un couple électromagnétique constant à la vitesse de synchronisme donnée par  $\Omega = \frac{\omega \pm \omega'}{N_r}$  où  $\omega$  et  $\omega'$  représentent respectivement les pulsations de l'induit et de l'inducteur. Le fonctionnement est alors similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse [23].

## XII- Conclusion

Après un petit historique une généralité des différentes ressources énergétiques renouvelables est présentée où on a donné les caractéristiques de chacune d'elles, il a été montré leur importance pour la génération future et sur l'environnement notamment.

La seconde partie du chapitre présente un état de l'art sur les systèmes éoliens ayant pour but de donner des solutions pour intégrer la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes au réseau national avec les autres sources d'électricité. Dans ce contexte une brève description du gisement éolien a été décrite, ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes éoliens, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données, comme les caractéristiques du vent où on a donné une carte de l'atlas vent de l'Algérie qui présente les vitesses moyenne du vent estimée à 10 m du sol, cela a pour but de sélectionner les zones les plus ventées. En suite Nous avons décrit de façon explicite les différents éléments

constitutifs une éolienne, aussi la stratégies de fonctionnement des deux grands types d'éoliennes (à axe horizontal, vertical) et leurs caractéristiques où on se limitera dans la suite de cette étude uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal car c'est la technologie largement dominante aujourd'hui et la plus répandue et son rendement est supérieur. En outre, le Principe de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dans se titre quelques notions principales ont été décrite comme l'expression de la puissance extraite, l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse du vent, la mise en évidence de la limite de Betz, etc. Ainsi, nous avons montré les techniques adoptées pour la régulation de la puissance aérodynamique recueillie par la turbine (le calage variable ou le décrochage aérodynamique).

Enfin nous avons présenté les différents types et les principales caractéristiques des générateurs électriques pour aérogénérateurs en précisant les convertisseurs d'électronique de puissance associer, où on avue que la machine à double alimentation fera l'objet d'une attention particulière, et actuellement c'est la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne.

## Chapitre 2

# ETUDE D'UN SYSTEME DE CONVERSION AUTONOME

### **I- Introduction :**

Actuellement la génératrice à induction auto-amorcée est très utilisée dans le domaine éolien car elle réunit les avantages de la machine asynchrone d'une part, robuste et peu chère, et d'autre part du phénomène d'auto-excitation, dont en absence du réseau pilote (îles non raccordés aux réseau, lieu d'habitation éloigné du réseau électrique) ou lorsque le raccordement au réseau est impossible, trop cher ou trop complexe à réaliser, il est possible d'auto exciter la génératrice asynchrone par une batterie de condensateurs connectés en parallèle au bobinage statorique ou en utilisant un convertisseur (onduleur/redresseur commandé par la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et une capacité connectée au coté continu du convertisseur.

Les éoliennes utilisées hors du réseau électrique permettent d'avoir de l'énergie dans des endroits isolés, ce sont généralement des machines dont la puissance varie de quelques centaines de kW à quelques MW.

Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la machine. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif, un modèle de la machine est établi dans un repère de Park, ensuite le phénomène d'auto-amorçages de la génératrice asynchrone est modélisé avec l'usage de capacité, des simulations sont alors effectuées a pour bute d'étudier le phénomène d'auto-amorçage.

## **II- Modélisation du dispositif :**

Le modèle de la machine asynchrone permet de simuler son fonctionnement et de déboucher sur une commande, pour cela nous présenterons le modèle mathématique triphasé de la machine asynchrone et de sa transformation dans le système biphasé. Une représentation sous forme d'état est élaborée à partir des lois physiques qui régissent son fonctionnement en alimentant notre machine en tension. [41] [42]

### **II-1- Hypothèses simplificatrices :**

Afin de faciliter la mise en équation de la machine, nous sommes amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices [58] [33]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La perméabilité du fer est infinie.
- L'enroulement statorique est identique par rapport à l'axe de symétrie.
- Les barres rotoriques sont uniformément distribuées.
- La saturation, les courants de Foucaults, les frottements et l'effet de peau sont négligés.
- Les ouvertures des encoches et leur inclinaison ne sont pas prises en compte.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

### **II-2- Modèle dynamique :**

La MAS triphasée est représenté schématiquement par la figure (2.1) elle est munie de six enroulements. [25] [23] [47]

Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés dans l'espace de  $120^\circ$  et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de  $120^\circ$ .

Ces enroulements sont encourt-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

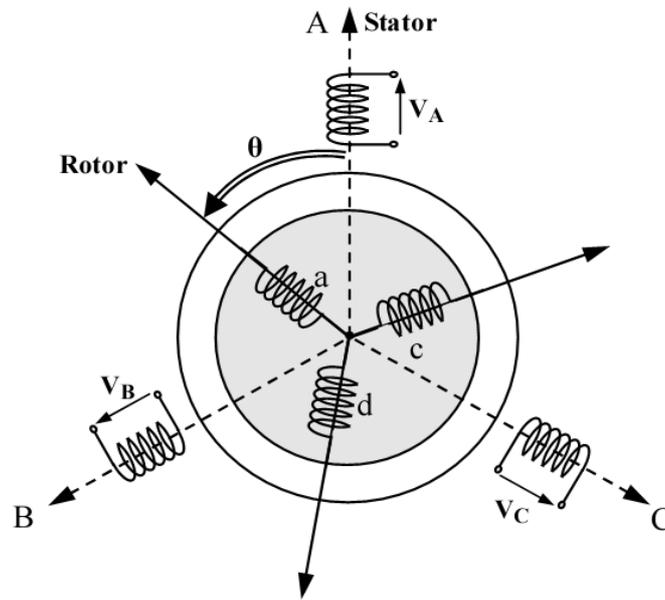


Figure 2.1 : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

### II-2-1 Equations électriques :

Le système d'équations des trois phases de la machine à cage s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

$$[V_s] = [v_A \ v_B \ v_C]^T, [V_r] = [v_a \ v_b \ v_c]^T, [I_s] = [I_A \ I_B \ I_C]^T, [I_r] = [I_a \ I_b \ I_c]^T, \\ [\Phi_s] = [\Phi_A \ \Phi_B \ \Phi_C]^T, [\Phi_r] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T.$$

Les matrices des résistances statoriques et rotoriques sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### II.2.2 Equations magnétiques :

Les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes A, B, C et a, b, c s'expriment comme suit :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \quad (2.2)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \quad (2.3)$$

Où

$l_s, l_r$  : Inductances propres statorique et rotorique

$M_s, M_r$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques

$M_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Avec :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (2.4)$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & (\cos \theta + \frac{2\Pi}{3}) & (\cos \theta - \frac{2\Pi}{3}) \\ (\cos \theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta & (\cos \theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ (\cos \theta + \frac{2\Pi}{3}) & (\cos \theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

On obtient finalement le modèle asynchrone triphasé :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} \quad (2.5)$$

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + [M_{rs}] \frac{d[I_s]}{dt} \quad (2.6)$$

Ce modèle est très difficile à résoudre vu de la variation de ces paramètres avec le temps. Pour surmonter cette difficulté, on change de référentiel de projection des grandeurs électriques et électromagnétique (tension, courant, flux) on transforme notre système à un système biphasé, soit la transformation de Park, ce qui conduit à des relations indépendantes de la position.

### II-3 Transformation du système triphasé

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à Coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement difficile, vu le grand nombre de variables. C'est là où apparaît l'intérêt des matrices de transformations, on utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficient constant. Ces transformations doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui reste variable pour la machine réelle [25]. Parmi les transformations utilisées, on cite celles de Park, Park modifiée et de Concordia mentionnées dans l'annexe B.

Si on appelle  $\theta$  l'angle de rotation électrique entre l'axe d du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase a du stator, nous avons alors [23] :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = P(-\theta)T_{32}^t \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\ T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

En appliquant ces transformations aux équations des tensions, des flux, nous obtenons le modèle électrique diphasé :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \dot{\theta}_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \dot{\theta}_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \dot{\theta}_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \dot{\theta}_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.10)$$

$\theta_s$  : Angles du champ tournant statorique.

$\theta_r$  : Angles de position du rotor par rapport au stator.

D'après la relation matricielle (II.7) on peut représenter notre machine par la figure II.2

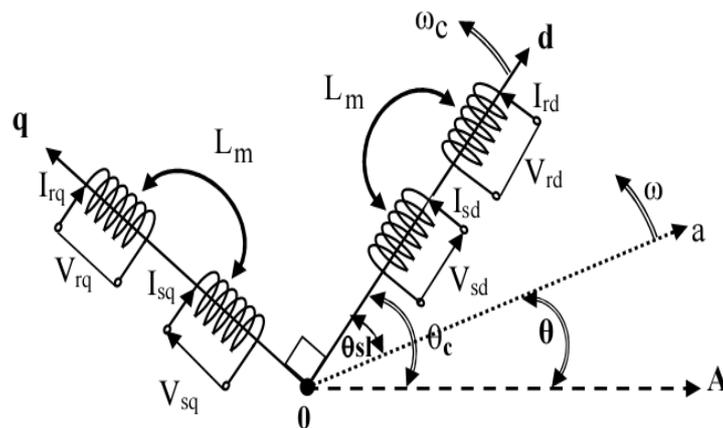


Figure 2.2 : Représentation de la machine dans le repère diphasé

**L'équation mécanique est donnée par :**

$$\Gamma_{em} = \Gamma_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.11)$$

**Avec**

$\Gamma_{em}$  : Couple électromagnétique.

$\Gamma_r$  : Couple résistant.

$f$  : Coefficient de frottements visqueux.

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine.

$J$  : Inertie de la machine.

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction des inductances cycliques, des flux et du nombre de paire de pôles  $p$  de la machine par la relation :

$$\Gamma_{em} = \frac{pM}{L_S L_r - M^2} (\Phi_{dr} \Phi_{qs} - \Phi_{qr} \Phi_{ds}) \quad (2.12)$$

D'après les équations (2.9), (2.10) et (2.11), nous obtenons le modèle d'état dans un repère diphasé fixe  $\alpha$  et  $\beta$  lié au stator:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{S\alpha} \\ \Phi_{S\beta} \\ \Phi_{R\alpha} \\ \Phi_{R\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -AR_S & 0 & CR_S & 0 \\ 0 & -AR_S & 0 & CR_S \\ CR_r & 0 & -BR_r & -p\Omega \\ 0 & CR_r & p\Omega & -BR_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{S\alpha} \\ \Phi_{S\beta} \\ \Phi_{R\alpha} \\ \Phi_{R\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} \frac{pM}{L_S L_r - M^2} (\Phi_{r\alpha} \Phi_{s\beta} - \Phi_{r\beta} \Phi_{s\alpha}) - \frac{\Gamma_r}{J} - \frac{f}{J} \Omega \end{array} \right. \quad (2.13)$$

**Avec :**

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{s\alpha} = A\Phi_{s\alpha} - C\Phi_{r\beta} \\ I_{s\beta} = A\Phi_{s\beta} - C\Phi_{r\alpha} \\ I_{r\alpha} = B\Phi_{r\alpha} - C\Phi_{s\beta} \\ I_{r\beta} = B\Phi_{r\beta} - C\Phi_{s\alpha} \\ A = \frac{1}{\sigma L_S}, B = \frac{1}{\sigma L_r}, C = \frac{1-\sigma}{\sigma M}, \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_S} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Avec  $\sigma$  le coefficient de dispersion.

#### II-4 Auto-amorçage de la génératrice asynchrone

Pour pouvoir alimenter une charge isolée en absence de réseau pilote, on utilise un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée figure II.3 par des capacités directement connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome [58], cette batterie de condensateurs est correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage et enfin les entretenir. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour son auto-amorçage [14].

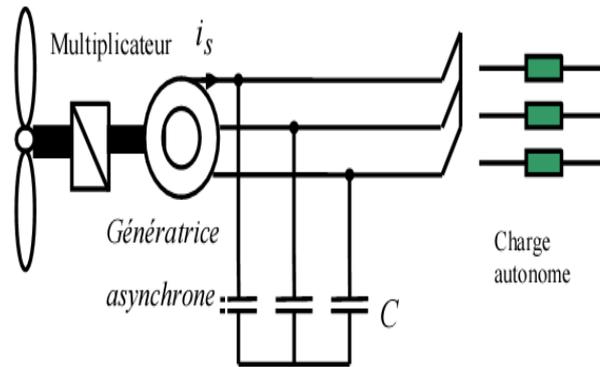


Figure 2.3 : Chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto-amorçée

#### II-4-1 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage [23] [5] [48] [51]

Soit le schéma équivalent simplifié ramené au stator d'une phase de la machine asynchrone de la figure (2.4) où une charge résistive et une capacité d'auto-excitation sont connecté au stator de la machine.

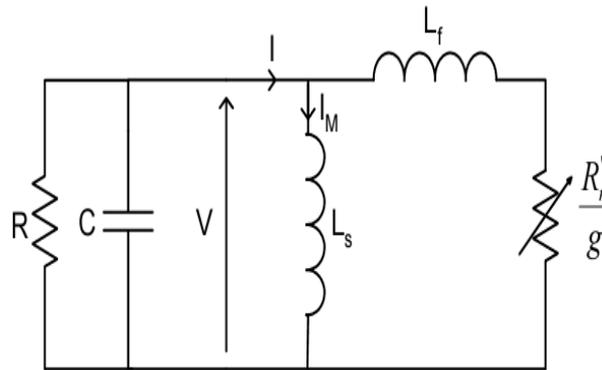


Figure 2.4 : Schéma équivalent simplifié d'une phase de la machine asynchrone ramené au stator sous une charge résistive

Où,

$L_f$  : l'inductance de fuites totales.

$M$  : l'inductance magnétisante.

$R'_r$  la résistance rotorique ramenée au stator.

$g$  : le glissement.

Soit  $Z_{tot}$  l'impédance résultante vu des bornes de la génératrice, alors :

$$\frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{R} - \frac{1}{\frac{j}{C\omega}} + \frac{1}{jL_s\omega} \quad (2.15)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{R} + jC\omega + \frac{1}{jL_s\omega} \quad (2.16)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{Z_{tot}} = \frac{L_s \omega + jL_s \omega^2 CR - Rj}{RL_s \omega} \quad (2.17)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{R} + j \frac{L_s \omega^2 C - 1}{L_s \omega} \quad (2.18)$$

$$\Leftrightarrow Z_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \frac{L_s \omega^2 C - 1}{L_s \omega}} = \frac{\frac{1}{R} - j \frac{L_s \omega^2 C - 1}{L_s \omega}}{\frac{1}{R^2} + \left[ \frac{L_s \omega^2 C - 1}{L_s \omega} \right]^2} \quad (2.19)$$

On remarque que l'expression de  $Z_{tot}$  est sous la forme :

$Z_{tot} = Re + jIm$ , Où

$$Re = R_1 = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{R^2} + \left[ \frac{L_s \omega^2 C - 1}{L_s \omega} \right]^2} = \frac{R}{1 + \left[ R(C\omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s}) \right]^2} \quad (2.20)$$

$$Im = C_1 = \frac{1 + \left[ R(C\omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s}) \right]^2}{R^2 (C\omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s})} \quad (2.21)$$

Donc on peut transformer le schéma équivalent de la figure (2.4) comme indiqué sur la figure (2.5) :

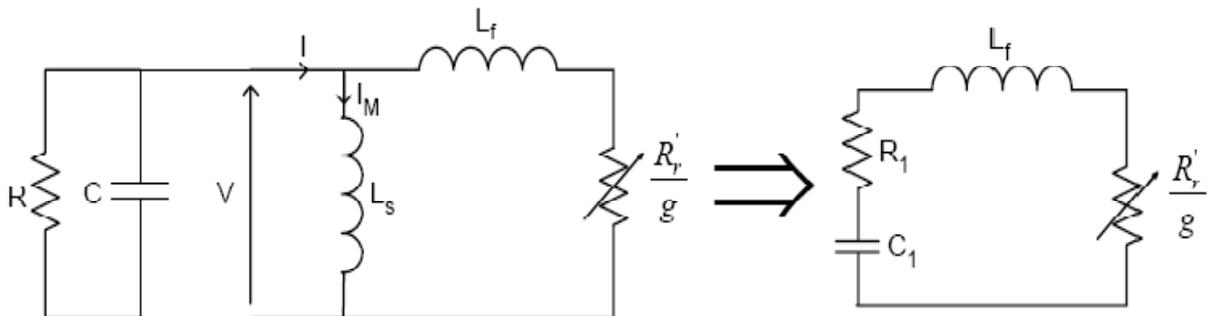


Figure 2.5 : Transformation du schéma équivalent

Avec  $R_1$  et  $C_1$  sont les éléments calculés précédemment.

Donc on peut exprimer  $Z_{tot}$  sous la forme

$$Z_{tot} = Z_P + Z_Q = 0 \quad (2.22)$$

Le phénomène d'auto-amorçage correspond au passage d'un état d'équilibre instable à un état d'équilibre stable, et il ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit

correspond à celle qu'elle absorbe, ceci sera assuré si l'équation II.17 est satisfaite, c'est à dire pour la partie puissance réactive, on doit alors satisfaire l'égalité suivante :

$$L_f \omega_s - \frac{1}{C_1 \omega_s} = 0 \quad (2.23)$$

$$\text{Soit } L_f = \frac{R^2 L_s (L_s C \omega_s^2 - 1)}{(L_s \omega_s)^2 + R^2 (L_s C \omega_s^2 - 1)^2} = L(\omega_s) \quad (2.24)$$

Mais l'inductance  $L_f$  doit être positive, se qui conduit à une condition nécessaire à l'amorçage :

$$L_s C \omega_s^2 > 1 \quad (2.25)$$

Donc d'après cette condition, l'auto-amorçage est en fonction de l'inductance  $L_s$  et de la pulsation  $\omega_s$  donc du glissement, ceci est bien claire dans la caractéristique  $L(\omega_s)$  figure (2.6)

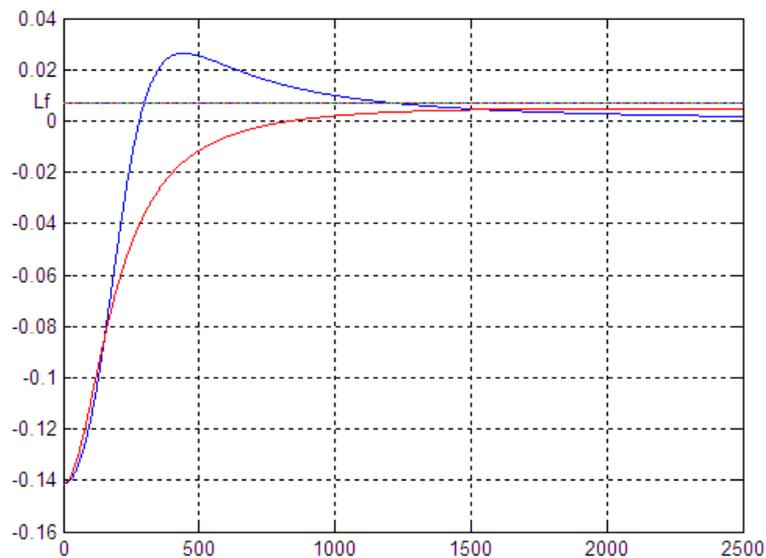


Figure 2.6 : Caractéristique  $L(\omega_s)$

L'amorçage est possible que si  $L(\omega_s)$  soit supérieur à  $L_f$ , c'est le cas de la courbe en bleu, et qu'elle vérifie l'équation  $L_f$  dans les deux points d'intersections, c'est le contraire pour le cas de la courbe en rouge, c'est-à-dire pas d'amorçage si  $L(\omega_s)$  est inférieur à  $L_f$ .

Pour la partie puissance active, on doit satisfaire l'égalité suivante :

$$Z_p = \frac{R'}{g} + R_1 = 0 \quad (2.26)$$

$$\text{Avec } R_1 = \frac{R}{1 + \left[ R \left( C \omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s} \right) \right]^2} \quad (2.27)$$

$$\text{Soit } g = -\frac{R'_r}{R} \left[ 1 + R^2 \left( C\omega_s - \frac{1}{M\omega_s} \right)^2 \right] \quad (2.28)$$

### II-5 Modélisation de l'autoamorçage : [67] [6] [15] [72] [49]

Actuellement la génératrice asynchrone auto-excitée est trop utilisée dans le domaine éolien, la génératrice à induction auto-excitée SEIG a beaucoup d'avantage si on la compare avec la génératrice à courant continu et la génératrice synchrone, du fait de sa robustesse et sa brushless construction (rotor à cage), facilité de maintenance, réduction du coût et de taille, autoprotection contre les courts-circuits et les surcharge, etc. le major inconvénients de la SEIG c'est la consommation de l'énergie réactive.

On va présenter dans cette partie le model dynamique dans les références  $\alpha, \beta$  de la SEIG sous une charge résistive en montrant avec une simulation sous Matlab/Simulink l'effet de la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la machine sur cette dernière.

#### II-5-1 Model dynamique:

Le système d'équations des tensions statorique et rotoriques s'écrit sous la forme suivante :

$$v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha} \quad (2.29)$$

$$v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\beta} \quad (2.30)$$

$$0 = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \quad (2.31)$$

$$0 = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\beta} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} \quad (2.32)$$

Les expressions des tensions des capacités sont :

$$V_{c\alpha} = \frac{1}{C} \int i_{c\alpha} dt + V_{c\alpha 0} \quad (2.33)$$

$$V_{c\beta} = \frac{1}{C} \int i_{c\beta} dt + V_{c\beta 0} \quad (2.34)$$

Les composantes des flux rotoriques peut s'écrit comme suit :

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \psi_{r\alpha 0} \quad (2.35)$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \psi_{r\beta 0} \quad (2.36)$$

Ou  $\psi_{r\alpha 0}$  et  $\psi_{r\beta 0}$  représentes les flux rotoriques rémanents.

Aussi, avec la vitesse électrique rotorique, les composants du champ tournant sont comme suit :

$$\omega_r \psi_{r\alpha} = \omega_r L_m i_{s\alpha} + \omega_r L_r i_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\alpha 0} \quad (2.37)$$

$$\omega_r \psi_{r\beta} = \omega_r L_m i_{s\beta} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\beta 0} \quad (2.38)$$

D'après les équations (2.29) et (2.38) on peut écrire le système d'équations matricielles à vide :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

D'après l'équation (2.39), les matrices d'état du système sont :

$$A = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$I_G = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad V_G = \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

D'après l'équation si dessus, le système d'équations différentielle des courants statoriques et rotorique est :

$$p i_{s\alpha} = -\frac{L_r}{L} (R_s i_{s\alpha} + V_{C\alpha}) + \frac{L_m}{L} [\omega_r (L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \psi_{r\beta 0}) + R_r i_{r\alpha}] \quad (2.42)$$

$$p i_{s\beta} = -\frac{L_r}{L} (R_s i_{s\beta} + V_{C\beta}) - \frac{L_m}{L} [\omega_r (L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \psi_{r\alpha 0}) - R_r i_{r\beta}] \quad (2.43)$$

$$p i_{r\alpha} = \frac{L_m}{L} (R_s i_{s\alpha} + V_{C\alpha}) - \frac{L_s}{L} [\omega_r (L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \psi_{r\beta 0}) + R_r i_{r\alpha}] \quad (2.44)$$

$$p i_{r\beta} = \frac{L_m}{L} (R_s i_{s\beta} + V_{C\beta}) - \frac{L_s}{L} [\omega_r (L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \psi_{r\alpha 0}) - R_r i_{r\beta}] \quad (2.45)$$

Où

$$L = L_s L_r - L_m^2$$

Les équations différentielles de la tension de charge peuvent être écrites comme suit :

$$p v_{L\alpha} = \frac{1}{C} i_{C\alpha} \quad (2.46)$$

$$p v_{L\beta} = \frac{1}{C} i_{C\beta} \quad (2.47)$$

Où

$$i_{c\alpha} = i_{s\alpha} - i_{L\alpha}, \quad i_{c\beta} = i_{s\beta} - i_{L\beta}$$

Ainsi que les équations différentielles du courant de charge :

$$p i_{L\alpha} = \frac{1}{L_L} (v_{L\alpha} - R_L i_{L\alpha}) \quad (2.48)$$

$$p i_{L\beta} = \frac{1}{L_L} (v_{L\beta} - R_L i_{L\beta}) \quad (2.49)$$

### II-5-2 L'inductance magnétisante et la capacité dans le fonctionnement de la SEIG :

Comme le stator de la SEIG est connecté à une charge isolée, l'inductance magnétisante et le courant magnétisant ne sont pas considérés constants. Car la variation de l'inductance magnétisante est le facteur principal dans la génération de la tension et la stabilisation.

La relation entre l'inductance magnétisante et le courant magnétisant est donnée par la relation [72] :

$$L_m = \frac{1}{120\pi} \left[ -0.1175 I_m^5 + 1.918 I_m^4 - 11.074 I_m^3 + 25.387 I_m^2 - 19.662 I_m + 53.365 \right] \quad (2.50)$$

$$0 < I_m \leq 6A$$

Avec, le courant magnétisant est :

$$I_m = \sqrt{(i_{s\alpha} + i_{r\alpha})^2 + (i_{s\beta} + i_{r\beta})^2} \quad (2.51)$$

L'équation du couple électromagnétique :

$$T_e = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (2.52)$$

La valeur minimum de la capacité d'auto-amorçage soit est donnée par la relation suivante :

$$C_{\min} = \frac{1}{\omega_r L_m} \quad (2.53)$$

### III- Modélisation de la turbine éolienne :

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la figure 2.7

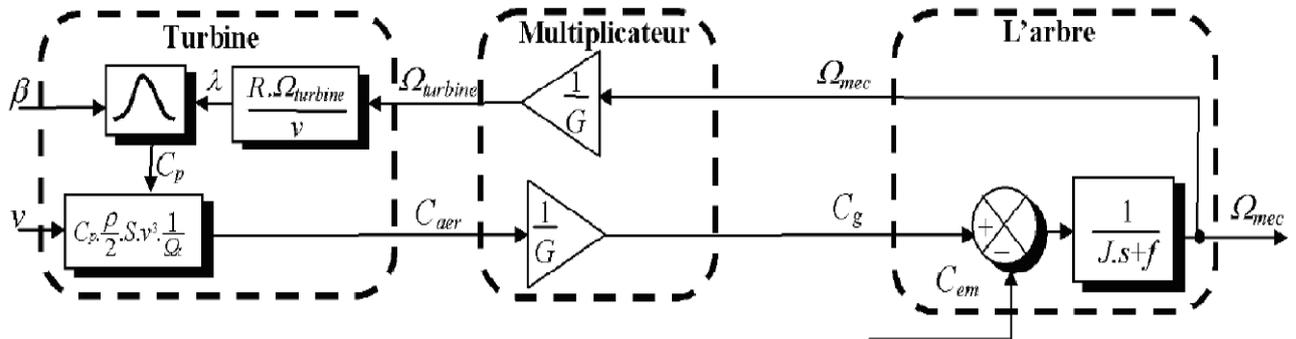


Figure 2.7 : Schéma bloc du modèle de la turbine

#### III-1 Modèle de la turbine :

Le dispositif à modéliser est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure 2.8).

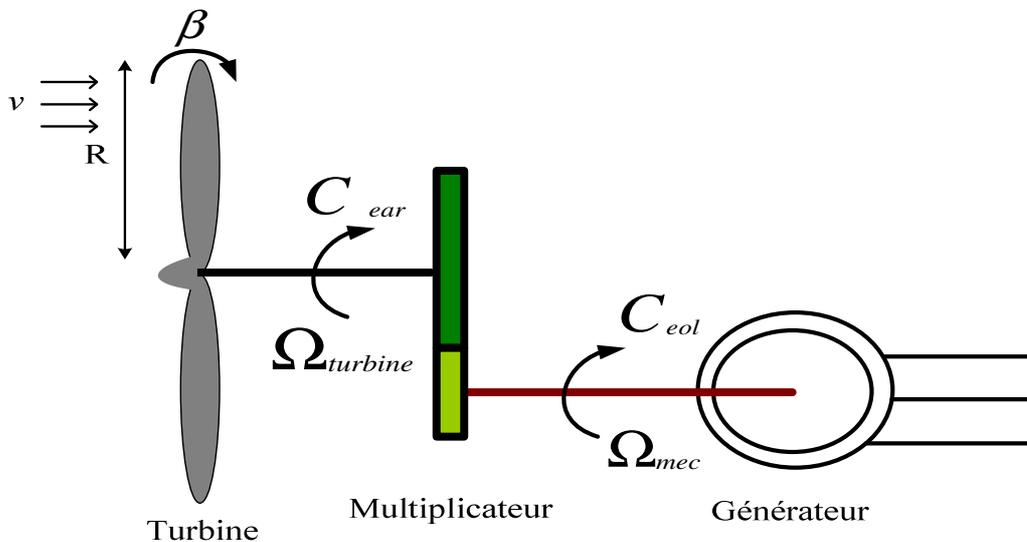


Figure 2.8 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie par l'expression suivante [16] :

$$P_v = \frac{\rho S v^3}{2} \tag{2.54}$$

Où :

- $\rho$  est la densité de l'air (approximée : 1.225 kg/ m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15°C).

- $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine.
- $v$  est la vitesse du vent.

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

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho S V^3}{2} \quad (2.55)$$

- $C_p$  est coefficient de puissance ou le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [16] [59].
- $\beta$  est l'angle de calage des pales en degrés.
- $\lambda$ , Le ratio de vitesse, est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (2.56)$$

Où  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

La relation (2.55) permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent figure 2.9

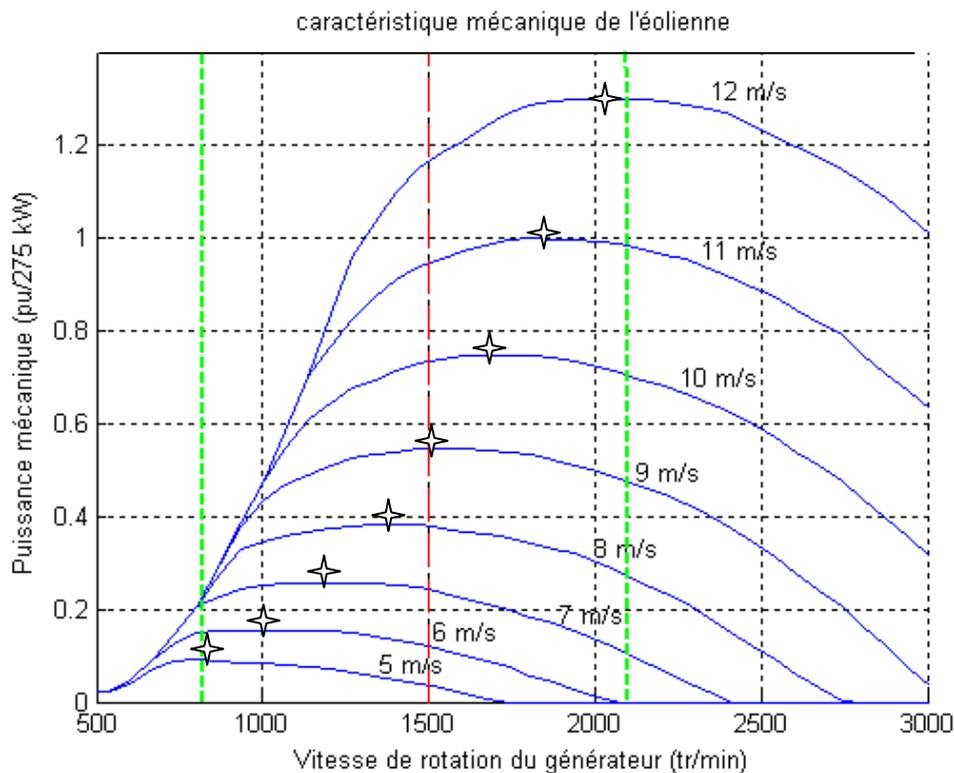


Figure 2.9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne, et par conséquent la génératrice, fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la figure 2.9) les maxima théoriques (✧) des courbes de puissance ne sont pas exploités.

Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 850 et 2100 tr/min pour cet exemple. Et c'est ici où apparaît l'intérêt de fonctionnement à vitesse variable.

Le coefficient  $C_p$  est sans unité. Il diffère selon les éoliennes. Son expression a été approchée de manière empirique pour l'éolienne intégrant une MADA [22] :

$$C_p = (0.5 - 0.167).(\beta - 2). \sin \left[ \frac{\pi.(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3.(\beta - 2)} \right] - 0.00184.(\lambda - 3).(\beta - 2) \quad (2.57)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho s v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.58)$$

### III-2 Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 2.8). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.59)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.60)$$

### III-3 Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie

$J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.61)$$

$G$  : Gain du multiplicateur de vitesse

$J$  : Inertie de l'arbre ( $kg \cdot m^2$ )

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2 MW, une pale a

une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [21]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.62)$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux

$C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.63)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.64)$$

#### IV- Description du système étudié :

Le système a été simulé sous MATLAB SIMULINK, on utilisant Simpower system toolbox. Ce la a pour bute d'étudier la génératrice asynchrone auto excitée dans le cas d'un fonctionnement autonome et l'effet de la variation de capacité et de vitesse du vent sur ce dernier. Les paramètres de machine sont donnés dans annexe C.

Le système est composé d'un générateur d'induction à rotor à cage commandé par une turbine à vent, une charge connectée au circuit statorique et un banc de capacités pour magnétiser la machine.

Le banc de condensateur est connecté en triangle, est reliée sur les bornes du générateur.

La valeur de ce banc de condensateur peut être changée pour étudier son effet sur le courant de charge, la tension de charge et les grandeurs statoriques. La vitesse de vent est maintenue constante et prise égale à 6 m/s.

Le bloc de turbine à vent est modélisé de tel façon il utilise les caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (figure 2.9).

#### V- Simulation et interprétation des résultats :

La simulation de la génératrice asynchrone auto-excitée dont les paramètres sont donnés dans l'annexe C permet l'obtention des différentes grandeurs régissant son fonctionnement, D'où les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation.

Dans nos simulations on a prise en compte de l'aimantation rémanente dans le rotor de la machine, en effet celle-ci est prise en compte par une faible valeur initiale.

### V-1 influence de la variation des capacités :

Le premier essai consiste à maintenir la résistance constante ( $R=20\Omega$ ) et faire varier la capacité d'excitation, trois valeurs différentes de capacités sont choisies (45 kvar, 50 kvar, 55 kvar), ayant pour but d'étudier l'influence de la variation des capacités sur tension, sur la fréquence et sur le délai d'amorçage. Aussi, on considère la vitesse de rotation fixe et prise égale à  $\omega_r = 157$  rd/s, la vitesse du vent est maintenue constante et prise égale à 6 m/s. gratin

Pour  $Q_c=55$  kvar on a obtenu les résultats suivants :

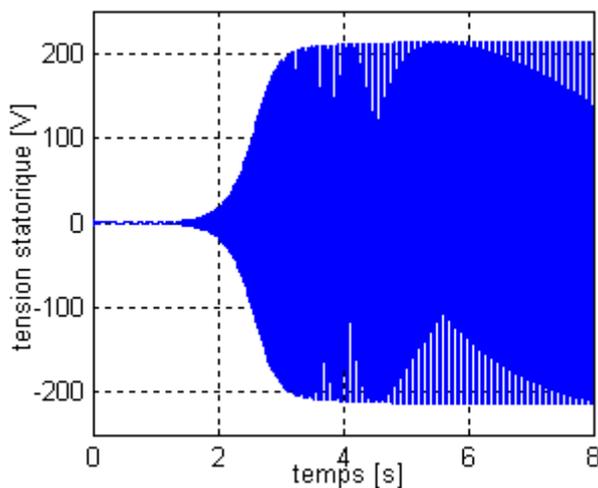


Figure 2.10 : tension statorique

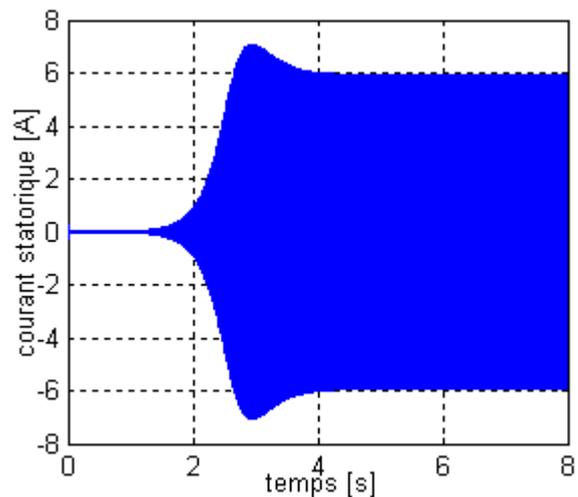


Figure 2.11 : courant statorique

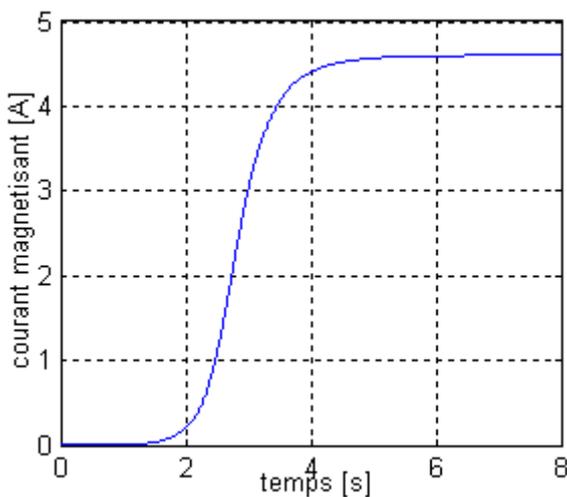


Figure 2.12 : courant magnétisant

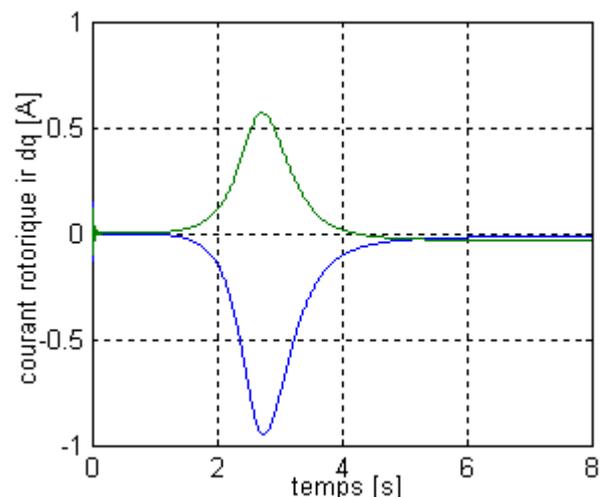


Figure 2.13 : courant rotorique

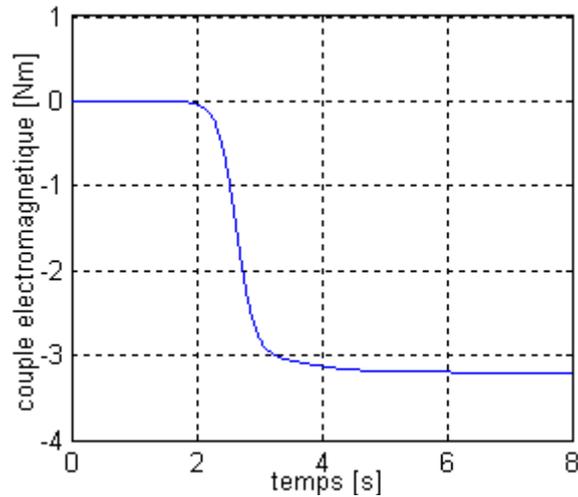


Figure 2.14 : couple électromagnétique

**Interprétations :**

Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures ci-dessus. Nous remarquons que la tension et le courant suivent la même allure et suivent la forme de l'évolution du courant de magnétisation, ils croissent d'une façon exponentielle jusqu'à ils se stabilisent respectivement en régimes totalement établis à  $t=4.5s$ . Le couple électromagnétique transite d'un état stable à un autre état stable défini par la charge.

Le tableau 2-1 résume les valeurs de la tension, le délai d'autoamorçage et de la fréquence pour les différentes valeurs des capacités on maintiendrons la charge constante,  $R=20\Omega$ .

Qc kvar	45	50	55
Tension à vide (pu)	214.2	218	227.7
Tension générée en charge (pu)	163.6	172.4	211
Fréquence de la tension en charge (Hz)	42.72	43.86	44.18
Variation de tension $\frac{V_{vide} - V_{charge}}{V_{vide}}$	23.62%	20.91%	7.33%
Variation de fréquence $\frac{F_{vide} - F_{charge}}{F_{vide}}$	9.49%	7.07%	6.39%
Délais d'amorçage (s)	4.82	4.43	4.1

Tableau 2-1 : effet de la variation des capas sur la MAS auto excité

On constate que l'augmentation et la diminution de la valeur de la capacité influe sur la tension, le délai d'autoamorçage et sur la fréquence, par conséquent l'augmentation des capa résulte une augmentation de la tension et de la fréquence de la génératrice notamment, et une diminution du délai d'amorçage

D'après [19] il est possible de compenser la chute de tension en connectant d'autres capacités en série avec la charge, mais les augmentations du courant de stator devraient être contrôlées pour ne pas excéder le courant nominal du stator.

### V-2 Influence de la variation de la charge :

L'application suivante consiste à faire varier la charge tout en maintenant la capacité constante, avec une vitesse de vent de 6 m/s. Cela ayant pour but d'étudier l'effet de la charge sur le phénomène d'autoexcitation. Pour cela une charge de  $20 \Omega$  est appliquée à  $t=5.5s$ , on a obtenu les résultats suivants :

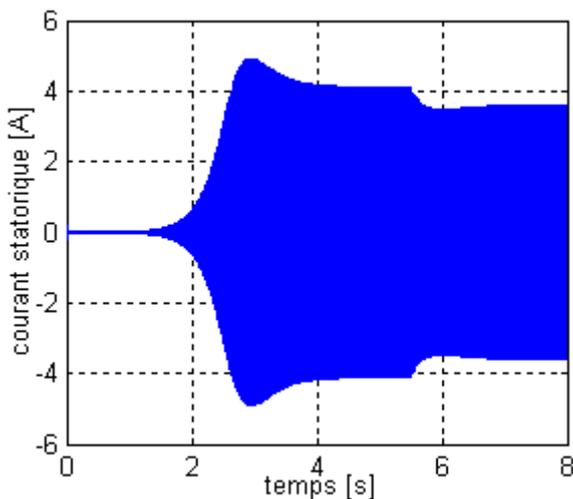


Figure 2.15 : courant statorique

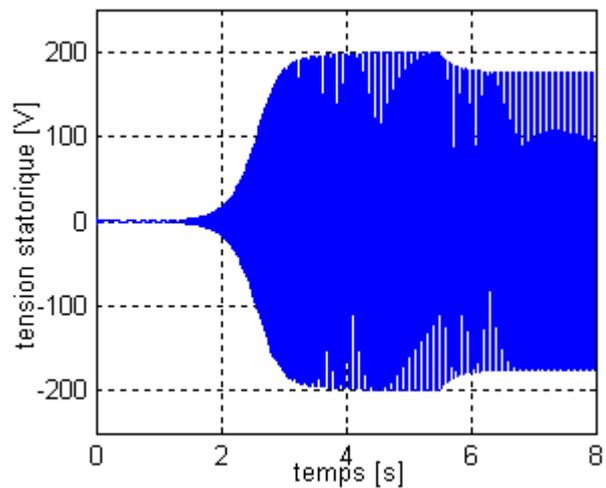


Figure 2.16 : tension statorique

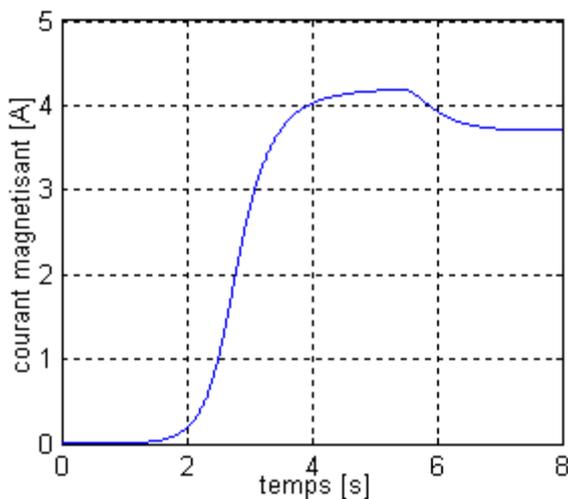


Figure 2.17 : courant magnétisant

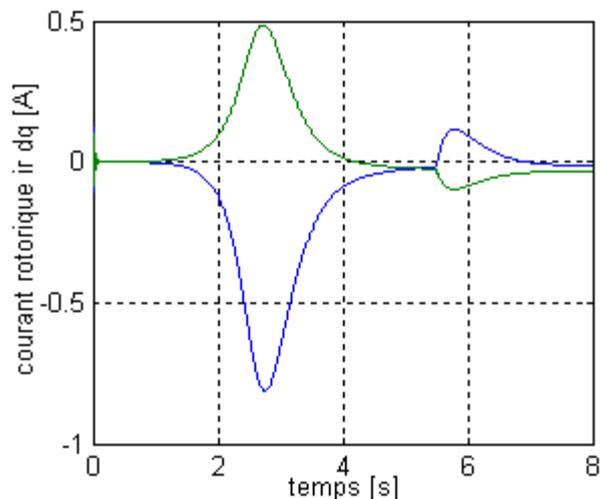


Figure 2.18 : courant rotorique

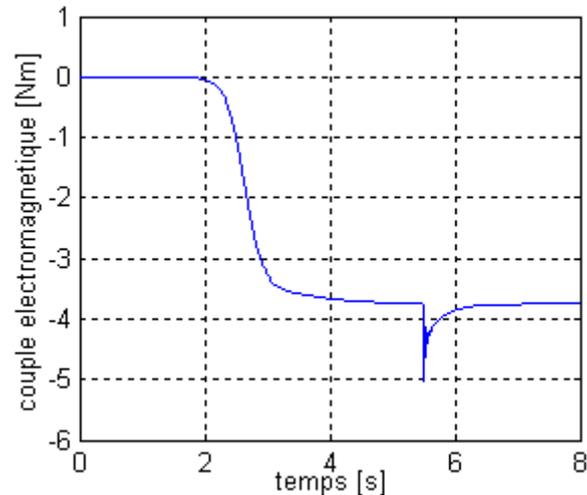


Figure 2.19 : couple électromagnétique

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Résistance ( $\Omega$ )	20	50	100
Tension à vide (pu)	200.1	200.1	200.1
Tension générée en charge (pu)	176.1	183.8	191.2
Fréquence de la tension en charge (Hz)	44.18	45.13	45.87
Variation de tension $\frac{V_{vide} - V_{charge}}{V_{vide}}$	11.99%	8.14%	4.44%
Variation de fréquence $\frac{F_{vide} - F_{charge}}{F_{vide}}$	6.39%	4.3%	2.8%
Délais d'amorçage (s)	4.1	4.9	5.11

Tableau 2-2 : effet de la variation de la charge sur la MAS auto excité

On constate une diminution de la tension et de la fréquence de la génératrice à l'instant d'introduction de la charge résistive.

Les résultats donnés dans le tableau sont obtenus lorsqu'on fait varier la charge en gardant la capacité constante avec une vitesse de vent de 6 m/s. Ces résultats montrent bien l'influence de la charge sur la tension, par contre pas de grand effet sur le délai d'amorçage et sur la

fréquence. De ce fait l'augmentation de la charge avec une vitesse fixe, cause une variation de la tension et un écart de fréquence, Donc il est indispensable de régler la tension et la fréquence sur les bornes de la génératrice afin de fournir une énergie électrique de bonne qualité aux charges connectées.

### V-3 Influence de la variation de vitesse de vent :

Dans cette partie, on va montrer l'effet de la variation de la vitesse du vent sur la tension d'amorçage, le courant magnétisant et celui de la charge et sur le couple électromagnétique.

I)

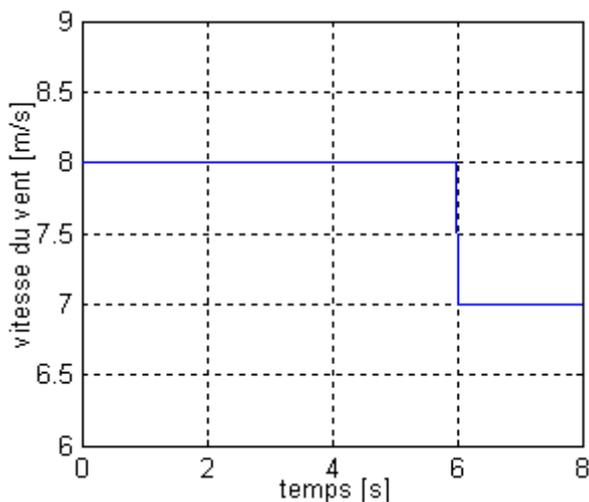


Figure 2.20 : vitesse du vent

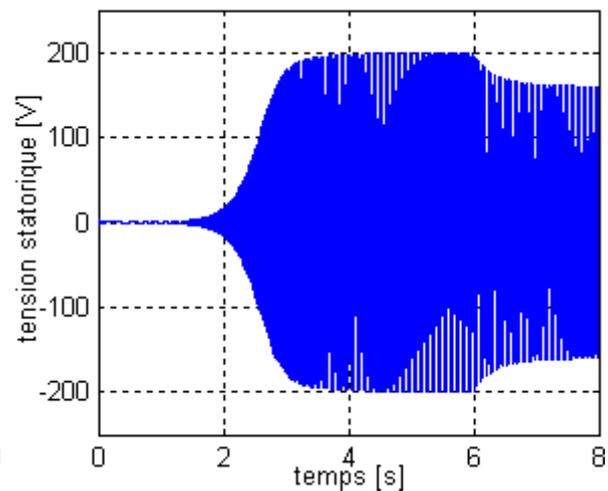


Figure 2.21 : tension statorique

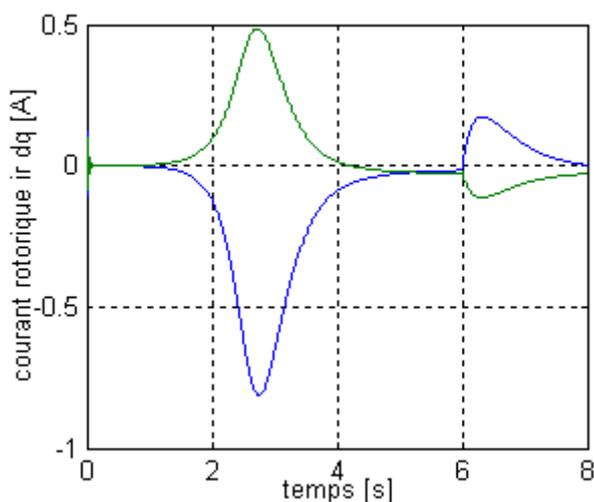


Figure 2.22 : courant rotorique

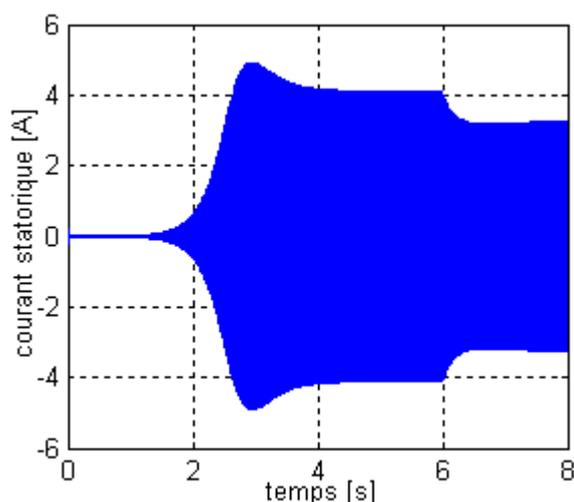


Figure 2.23 : courant statorique

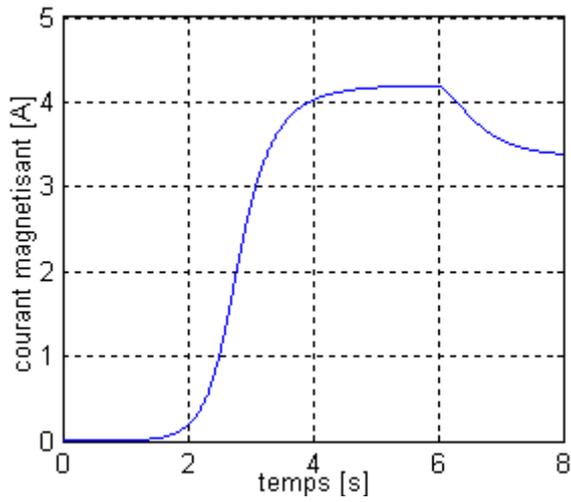


Figure 2.24 : courant magnétisant

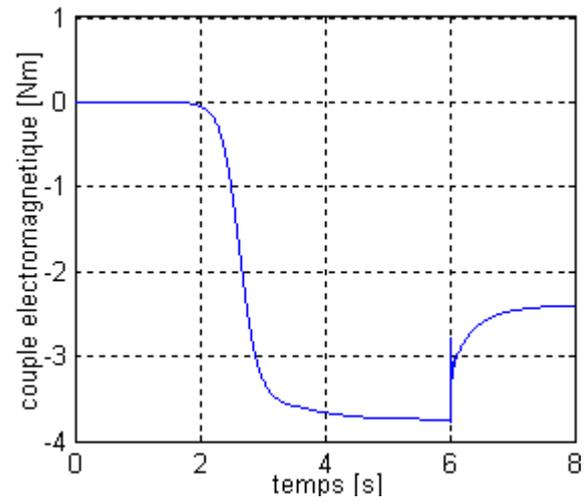


Figure 2.25 : couple électromagnétique

II)

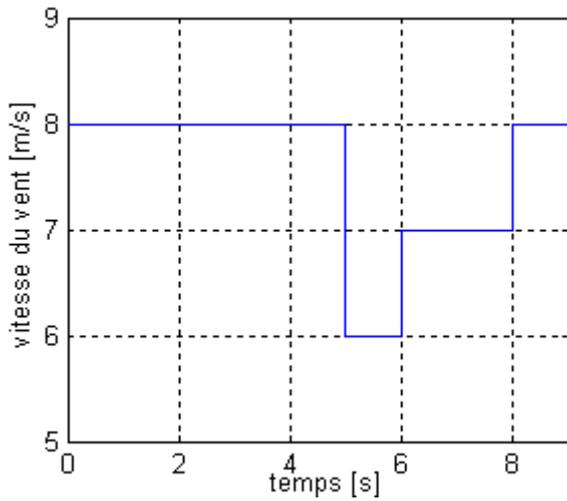


Figure 2.26 : vitesse du vent

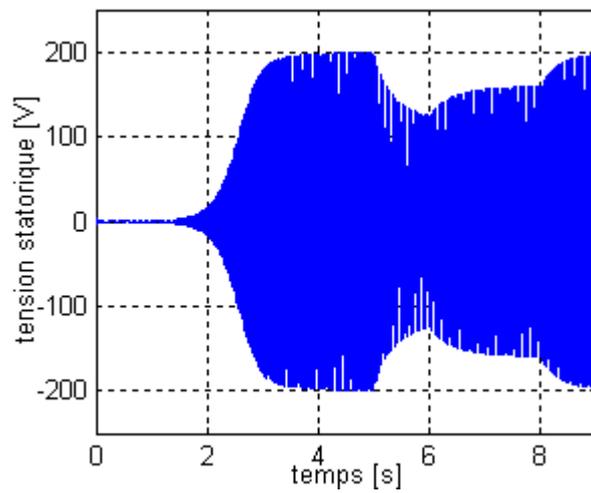


Figure 2.27 : tension statorique

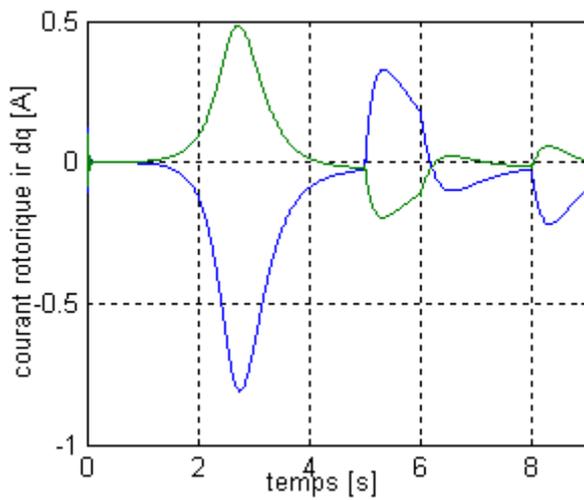


Figure 2.28 : courant rotorique

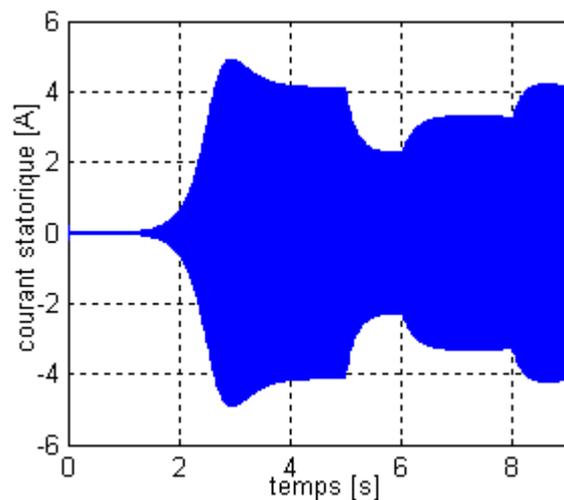


Figure 2.29 : Courant statorique

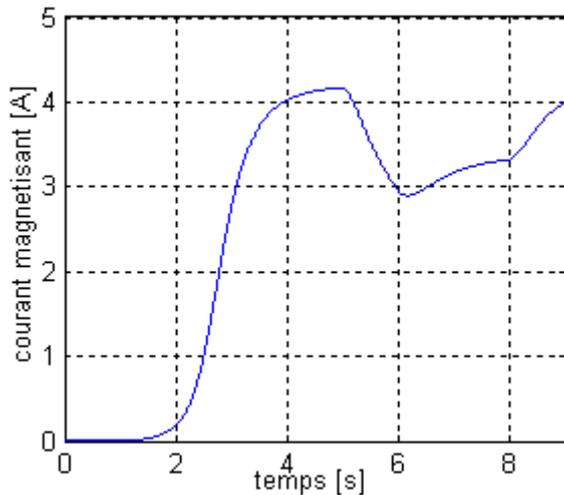


Figure 2.30 : courant magnétisant

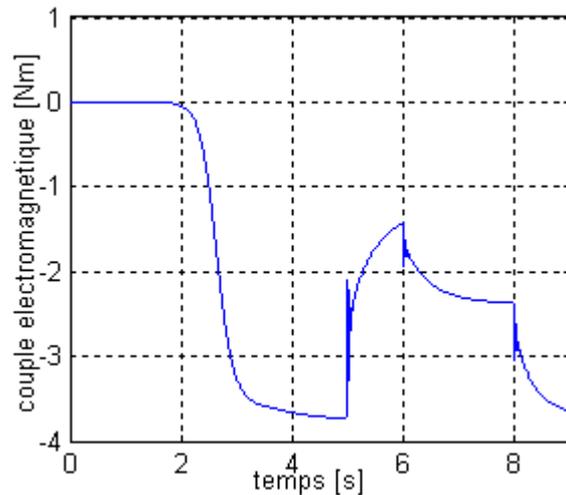


Figure 2.31 : couple électromagnétique

### Interprétation :

En premier lieu, où la vitesse du vent est changé de 7m/s à 6m/s, on constate une diminution de l'amplitude de la tension et du courant magnétisant. Pour le couple électromagnétique l'effet de cette variation est apparait par une augmentation de l'amplitude.

L'augmentation de la vitesse du vent se traduit par l'augmentation de la tension et du courant et par la diminution du couple électromagnétique. Dans ce cas de fonctionnement, la vitesse de rotation de la machine doit être fixée afin de maintenir une fréquence des grandeurs statoriques proches de 50 Hz et c'est ici où il apparait l'importance du dispositif d'orientation des pales de l'éolienne.

### V-4 simulation de l'influence de la déconnexion brusque d'une capacité :

Dans cet essai on va voir l'effet de la déconnexion d'une capacité, pour cela on a effectué cette simulation avec une vitesse du vent de 7m/s,  $R=20$  ohms,  $Q_c=55$ kvar.

À  $t=6$  s, une des capacités est brusquement déconnectée, on a obtenu ces résultats :

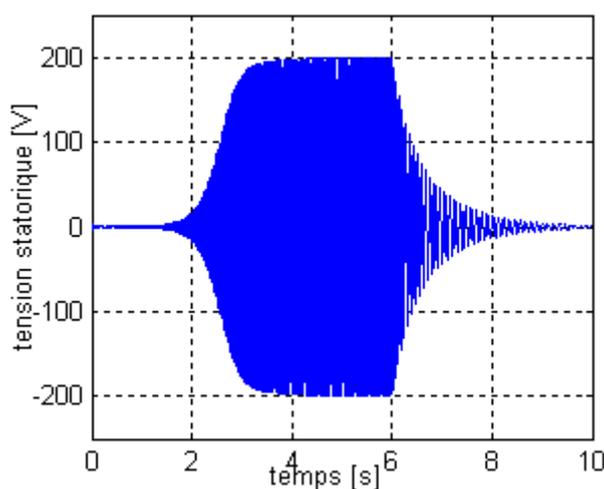


Figure 2.32 : tension statorique

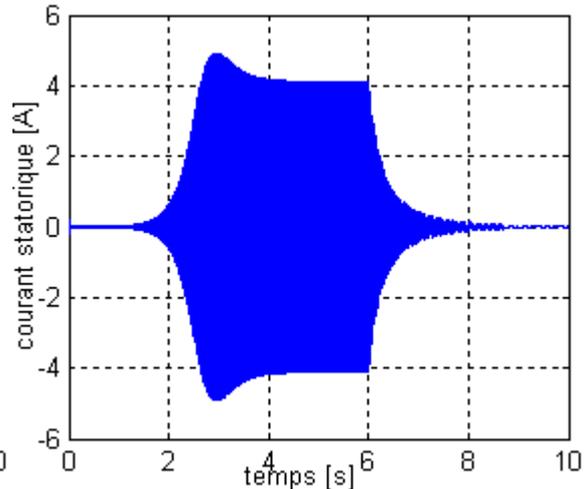


Figure 2.33 : courant statorique

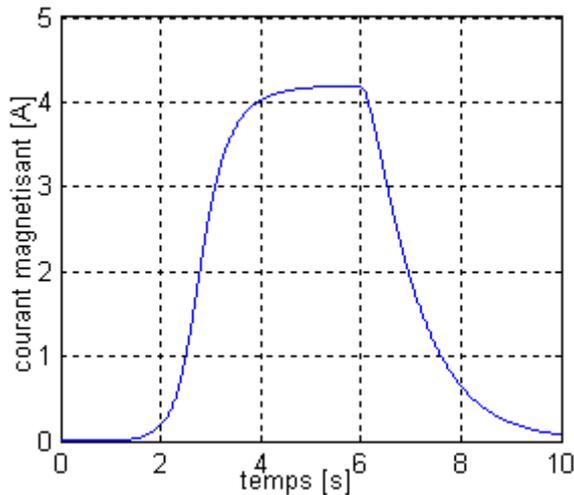


Figure 2.34 : courrant magnétisant

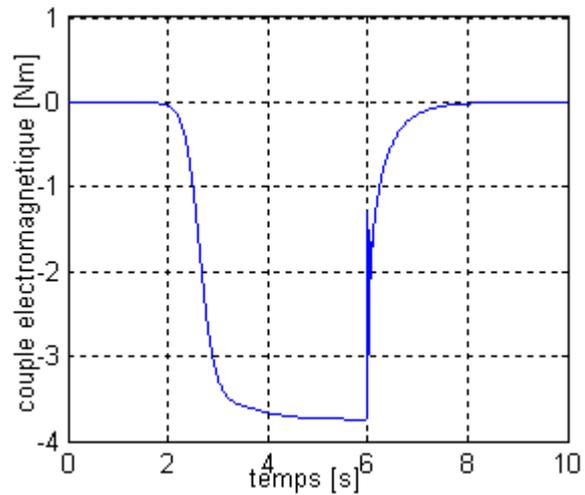


Figure 2.35 : couple électromagnétique

### Interprétation :

D'après les résultats obtenus on constate que lorsque l'une des trois capacités est déconnectée, la tension s'écroule alors en 4s, la même chose observée pour le courant magnétisant, ce qui provoque une démagnétisation de la machine. Mais il est à noter que si la valeur de deux capacités restantes est suffisante, ceci permet de garder le fonctionnement de l'autoexcitation, c'est la raison pour laquelle certains constructeurs utilisent des capacités de fortes valeurs.

### V-I Conclusion :

Ce chapitre a traité la génératrice asynchrone auto excitée dans le cas d'un fonctionnement autonome, la modélisation et la simulation de cette machine ont été présentées ainsi que le modèle de la turbine utilisé. Ceci ayant pour but d'étudier la faisabilité de cette machine et l'intérêt qu'elle apporterait pour une association avec une chaîne de production d'énergie éolien. Cependant, nous avons vu que cette génératrice est capable d'alimenter des charges isolées, d'autre part, les résultats obtenus ont montré que l'emploi d'une telle génératrice présente certaines limites qu'on doit prendre en considération :

- Les variations de la tension et de la fréquence lors des impacts de charge, car ce système est destiné à alimenter un consommateur isolé.
- Les variations des capacités d'excitation qui influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées, notamment, la déconnection d'une des capacités qui présente un risque de démagnétisation de la machine.
- Aussi, l'influence de la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne sur la fréquence qui est dû à la variation de la vitesse du vent. Pour cela un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrées fixes.

En résumé, la tension et la fréquence de la génératrice auto-excitée sont directement influencées par la vitesse du rotor, les capacités d'excitation, et les charges aux bornes. Donc, en termes d'amélioration de performances des aérogénérateurs connectés aux réseaux, il sera plus adéquat d'utiliser la machine asynchrone à double alimentation dont les enroulements statoriques sont reliés au réseau, tandis que les enroulements rotoriques sont connectés à un convertisseur permettant de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau par une commande découplée des puissances active et réactive. Ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 3

# Étude, modélisation et Stratégie de commande de la MADA

### **I-INTRODUCTION :**

L'énergie du vent est utilisée depuis plus d'un siècle, la première production d'énergie électrique en utilisant l'énergie du vent est faite en 1887 par Charles Brush à Cleveland.

La machine asynchrone doublement alimentée devient plus en plus commune dans la production d'énergie éolienne. Aujourd'hui plus de 70% de la construction des turbines à vent sont équipées avec ce type de machine.

La MADA (Machine Asynchrone Doublement Alimentée) est connue depuis 1899, est une machine à induction triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse, elle a été employée pour des puissances assez grandes (tel que les pompes dans le traitement des eaux usées, pour l'alimentation en eau potable) dans les entraînements à vitesse variable. Ce qui permet de réaliser une meilleure maîtrise des transferts des puissances avec des rendements nettement améliorés. Mais l'ont fait abandonner pour un temps à cause des problèmes d'instabilités rencontrés.

Grâce aux développements technologiques modernes, l'utilisation de la MADA semble devenir une solution plus indiquée pour les applications où le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse (pompes et ventilateurs). L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou d'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.

## II- Description du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

### II-1 Description sommaire de la MADA :

La machine asynchrone doublement alimentée (de l'anglais, doubly fed induction machine), est une machine à induction triphasée, a une double accessibilité au stator et au rotor [7]. Son stator est identique à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements, son rotor est composé d'enroulement triphasé disposé de la même manière que les enroulements statoriques, Les trois phases du rotor sont montées en étoile Figure (3.1), et les extrémités sont conduites vers la boîte à bornes moyennant des bagues collectrices et des balais pour être ainsi accessibles de l'extérieur [57] [64], Cette disposition rend possible l'alimentation séparée du stator comme de l'enroulement du rotor (double bobinage). Les bagues sont isolées l'une de l'autre de l'arbre. A l'aide des balais immobiles qui frotte sur les bagues on peut introduire dans le circuit rotorique un rhéostat de démarrage ou de réglage de vitesse. Le moteur peut être doté d'un volant permettant de court-circuiter les bagues et de relever les balais après le démarrage, pour éviter les frottements inutiles des balais sur les bagues.

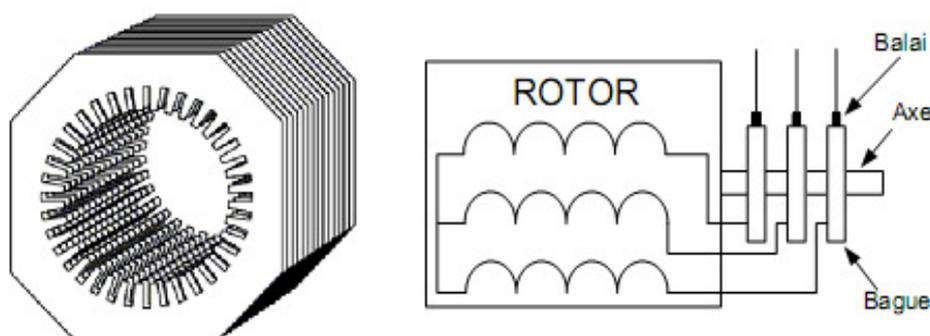


Figure 3.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [23]

La MADA se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique, pour alimenter cette machine et pour varier sa vitesse, deux structures ont émergées : la première consiste à coupler le stator directement au réseau et d'alimenter le rotor à travers des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant (Figure 3.2) (ce convertisseur permet ainsi de renvoyer l'énergie dissipé par effet joule sur le réseau, Le rendement de la machine est ainsi amélioré)[23]; dans la seconde, les deux armatures sont couplées au convertisseur de puissance. C'est la double alimentation de la machine, structure présentant une bonne flexibilité et un nombre suffisant de paramètres de réglage [26].

La puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon la phase de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution. La machine est également capable de fonctionner sur réseau isolé.

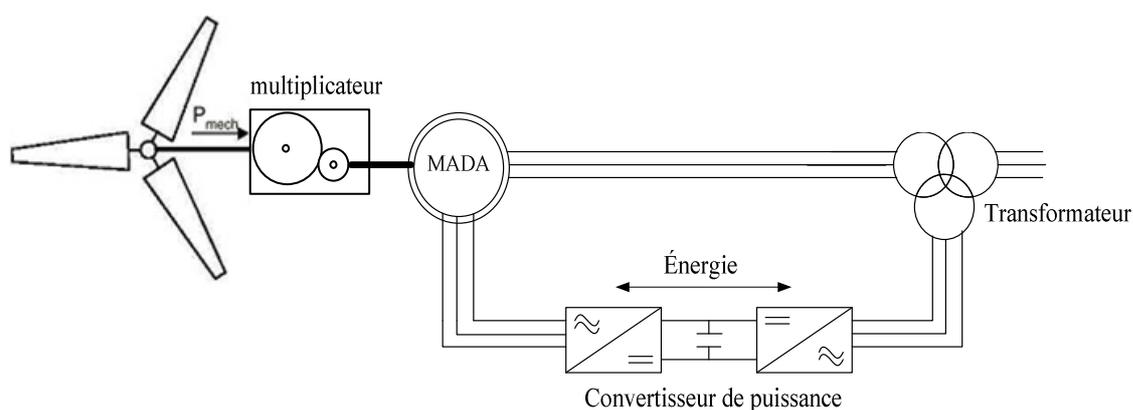


Figure 3.2: Cascade hyposynchrone

La figure 3.3 représente les différents enroulements et les flux présents à l'intérieur des structures d'une machine synchrone et d'une MADA [29], car la structure de la machine à double alimentation permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence que le rotor est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Où  $\Psi$  représente Le vecteur flux présent dans l'entrefer de la machine, c'est la résultante du flux  $\Psi_s$  créé par les bobinages statoriques et du flux rotorique  $\Psi_r$  créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés.

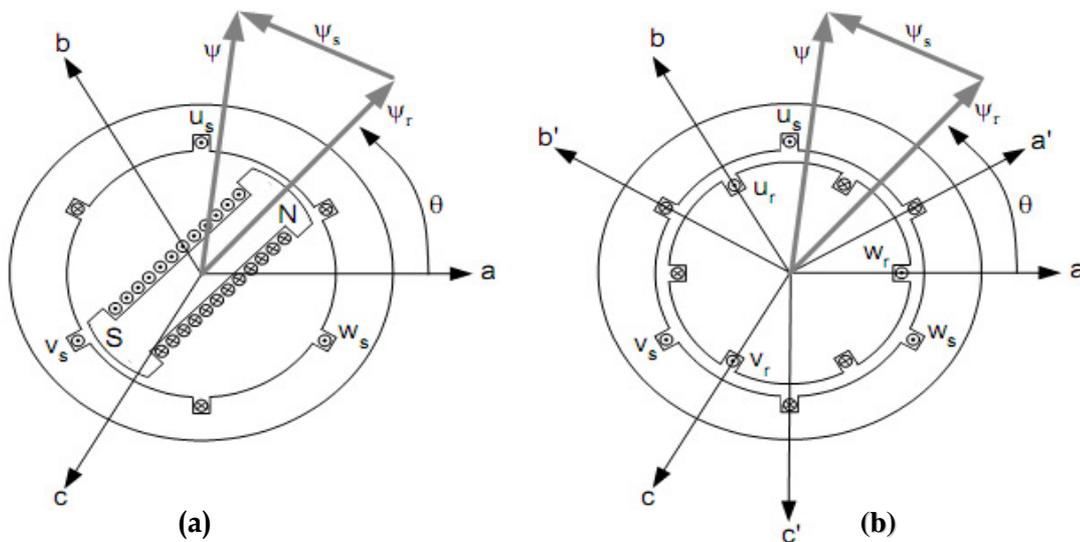


Figure 3.3 : Configuration des enroulements et des flux dans une machine synchrone (a) et dans une MADA (b).

La différence principale entre ces deux machines est due à l'établissement du flux rotorique. En effet, dans le cas d'une machine synchrone classique, la phase du flux rotorique dépend de la position mécanique de la roue polaire. Son évolution est donc dépendante de la machine elle-même et de la charge qui lui est accouplée et dépendra donc de la constante de temps mécanique globale du système. En l'absence d'autopilotage, les performances sont par conséquent limitées et des instabilités de fonctionnement peuvent apparaître. Par contre dans le cas d'une MADA où la roue polaire est remplacé par un circuit triphasé alimenté en alternatif, l'amplitude et la phase du vecteur  $\Psi_r$  sont totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Aussi, la dynamique du flux devient indépendante du système mécanique et dépend uniquement de la constante de temps électrique du système. [23]

## II-2 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation est basé sur l'interaction du champ magnétique tournant (créé par le courant statorique triphasé) et des courants induits dans l'enroulement rotorique par ce champ tournant.

En effet, lorsqu'on alimente le bobinage statorique par un courant alternatif sinusoïdal, crée un champ statorique sinusoïdal qui tourne à la vitesse de synchronisme [23]. Le bobinage rotorique est balayé par ce champ qui va induire des courants dans ce bobinage. Ces courants vont à leur tour créer un champ rotorique.

Le champ résultant des deux champs, statorique et rotorique par superposition, à une vitesse supérieure à celle du rotor et tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_g$  telle que [23] :

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1-g) = \omega_s g ;$$

C'est-à-dire proportionnellement au glissement  $g$ .

La MADA est une machine réversible, elle fonctionne en générateur comme elle fonctionne en moteur ; mais ce qui nous intéresse est le fonctionnement en générateur :

Lors des rafales de vent le couple mécanique produit par la turbine tend à accélérer la vitesse de la MADA, et pour adapter sa vitesse à celle du rotor de l'éolienne il est nécessaire d'ajouter un multiplicateur de vitesse, de ce fait, la vitesse de rotation augmente de façon que  $\omega_r > \omega_s$ , donc le glissement devient négatif et le sens de rotation du champ tournant par rapport au rotor change de signe (par rapport au régime moteur) ainsi que la f.é.m. rotorique, le courant rotorique et le couple. Le couple devient donc résistant par rapport au couple moteur primaire.

### II-3 FONCTIONNEMENT A QUATRE QUADRANTS DE LA MADA :

La MADA est parfaitement contrôlable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor grâce au convertisseur de puissance bidirectionnelle reliée aux enroulements rotoriques [64], comme illustré dans la Figure (3.4).

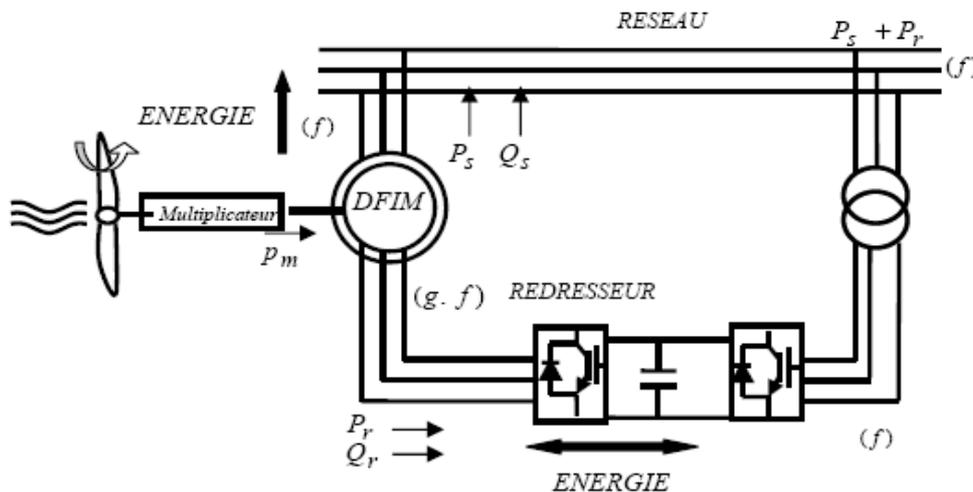


Figure 3.4 : Le contrôle de l'écoulement de puissances statorique à travers le circuit rotorique

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur aux vitesses hypo synchrones et hyper synchrones, 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 [2].

Il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure (3.5). Dans cette dernière,  $P_s$ ,  $P_r$  et  $P_m$  désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique. D'une autre façon la puissance délivrée au réseau (ou fournie par le réseau) [20],

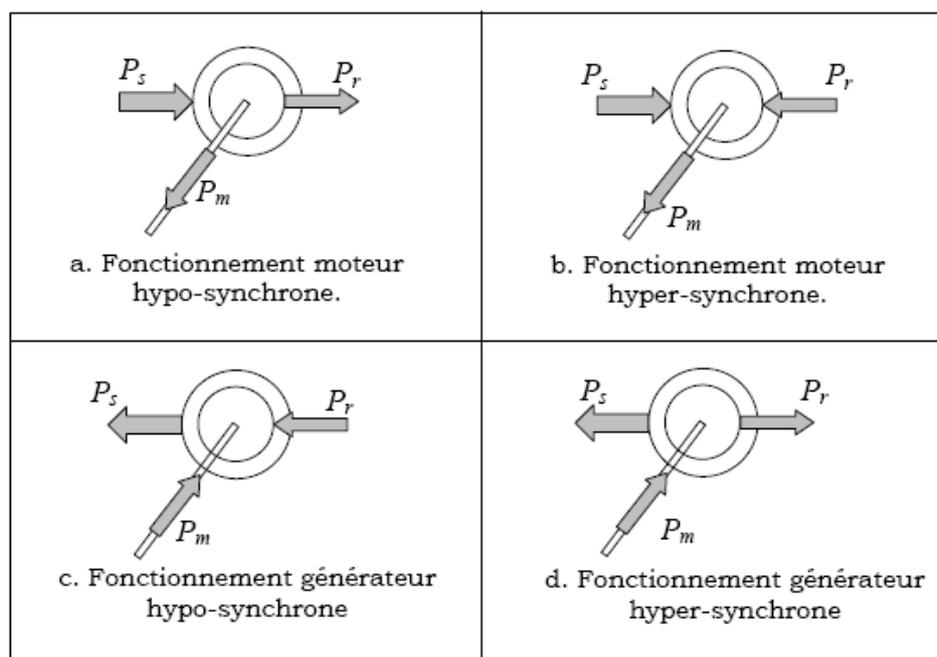


Figure 3.5 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA

### II-3-1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

Quand la MADA fonctionne en moteur hypo synchrone, voir figure (3.5.a), La puissance  $P_s$  fournie par le réseau au stator, la puissance  $P_r$  « puissance de glissement » est fournie par le rotor sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor, c'est la cascade hyposynchrone [34]. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération d'énergie de glissement.

### II-3-2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

Si la vitesse de la machine varier au delà de la vitesse de synchronisme, c'est le fonctionnement en hypersynchrone, voir figure (3.5.b). Dans ce cas la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique et la puissance  $P_s$  est également fournie par le réseau au stator. La machine asynchrone a cage ne peut pas avoir se fonctionnement [2].

### II-3-3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone :

Quand la MADA est entraînée en hyposynchronisme, voir figure (3.5.c), la puissance  $P_s$  est fournie au réseau par le stator, la puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [64] [23]

### II-3-4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone :

Si la vitesse augmente de sorte que le générateur fonctionne en hyper synchronisme, voir figure (3.5.d), la puissance de glissement change de direction et le rotor fournit de la puissance pour une éventuelle récupération. On a ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte joule dans le rotor. [2] [23].

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages : la production de puissance électrique quelle que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

## III- Domaines d'application

La machine asynchrone à double alimentation occupe aujourd'hui une large place dans les applications industrielles, du fait de ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [8].

Une telle caractéristique, donnée sur la figure (3.6), fait apparaître plusieurs zones de fonctionnement :

- ❖ dans la première zone, la vitesse évolue alors que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est constant et égal au couple nominal de la machine. Nous maintenons ceci jusqu'à une vitesse que nous qualifierons, vitesse de base  $\Omega_b$ ,
- ❖ dans la deuxième zone, nous agissons, en affaiblissant inversement proportionnellement à la vitesse, l'état magnétique de la machine. Le couple diminue lui aussi, alors que la tension maximale est atteinte sur chacun des côtes de la machine et que la puissance active  $P_s$  reste minimale et constante sur chaque cote  $P_s = P_{sn}$ .

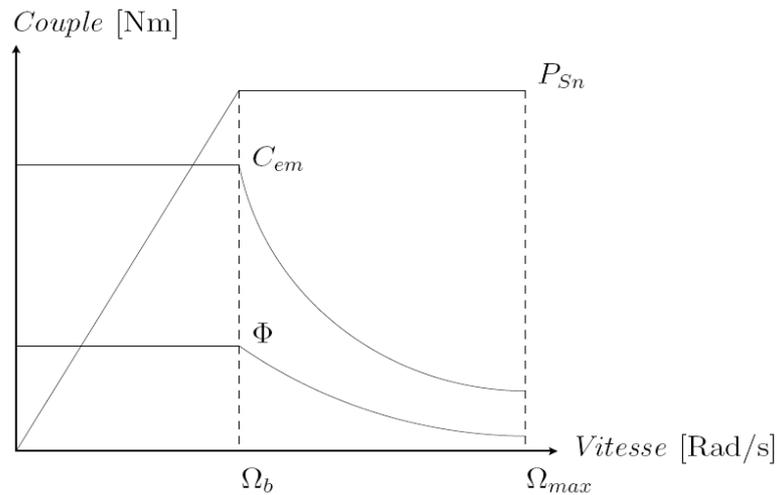


Figure 3.6 : Caractéristique de fonctionnement de la machine "Couple - Vitesse"

Une telle courbe de fonctionnement nous autorise donc à penser que cette machine sera très performante dans des applications nécessitant un fort couple de démarrage [57] :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge etc.

De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que [23] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

-Une autre application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator (Figure 3.7) [23].

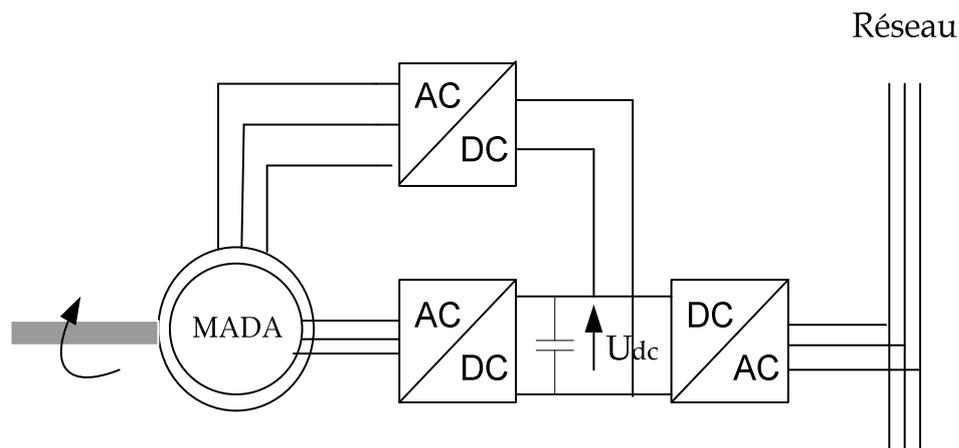


Figure 3.7 : MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante.

#### IV- Avantages et inconvénients de la MADA

Lors du fonctionnement à vitesse variable de la machine asynchrone à double alimentation présente quelques avantages et inconvénients que nous citons brièvement :

##### IV-1 Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons:

1/La machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone à cage, à savoir : [23] [57]

\*La possibilité de fonctionner à vitesse variable, donc sur une large plage de vitesse de vent. De ce fait, extraire le maximum de puissance possible.

\*Régulation séparée des puissances actives et réactive.

2/ le circuit du rotor de la MADA peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ainsi au niveau du rotor, un convertisseur de haute commutation pourra être employé afin de réaliser de hautes performances dynamiques en terme de temps de réponse, de minimisation d'harmoniques et d'amélioration des rendements. [57]

3/ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique. [26]

4/ La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du

rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement. [27]

5/ La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge. [26]

6/ La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances [60].

7/ La double alimentation de la machine offre plusieurs degrés de libertés notamment au niveau des pulsations du stator et du rotor. Il est donc possible en choisissant de manière adéquate ces deux pulsations d'imposer une répartition de puissances actives entre le stator et le rotor. [64][65]

8/ La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale [26].

#### **IV-2 Inconvénients de la MADA**

1/ Machine plus volumineuse que celle à cage de puissance équivalente, généralement elle est plus longue à causes des balais. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [65] [57].

2/ Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [26].

3/ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA [26].

4/ Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais [1]

#### **V- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation**

Dans cette partie, nous présenterons le modèle mathématique triphasé de la machine Asynchrone a double alimentation et de sa transformation dans le système biphasé dans le repère d Park. Une représentation sous forme d'état est élaborée à partir des lois physiques qui régissent son fonctionnement en alimentant notre machine en tension.

Le modèle de la MADA est identique à celui de la machine à cage, La seule différence réside dans le fait que les enroulements rotoriques ne sont plus en court-circuit et sont accessibles de l'extérieur via des collecteurs, par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle ne sont plus nulles. Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine

asynchrone dans le référentiel d - q lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA.

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont [61] [36] [23]:

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- La fmm créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La symétrie de construction est parfaite ;

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [58]:

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

#### V-1 Modèle dynamique de la machine asynchrone :

La MADA est munie de six enroulements, trois au stator et trois au rotor. Les enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La figure (3.8) représente un schématique de La MADA :

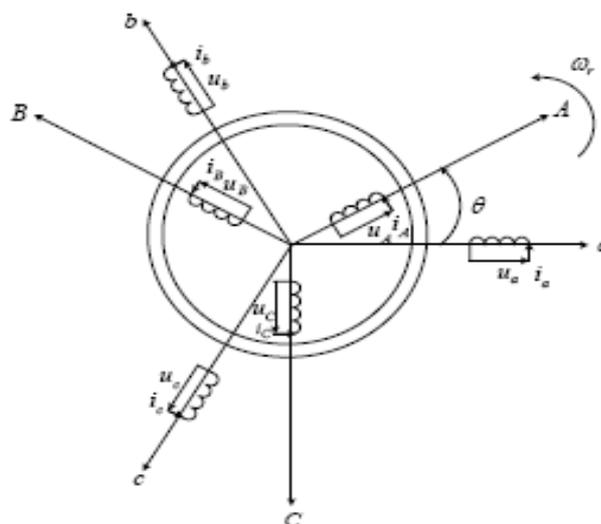


Figure 3.8 : structure de la MADA

En appliquant la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine, et en tenant compte des hypothèses simplificatrices on peut écrire :

Pour l'enroulement statoriques :

$$[V_{abc}] = R_s [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad (3.1)$$

Pour l'enroulement rotoriques :

$$[V_{ABC}] = R_r [I_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}] \quad (3.2)$$

Où  $[I_{ABC}]$  et  $[I_{abc}]$  représentent respectivement les matrices des courants statoriques et rotoriques.

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [\psi_{abc}] = [L_s] \cdot [I_{abc}] + [L_{sr}] \cdot [I_{ABC}] \\ [\psi_{ABC}] = [L_r] \cdot [I_{ABC}] + [L_{rs}] \cdot [I_{abc}] \end{cases} \quad (3.3)$$

Où,  $[L_r]$ ,  $[L_s]$  et  $[L_{rs}]$  sont les matrices d'inductances rotoriques, statoriques et mutuelles respectivement, sont donnée par :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} \quad [L_r] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix}$$

$$[L_{sr}] = \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \text{Et} \quad [L_{sr}] = [L_{rs}]^t$$

En remplaçant les équations (II.4) dans (II.2) et (II.3), nous obtenons les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = R_s [I_{abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [I_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L_{sr}] [I_{ABC}]) \\ [V_{ABC}] = R_r [I_{ABC}] + [L_r] \frac{d}{dt} [I_{ABC}] + \frac{d}{dt} ([L_{sr}] [I_{abc}]) \end{cases} \quad (3.4)$$

L'équation du couple est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta} [L_{sr}] [I_r] \right\} \quad (3.5)$$

### V-2 Application de la transformation de Park :

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice, en projetant les grandeurs selon les axes fixes du stator, sur des axes tournant du rotor.

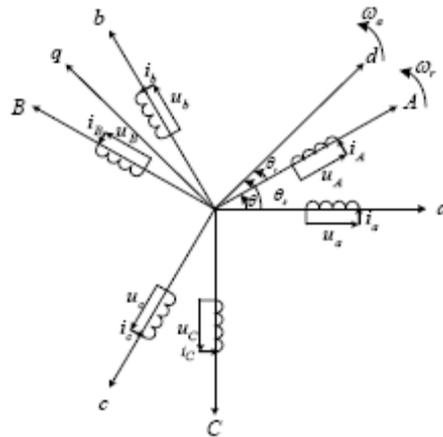


Figure 3.9 : Représentation spatiale de la transformation triphasé-diphasé.

$\theta_s$  : Angle électrique (od) / stator ;

$\theta_r$  : Angle électrique stator / rotor ;

$\theta_{sl} = \theta_s - \theta_r$  : Angle électrique (od) / rotor, (angle de glissement).

$P(\theta)$  représente la matrice de transformation pour les courants, les flux et les tensions, est donnée Par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

La matrice de transformation inverse est donnée par l'expression suivante :

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = P^T$$

### V-3 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

- Pour le stator :

$$[X_{dqo}]_s = [A_s][X_{abc}]$$

- Pour le rotor :

$$[X_{dqo}]_r = [A_r][X_{abc}]$$

Telle que  $X$  est une grandeur qui peut être une tension, un courant, ou un flux  $\varphi$ .

#### V-3-1 Equations électriques :

Pour le stator, on a :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (3.6)$$

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \psi_{dr} \end{cases} \quad (3.7)$$

#### V-3-2 Équations magnétiques

En appliquant la même transformation aux équations du flux (II.4), on aura :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + L_M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + L_M I_{qr} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r I_{dr} + L_M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + L_M I_{qs} \end{cases} \quad (3.9)$$

### V-3-3 équations mécaniques

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = p(\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}) \quad (3.10)$$

On peut exprimer cette relation à l'aide du flux rotorique et des courants statoriques par :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\psi_{dr} I_{qs} - \psi_{qr} I_{ds}) \quad (3.11)$$

### V-4 Modèle d'état de la machine asynchrone à double alimentation

Le modèle mathématique de la machine asynchrone alimentée en tension s'écrit sous la forme d'une équation d'état :

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + Bu(t) \quad \text{Et} \quad Y(t) = CX(t)$$

Avec :

$u(t) = [V_{sd} \ V_{sq} \ 0 \ 0]^T$ , vecteur de commande ou vecteur d'entrée.

$Y(t) = [I_{sd} \ I_{sq}]^T$ , vecteur des grandeurs de sortie.

$X(t) = [I_{sd} \ I_{sq} \ I_{rd} \ I_{rq}]^T$ , vecteur d'état.

Posons :

$T_s = L_s/R_s$  ou  $T_s$  : constante de temps statorique.

$T_r = L_r/R_r$  ou  $T_r$  : constante de temps rotorique.

$\sigma = 1 - M_{sr}^2 / (L_s L_r)$  ou  $\sigma$  : facteur de dispersion.

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & w_{dq} + \frac{1-\sigma}{\sigma} w & \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} & \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} \\ -(w_{dq} + \frac{1-\sigma}{\sigma} w) & -\frac{1}{\sigma T_s} & -\frac{M_{sr}}{\sigma L_s} w & \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M_{sr}}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M_{sr}}{\sigma L_r} w & -\frac{1}{\sigma T_r} & w_{dq} - \frac{1}{\sigma} w \\ \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} w & \frac{M_{sr}}{\sigma L_r T_s} & -w_{dq} + \frac{1}{\sigma} w & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ -\frac{1-\sigma}{\sigma M_{sr}} & 0 \\ 0 & -\frac{1-\sigma}{\sigma M_{sr}} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Les puissances active et réactive échangées avec la machine dépendent aussi des variables électriques du stator et du rotor. Au stator, les puissances active et réactive sont respectivement données par :

$$P_s = \text{Re} \left( u_s i_s^* \right). \quad (3.13)$$

$$Q_s = \text{Im} \left( u_s i_s^* \right).$$

De même pour les puissances échangées au rotor :

$$P_r = \text{Re} \left( u_r i_r^* \right). \quad (3.14)$$

$$Q_r = \text{Im} \left( u_r i_r^* \right).$$

## VI- Modélisation du redresseur triphasé double alternance

Le redresseur est un convertisseur alternatif/continu qui permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative. Son schéma de base est présenté sur la figure (3.10).

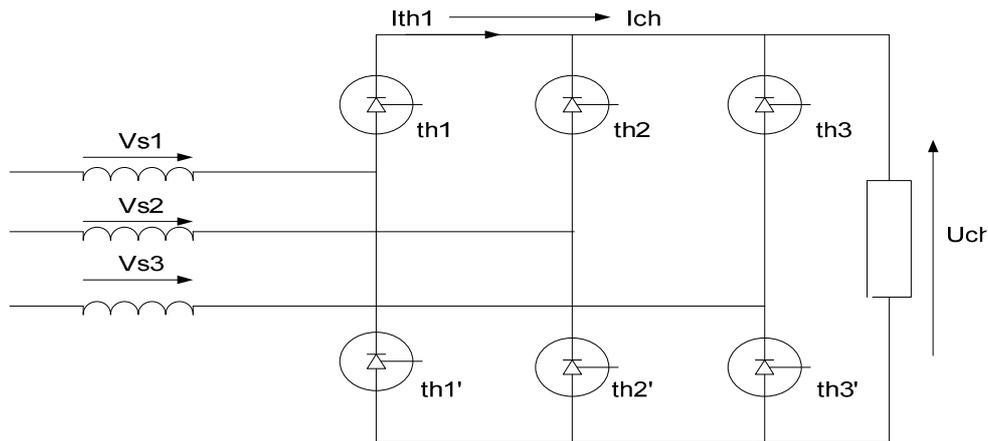


Figure 3.10 : Représentation d'un redresseur triphasé double alternance.

Ce redresseur comporte trois thyristors (Th1, Th2, Th3) à cathode commune assurant l'aller du courant  $I_{th}$  et trois thyristors (Th4, Th5, Th6) à anode commune assurant le retour du courant  $I_{th}$ . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension

$$v_{s1}(t) = v_m \sin(\omega t),$$

$$v_{s2}(t) = v_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \quad (3.15)$$

$$v_{s3}(t) = v_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

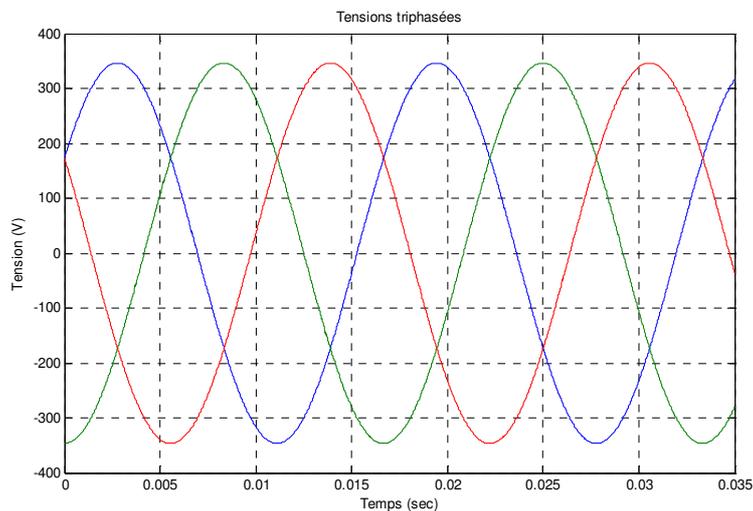


Figure 3.11 : Tension triphasée.

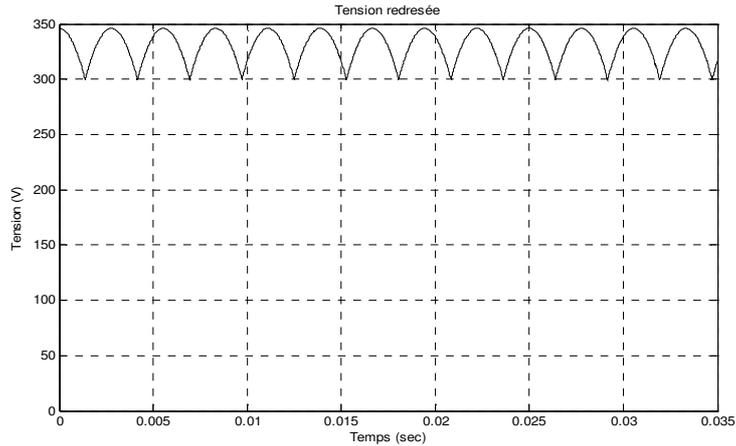


Figure 3.12 : Tension redressée.

### VII- Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe-bas LC, pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est schématisé sur la figure (3.13).

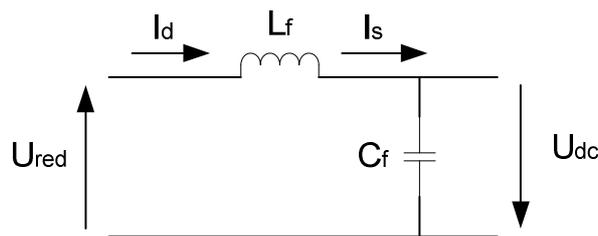


Figure 3.13 : Représentation d'un filtre passe bas.

Le filtre est modélisé par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} U_{red}(t) = L_f \frac{dI_d(t)}{dt} + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I_s(t)) \end{cases} \quad (3.16)$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_{red}(s)} = \frac{1}{1 + L_f C_f s^2} \quad (3.17)$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à

$$F_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (3.18)$$

### VIII- Onduleur

L'onduleur de tension à MLI est toujours habituellement choisi pour sa réponse rapide et ses performances élevées. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380-50Hz. Après redressement, la tension filtrée  $U$  (étage continu) est appliquée à l'onduleur figure (3.13).

Le fonctionnement de l'onduleur obéit à un séquençement de  $180^\circ$  de conduction par interrupteur d'un même bras. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la machine asynchrone à double alimentation une fois les interrupteurs sont ouverts.

Il est à noter qu'un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs haut et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continue.

#### VIII-1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé

Un onduleur triphasé peut-être considéré comme trois onduleurs monophasés. Il est composé de six transistors ( $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$ ) shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ( $D_1, D_2, D_3, D'_1, D'_2, D'_3$ ), pris deux à deux et déphasés entre eux de  $2/3$  de période Figure (3.14).

Il existe 6 modes d'opération dans un cycle et la durée de chaque mode est de  $60^\circ$ , chaque interrupteur conduisant pendant  $120^\circ$ .

Ainsi on obtient un système de 3 tensions composées alternatives à créneau et déphasées entre elle de  $1/3$  de la période [20].

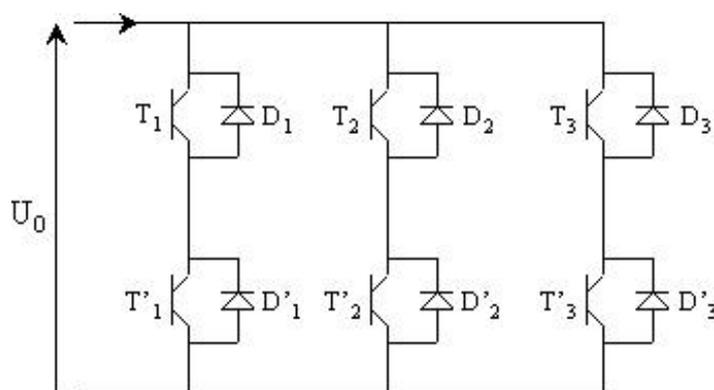


Figure 3.14 : Représentation d'un onduleur triphasé.

VIII-2 Modèle mathématique de l'onduleur triphasé

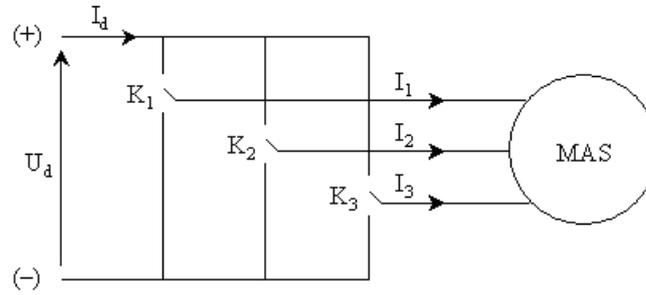


Figure 3.15 : Représentation des transistors par des interrupteurs.

L'onduleur utilisé est un onduleur à trois bras, chaque bras étant constitué de deux interrupteurs bidirectionnels. Un interrupteur est composé par un transistor  $T_i$  et d'une diode  $D_i$ . La commande des transistors étant complémentaire, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions ( $K_i$ ) comme indiqué sur la Figure (3.15).

On définit les fonctions logiques de connexion par

$$K_i = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T_i' \text{ est ouvert} \\ 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T_i' \text{ est fermé} \\ i=1, 2, 3. \end{cases} \quad (3.19)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont données par

$$\begin{cases} V_{ab} = U_d (K_1 - K_2) \\ V_{bc} = U_d (K_2 - K_3) \\ V_{ca} = U_d (K_3 - K_1) \end{cases} \quad (3.20)$$

Par conséquent, les tensions simples sont exprimées de la manière suivante

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_d}{3} (2K_1 - K_2 - K_3) \\ V_b = \frac{U_d}{3} (K_1 - 2K_2 - K_3) \\ V_c = \frac{U_d}{3} (K_1 - K_2 - 2K_3) \end{cases} \quad (3.21)$$

Avec une représentation matricielle, on a

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = U_d/3 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

### VIII-3 Onduleur à modulation de largeurs d'impulsion (MLI)

L'onde de sortie est constituée de trains d'impulsions de largeur et d'espacement variables en vue de réduire le taux d'harmonique. Ces trains d'impulsions sont alternativement positifs et négatifs.

Ce type d'onduleur présente un intérêt certain lorsque l'on cherche une onde de sortie voisine de la sinusoïde ou plus facilement filtrable.

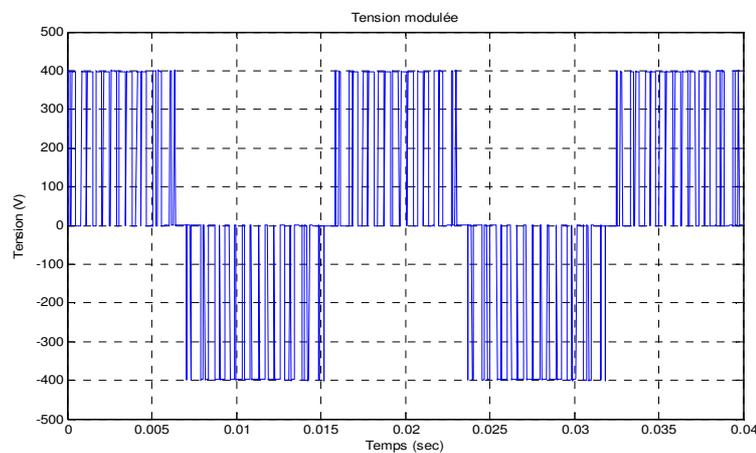


Figure 3.16 : Tension modulée.

## IX- Stratégie de commande de la MADA

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse de vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée. En utilisant le modèle de la turbine associé au modèle de la MADA, un essai en boucle ouverte, Figure (3.16), nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale [64].

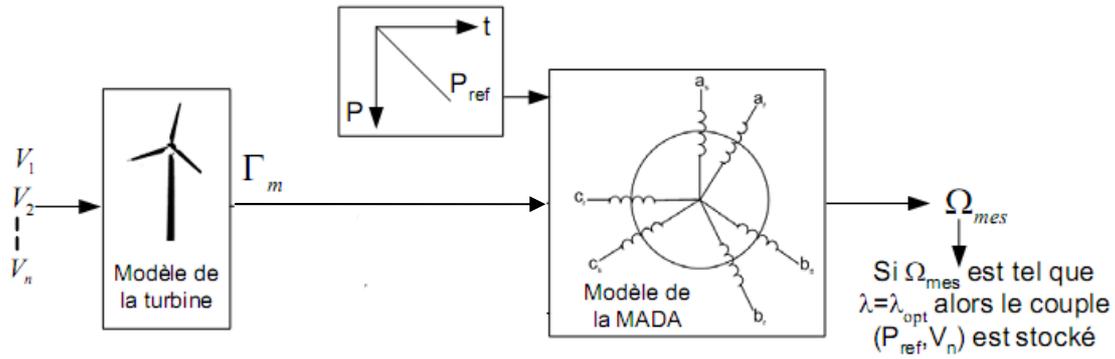


Figure 3.17 : Principe de l'essai en boucle ouverte.

Nous allons donc, dans le paragraphe suivant, déterminer les équations qui lient les puissances active et réactive statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

### IX-1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En choisissant un référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique  $\psi_s$  avec l'axe d, nous pouvons écrire :

$$\psi_{ds} = \psi_s ; \psi_{qs} = 0 \quad (3.23)$$

L'équation du couple devient alors

$$C_{em} = \frac{pM}{L_s} (\psi_{ds} \cdot I_{qr}) \quad (3.24)$$

Dans l'hypothèse où le flux  $\psi_{ds}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé a,b,c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\psi_{sn}}{dt} \quad (3.25)$$

Si on néglige la résistance du bobinage statorique  $R_s$ , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et fortes puissances utilisées dans l'énergie éolienne, cette relation devient

$$V_{sn} = \frac{d\psi_{sn}}{dt} \quad (3.26)$$

La relation III.26 montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de  $\pi/2$  sur ce même vecteur.

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant)

$$V_{ds} = 0 \text{ et } V_{qs} = V_s.$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V = \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3.28)$$

A partir de l'équation III.28, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.29)$$

### IX-1-1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances, active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [34]

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (3.30)$$

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

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases}$$

En remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions données par l'équation III.29, nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \psi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3.31)$$

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

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (3.32)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  près imposée par le réseau.

### IX-1-2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations III.9 en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation III.29

$$\begin{cases} \psi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \\ \psi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad (3.33)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation III.7. Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g\omega_s \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.34)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g\omega_s \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.35)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme  $g\omega_s \frac{V_s M}{\omega_s L_s}$  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 III.31, III.32 et III.34 permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler, encadré en rouge, (figure 3.18), avec  $\sigma$  le coefficient de dispersion de Blondel :

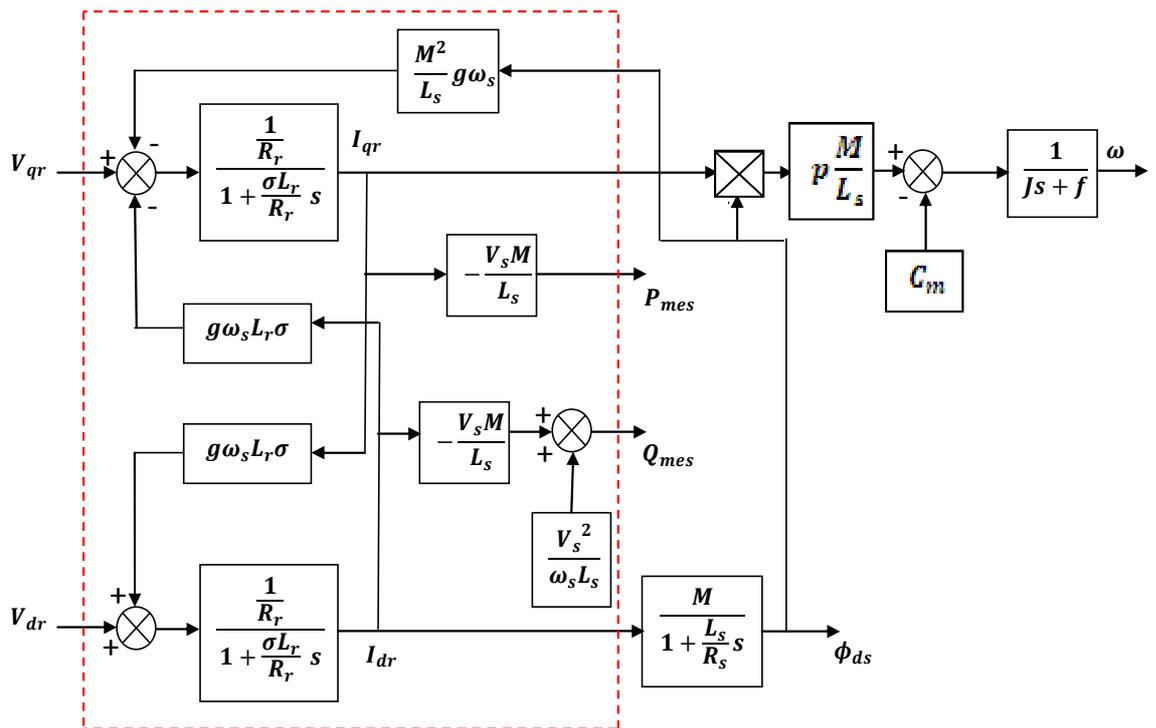


Figure 3.18 : Schéma bloc du système à réguler.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances, active et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q et la puissance active pour l'axe d. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

**X- Etablissement des angles nécessaires aux transformations**

Pour déterminer l'angle de transformation de Park  $\theta_1$  pour les grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à mesurer les tensions statoriques, à les faire passer dans un repère diphasé et en extraire la phase  $\theta_s$  que forme le vecteur tension avec l'axe de la première phase du stator. Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe d, nous retranchons  $\pi/2$  à cet angle [8]. Cette méthode est fiable à condition que les tensions statoriques soient stables en fréquence avec peu de fluctuations pour pouvoir effectuer une mesure précise. Dans notre cas, la machine débite sur le réseau, la fréquence des tensions statoriques varie par conséquent très peu. Dans le cas de fluctuations du réseau, nous pouvons envisager l'utilisation d'une boucle à verrouillage de phase robuste permettant d'estimer la fréquence et l'amplitude de la tension réseau. Le rotor forme lui, un angle  $\theta_m$  avec la phase a du stator, l'angle  $\theta_1$  nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques est donc donné par  $(\theta_1 - \theta_m)$ . Une mesure des tensions statoriques et un capteur de vitesse sont indispensables pour déduire ces angles de transformation (figure 3.19).

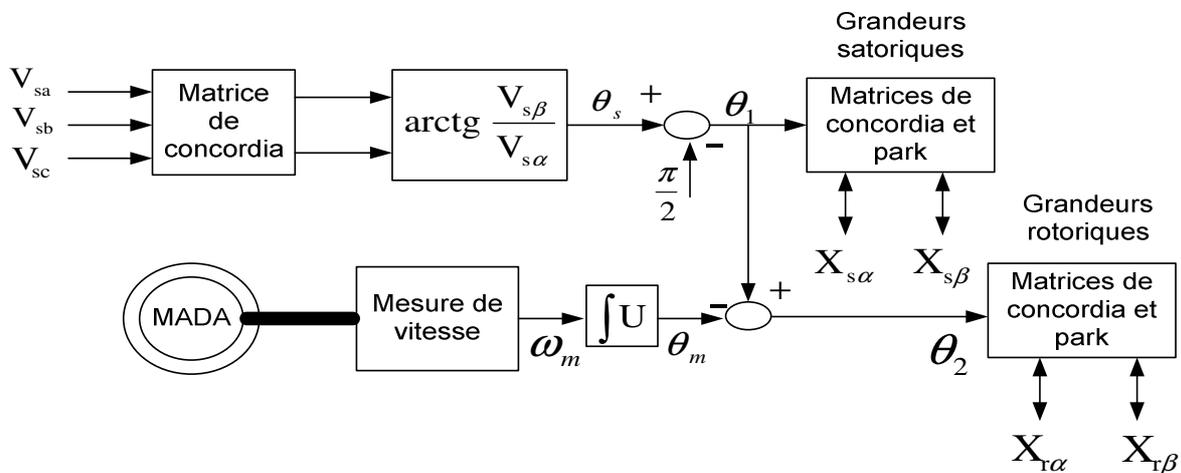


Figure 3.19 : Etablissement des angles pour les transformations de Park.

La figure (3.20), montre la disposition de ces angles avec le système d'axe choisi. Elle met en évidence les axes fixes ( $\alpha_s, \beta_s$ ) liés au stator, le repère tournant ( $\alpha_r, \beta_r$ ) lié au rotor et le repère tournant (d, q), dont l'axe d est synchronisé avec le vecteur flux statorique et l'axe q avec le vecteur tension statorique.

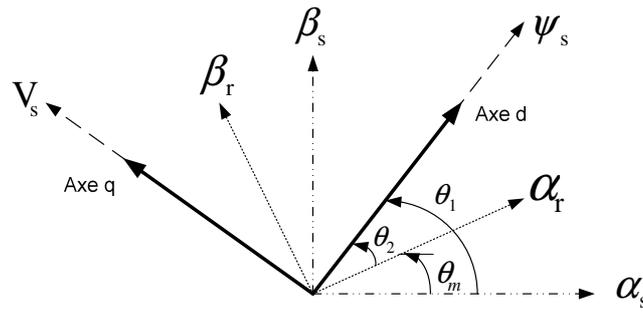


Figure 3.20 : Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi

## XI- Commande vectorielle de la MADA en génératrice

### XI-1- Principe général

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est donné sur la figure (3.21). La consigne de puissance réactive est maintenue nulle. Nous pouvons constater la présence de deux régulateurs sur chaque axe (R1 et R2) pour l'axe d et (R'1 et R'2) pour l'axe q.

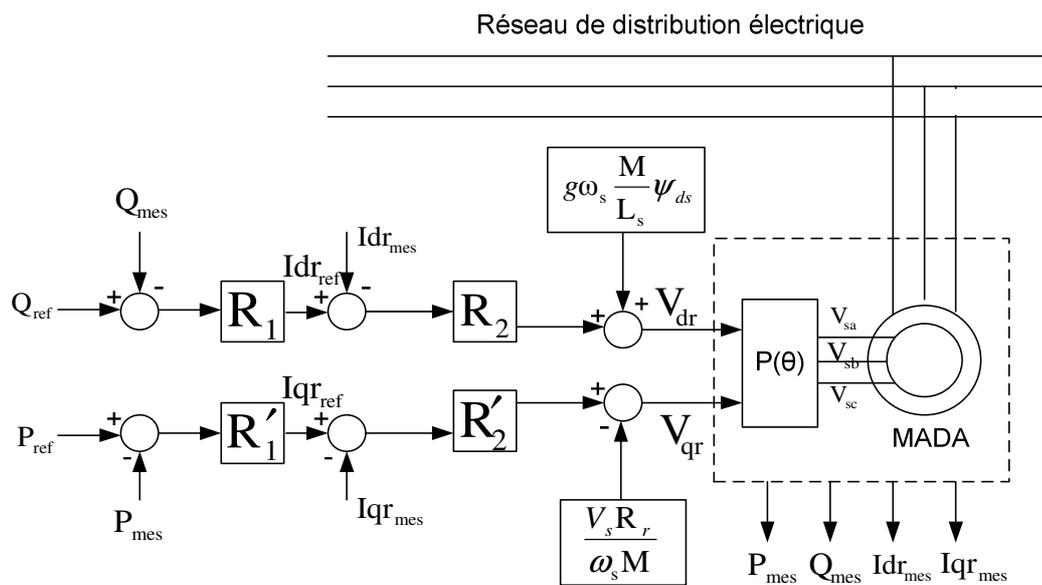


Figure 3.21 : Principe général de la commande vectorielle en P et Q de la MADA

Si l'on observe le schéma de la figure (3.22), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ . Lorsque la machine fonctionne de façon 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 des régulateurs R2 et R'2 se justifie.

Dans notre cas, nous considérons que la machine est connectée à un réseau stable, la tension  $V_s$  est par conséquent constante et les régulateurs R2 et R'2 sont inutiles. Chaque axe comporte donc un seul régulateur comme indiqué sur la figure (3.22).

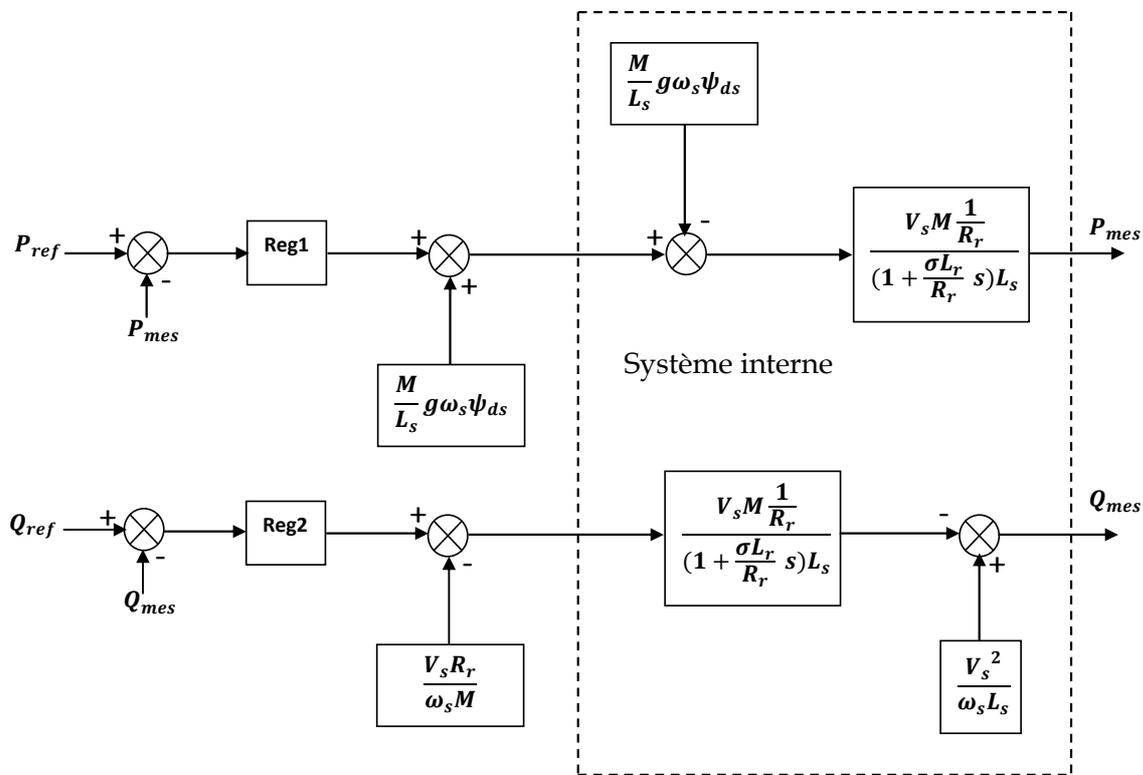


Figure 3.22 : Commande vectorielle avec un seul régulateur

Bien que la dynamique du dispositif éolien soit relativement lente par rapport à l'évolution des grandeurs électriques, 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 la robustesse et du rejet de perturbations. Ainsi, au cours de la synthèse de ces 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'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice. Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donnés la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température.

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. La consigne de puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale conférant le meilleur rendement possible au système

éolien. Un essai en boucle ouverte sera préalablement réalisé en simulation afin de déterminer la caractéristique donnant la vitesse de rotation de la machine en fonction de la puissance de référence imposée par la régulation.

## **XII- Conclusion**

Cette partie nous a permis de présenter une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement ; ainsi que ses avantages, ses inconvénients et ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle mathématique de la machine auquel on a appliqué la transformation de Park qui simplifie le système d'état de la machine. Ensuite, on a présenté la stratégie de régulation choisie pour l'utilisation de la MADA dans un système éolien est une commande vectorielle pour les puissances active et réactive. La mise en équation, le choix du repère diphasé et les simplifications nécessaires à la synthèse de régulateurs sont présentés.

## Chapitre 4

# Commande de l'éolienne et résultats de simulation

### **I- Introduction**

La mise en équation du modèle de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande ainsi que les résultats de simulation.

Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur Proportionnel – Intégral est réalisée. Ce type de régulateur est le plus utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels. Afin de comparer ses performances à d'autres régulateurs plus élaborés, nous effectuons également la synthèse d'un régulateur RST, régulateur flou classique puis d'un régulateur flou adaptatif. De plus ce chapitre va nous permettre de comparer les performances des différents régulateurs utilisés en simulation.

## II- Synthèse d'un régulateur Proportionnel intégral

La stratégie de commande de la MADA décrite au chapitre précédent a déjà été étudiée dans le cas de régulateurs PI (proportionnel intégral). C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure (4.1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

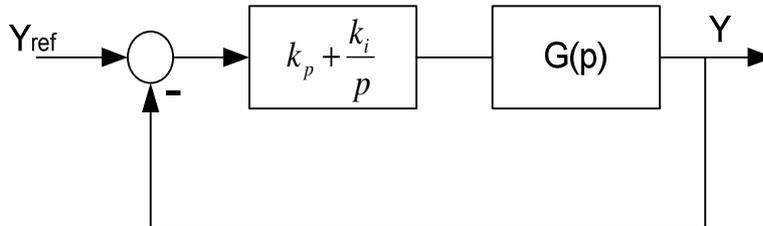


Figure 4.1 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

$$\text{Avec } G(p) = \frac{MV_s}{L_s R_r + p L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs peut être écrite sous la forme suivante :

$$H(p) = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} * \frac{\frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (\text{IV.1})$$

Pour la synthèse du régulateur nous choisissons la méthode de compensation de pôles, on choisit de compenser, par le zéro introduit par le PI, le pôle dominant, de la fonction de transfert du système non corrigé, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

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

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H(p) = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (\text{IV.3})$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$T(p) = \frac{1}{1 + p\tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (\text{IV.4})$$

Le terme  $\tau_r$  désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci en boucle ouverte à 43 ms. En boucle fermée, on à améliorer ce temps de réponse de trois fois plus. Les termes  $k_p$  et  $k_i$  sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine.

A partir de (IV.2) et (IV.4) on peut déterminer  $k_p$  et  $k_i$  ;

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (\text{IV.5})$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s}$$

Face aux hypothèses faites pour simplifier le modèle de la MADA, le PI est un régulateur qui présente plusieurs inconvénients. Ainsi, et a titre d'exemple, Les coefficients sont directement calculés en fonction des paramètres de la machine ce qui entraîne une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres.

Les paragraphes suivants présentent alors la synthèse de régulateurs plus robustes et prenants mieux en compte les perturbations.

### III- Synthèse d'un régulateur RST

Un régulateur de type RST est un régulateur polynomial et se présente comme une alternative intéressante aux régulateurs de type Proportionnel - Intégral. Il permet de mieux gérer le compromis rapidité et performances. Les éléments R, S et T sont des polynômes dont le degré est fixé suivant le degré des fonctions de transfert de poursuite et de régulation en boucle ouverte. Ils sont calculés à l'aide d'une stratégie de placement de pôles robustes [23]

Aussi, le choix d'une telle structure peut être justifié par le fait qu'elle permet de faire un placement des pôles. Notons à ce passage que qu'elle que soit la méthode, celle ci permet de placer les pôles du système boucle d'une certaine manière. Toutefois, ce placement est rarement justifié ; c'est-à-dire comment concilier performance et robustesse. A travers une analogie avec une structure utilisant un retour d'état reconstruit, nous montrons qu'il est possible avec la structure RST de palier à ce problème. [66]

#### - III-1 La structure de correction

La structure de commande RST s'appuie sur la structure formelle suivante :

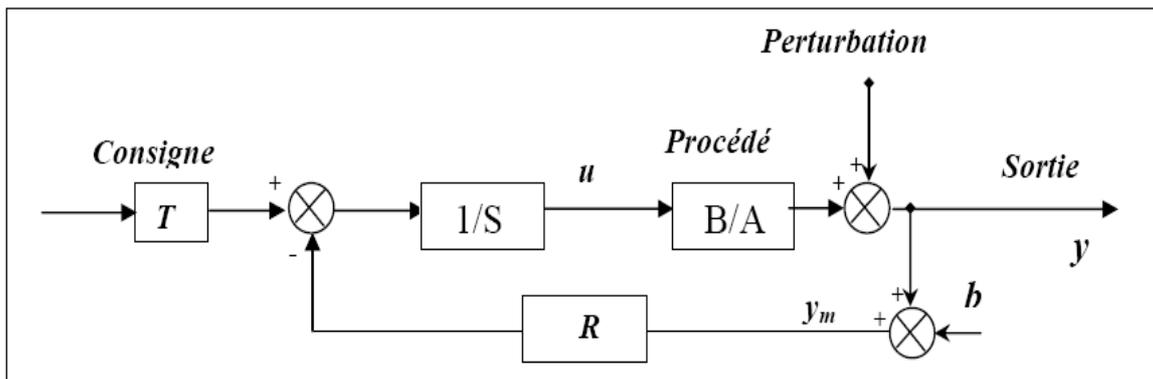


Figure 4.2 : Structure RST

Où A, B, R, S et T sont des polynômes de la variable « s » pour les systèmes continus ou « z » pour le cas des systèmes discrets.

On supposera que les fonctions rationnelles R/S et T/ S sont propres, c'est-à-dire que le degré de leur numérateur n'excède pas le degré de leur dénominateur.

Le régulateur est défini par l'équation suivante :

$$S.u = T.c - R.y_m \quad (IV.4)$$

En réalité dans la structure représentée par la figure (4.3), T désigne une fonction rationnelle, (NT, DT désignent respectivement son numérateur et son dénominateur). En effet, ceci représente une deuxième configuration de la structure RST et ne change en rien les calculs de la détermination du régulateur considéré. Ceci peut être vu comme un précompensateur introduit en vue d'un adoucissement de la commande [68].

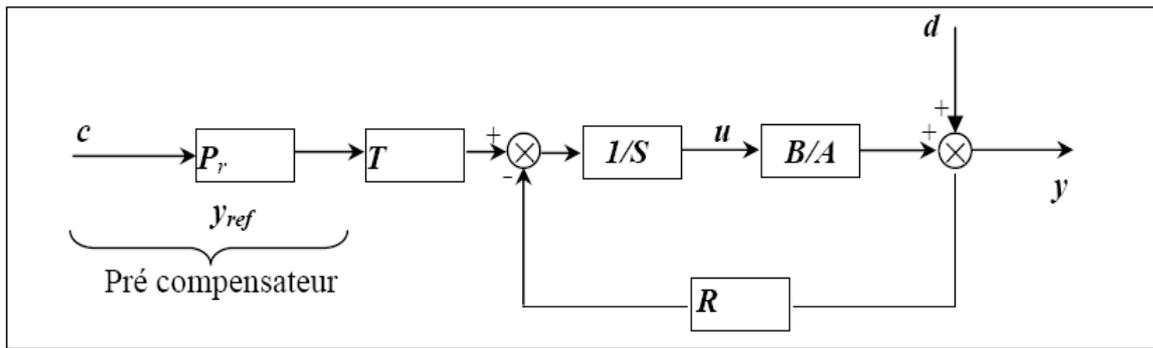


Figure 4.3 : Structure RST avec modèle de référence Pr

### - III-2 Equation de la boucle fermée

Etant donné un procédé défini par sa fonction de transfert, pour réaliser la synthèse d'un compensateur afin de rendre la sortie  $y$  la plus proche possible d'une référence donnée pour une certaine classe de consignes  $c$  et de perturbation  $d$ , deux questions se posent alors :

- Comment choisir le modèle de référence?
- Si l'on sait répondre à la première question, comment déterminer les polynômes  $R$ ,  $S$  et  $T$ .

Où :

$$S.U = R.y_m + T.C$$

$$= -R(y + b) + T.C$$

$$\Rightarrow T.C = S \left( \frac{A.y - A.d}{B} \right) + R(y + b)$$

$$B.T.C = (A.S + B.R)y + R.B.b - A.S.d$$

$$\Rightarrow y = \frac{B.T}{(A.S + B.R)} C + \frac{R.B}{(A.S + B.R)} b - \frac{A.S}{(A.S + B.R)} d \quad (IV.5)$$

Soit  $A.S + B.R$ , le polynôme caractéristique de la boucle fermée.

### - III-3 Résolution de l'équation de Bézout

Conformément à la figure (3.2) et en l'absence de bruit de mesure, on rappelle l'équation en boucle fermée donnant les transferts en poursuite et en régulation :

$$y = \frac{B.T}{A.S + B.R} c + \frac{A.S}{A.S + B.R} d \quad (IV.6)$$

Le principe de placement des pôles consiste à spécifier le comportement  $D(S)$  de la boucle fermée, c'est-à-dire calculer les polynômes  $R$  et  $S$  tels que :

$$A.S + B.R = D \quad (IV.7)$$

On suppose pour clarifier les expressions suivantes que :

- la consigne  $c$  et la perturbation  $d$  sont constantes.

- le rejet de la perturbation  $d$  est assuré si et seulement si  $S(0) = 0$  ou de façon équivalente :

$$S(p) = p.S(p) \quad (IV.8)$$

- le gain statique du transfert consigne- sortie est égal à 1 si et seulement si :

$$T(0) = R(0)$$

On peut remarquer que le polynôme  $T$  intervient uniquement dans le transfert consigne- sortie. Il permet de spécifier le comportement du transfert en poursuite :

$$\frac{y}{c} = \frac{B.T}{D}$$

En d'autres termes,  $T$  peut contenir une partie de la dynamique  $D$ , à cette condition, il est utile de remarquer aussi que le transfert  $\frac{T(p)}{R(p)}$  doit être propre [22].

La fonction de transfert  $\frac{A}{B}$  du processus étant propre; le régulateur  $\frac{R}{S}$  l'est également.

$$d^\circ(AS + BR) = d^\circ(D) = d^\circ(AS) = d^\circ(A) + d^\circ(S) \quad (IV.9)$$

La détermination des polynômes  $R$  et  $S$  passe par la résolution du système linéaire (3.7), où les inconnues sont les coefficients des puissances en  $s$  de ces polynômes. Le choix du degré de  $R$  et  $S$  se fait en général par rapport au régulateur retenu, propre ou strictement propre [12]:

• Pour un régulateur propre:  $d^\circ(R) = d^\circ(S)$

$$d^\circ(R) = d^\circ(A)$$

$$d^\circ(D) = 2.d^\circ(A)$$

• Pour un régulateur strictement propre:  $d^\circ(S) = d^\circ(R) + 1$

$$d^\circ(S) = d^\circ(A) + 1$$

$$d^\circ(D) = 2.d^\circ(A) + 1$$

Selon le choix d'un régulateur propre ou strictement propre, on peut aboutir à l'équation de Bézout. Pour un régulateur strictement propre et avec les notions suivantes :

$$A(s) = p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$$

$$B(s) = b_1 p^{n-1} + \dots + b_n$$

$$R(s) = r_0 p^n + r_1 p^{n-1} + \dots + r_n$$

$$S(s) = s_0 p^{n+1} + s_1 p^n + \dots + s_n s$$

$$D(s) = d_0 p^{2n+1} + d_1 p^{2n} + \dots + d_{2n+1} \quad (IV.10)$$

On aboutit au système linéaire suivant dit système de Sylvester:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ a_n & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_1 & b_n & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & b_n \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & a_n & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & b_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \dots \\ \dots \\ s_n \\ r_0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \dots \\ \dots \\ d_n \\ d_{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ d_{2n+1} \end{bmatrix} \tag{IV.11}$$

Ce système possède une solution unique.

Nos systèmes à contrôler sont des systèmes de premier ordre que ce soit pour les courants rotorique, la vitesse mécanique ou les puissances statoriques.

Avec un choix strictement propre on peut déterminer les polynômes de nos régulateurs.

#### IV- Synthèse du régulateur flou

C'est à Lotfi Zadeh, spécialiste renommé en automatique et en théorie des systèmes, à l'université de Berkeley, que revient le mérite d'avoir établi les bases théoriques de la logique floue. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances.

La théorie des ensembles flous permet alors de généraliser des événements naturels tout en faisant appel à des outils mathématiques [83] [84].

#### V- Structure générale d'un réglage par logique floue

La figure IV-2 représente la structure d'une boucle de régulation basée sur un contrôleur flou FLC (fuzzy logic controller).

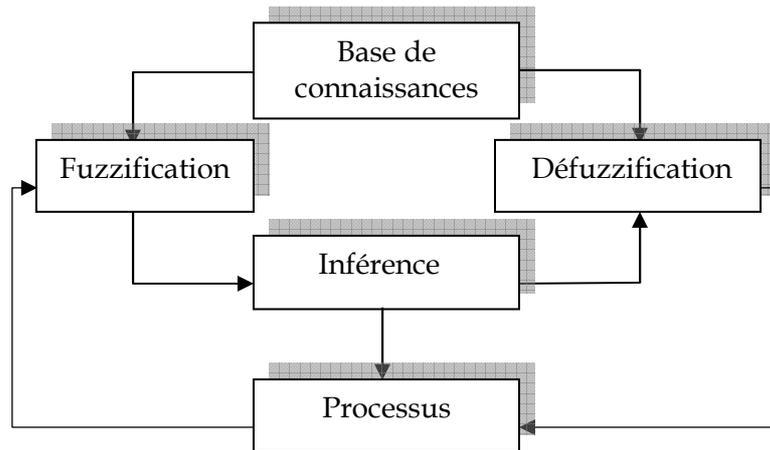


Figure 4.4 : Structure d'une boucle de commande basée sur le FLC.

### - V-1 Fuzzification

C'est l'étape de passage du domaine analogique (grandeurs physiques) au domaine symbolique (variables floues). Cette étape est nécessaire dès que l'on veut manipuler, à l'aide de la théorie des ensembles flous, des grandeurs physiques mesurables précises ou non. Elle permet de déterminer la fonction d'appartenance pour les différentes variables, en particulier pour les variables d'entrée.

### - V-2 Base de connaissance

Elle est constituée d'une base de données et d'une base de règles. La base de données contient les définitions des sous-ensembles flous, leurs fonctions d'appartenance et leurs univers de discours pour chacune des variables intervenant dans le régulateur. La base des règles contient toutes les règles constituant les actions du régulateur.

### - V-3 Mécanisme d'inférence

L'inférence représente l'unité de prise de décision du régulateur flou. Cette dernière peut être décomposée en une partie numérique et une partie linguistique. La partie numérique permet une évaluation numérique des règles, l'évaluation des opérateurs ET et OU. Cette étape est nécessaire étant donné que plusieurs règles sont activées en même temps, ce qui nécessite de rendre prioritaires certaines d'entre elles.

La partie linguistique consiste à déterminer les ensembles d'interventions et par suite l'ensemble résultant.

### - V-4 Défuzzification

La défuzzification réalise la fonction inverse de la fuzzification. Elle définit le passage du domaine symbolique au domaine numérique.

La procédure générale de synthèse d'un régulateur flou peut être effectuée en quatre étapes :

1. Sélection des variables d'entrée et de sortie du régulateur : ce choix dépend du système à commander. L'erreur (différence entre la référence et la sortie du système) et sa dérivée sont souvent utilisées comme entrées du FLC ;
2. Définition des univers de discours et des fonctions d'appartenance pour chacune des variables d'entrées et de sortie du FLC ;
3. Définition des règles de contrôle et leur inférence ;
4. Méthode de défuzzification.

## VI- Définition des fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance permet de convertir en valeurs floues les variables d'entrée en leur affectant un poids que l'on nomme degré d'appartenance  $\mu(x)$ . Elle détermine trois zones :

- ❖ Une zone où les éléments appartiennent totalement à l'ensemble flou, alors  $\mu(x)= 1$  ;
- ❖ Une zone où les éléments sont exclus, alors  $\mu(x)= 0$  ;
- ❖ Une zone floue où l'appartenance s'estime à des degrés divers, alors  $0 < \mu(x) < 1$ .

Il existe différentes formes de fonctions d'appartenance dont les plus utilisées sont : la fonction triangulaire, la fonction trapézoïdale, la fonction Gaussienne...etc. (figure IV.3).

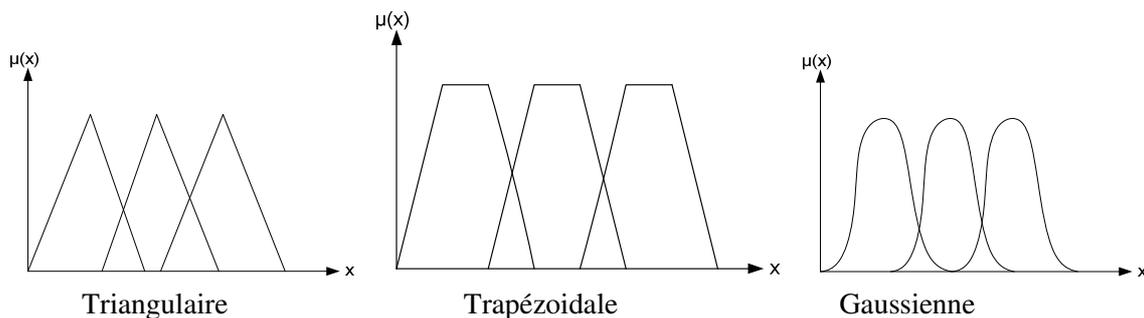


Figure 4.5 : Différentes formes de fonctions d'appartenance.

L'étape suivante consiste à définir les gains multiplicatifs de l'erreur et de sa dérivée. Ces derniers servent à normaliser les entrées et contribuent largement à améliorer la réponse globale du système.

## VII- Définition des règles et leurs inférences

La quatrième étape consiste à définir la stratégie de contrôle proprement dite. Cette dernière est définie comme une suite de règles, provenant souvent d'experts ayant accès au système. L'extraction des règles peut aussi être effectuée en utilisant le plan de phase ou la réponse indicielle.

Les deux techniques consistent à analyser la réponse d'un système comprenant toutes les possibilités éventuelles de comportement, c'est-à-dire un système du 2eme ordre peu amorti et en suite de formuler les règles afin que la réponse coïncide avec la référence (figure 4.6).

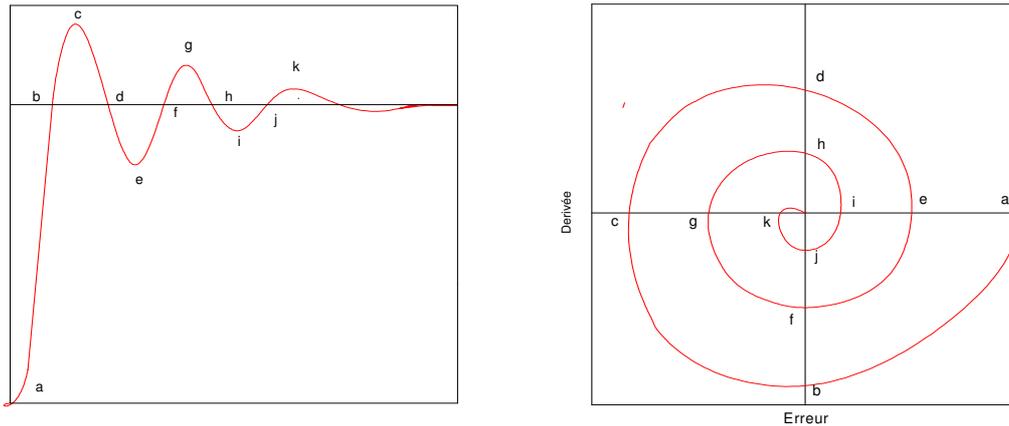


Figure 4.6 : Méthodes de définition des règles floues

Par exemple à l'instant  $t=0$ , l'erreur est maximale, c'est-à-dire positive ( $P_0$ ), quand à sa dérivée elle est environ zéro ( $Z$ ), la commande à cet instant doit être positive afin de réduire l'écart de réglage. La formulation des règles se fait comme suit

SI	e est $P_0$	ET	$\Delta e$ est $P_0$	ALORS	$u=P_0$	OU
SI	e est $P_0$	ET	$\Delta e$ est $Z$	ALORS	$u=P_0$	OU
SI	e est $P_0$	ET	$\Delta e$ est $N$	ALORS	$u=P_0$	OU
SI	e est $N$	ET	$\Delta e$ est $P_0$	ALORS	$u=N$	OU
SI	e est $N$	ET	$\Delta e$ est $Z$	ALORS	$u=N$	OU
SI	e est $N$	ET	$\Delta e$ est $N$	ALORS	$u=Z$	OU
SI	e est $Z$	ET	$\Delta e$ est $P_0$	ALORS	$u=N$	OU
SI	e est $Z$	ET	$\Delta e$ est $Z$	ALORS	$u=Z$	OU
SI	e est $Z$	ET	$\Delta e$ est $N$	ALORS	$u=N$	OU

Les différentes règles sont liées entre elles par l'opérateur OU. Les lettres (a, b, c, d...) sur la figure (4.6) ont servi à la détermination de ces règles. Puisqu'il existe trois segments pour chaque variable, leur nombre total est neuf ( $3 \times 3$ ) [84].

### VIII- différentes méthodes d'inférence

Pour le réglage par la logique floue, on utilise en général les méthodes suivantes :

- ❖ Méthode d'inférence max-prod ;
- ❖ Méthode d'inférence somme-prod ;
- ❖ Méthode d'inférence max-min.

### IX- Description de notre régulateur FLC

La structure suivante représente le schéma d'un régulateur FLC :

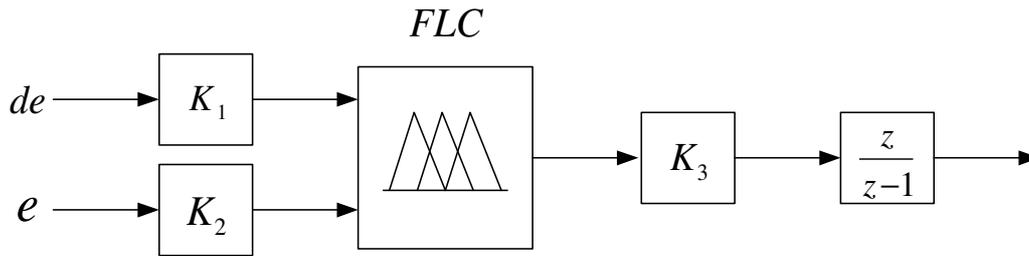


Figure 4.7 : Schéma du régulateur FLC

### - Choix des variables d'entrée et de sortie

Les variables d'entrée : l'erreur et sa dérivé(e, de),

$$e(k) = p_{ref} - p_m,$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1).$$

La variable de sortie : les courants rotoriques.

### - Choix de l'univers de discours

Pour avoir une flexibilité dans l'implémentation du régulateur, on doit limiter les univers de discours d'entrée et de sortie à un intervalle déterminé par la normalisation des entrées et de la sortie, c'est-à-dire  $[-1,1]$ . Il faut donc avoir des gains d'adaptation pour avoir la dynamique voulue, mais il n'y a pas de technique systématique pour la détermination de ces gains, donc on procède par tâtonnements.

### - Choix des fonctions d'appartenances

Les fonctions d'appartenance choisies ont la forme trapézoïdale aux extrémités et triangulaire dans l'univers de discours (figure 4.8).

### - Choix des règles et leurs inférences

Nous avons choisi la règle d'inférence floue (Matrice de MAC VICAR WHEELLEN) (tableau 4.1) et la méthode d'inférence (max-min).

### - Choix de la méthode de défuzzification

Nous avons considéré, dans notre travail, la méthode du centre de gravité pour la défuzzification.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre Figure 4.8, avec :

- Négatif grand noté NG ;
- Négatif petit noté NP ;
- Environ de zéro noté EZ ;
- Positif petit noté PP ;
- Positif grand noté PG ;

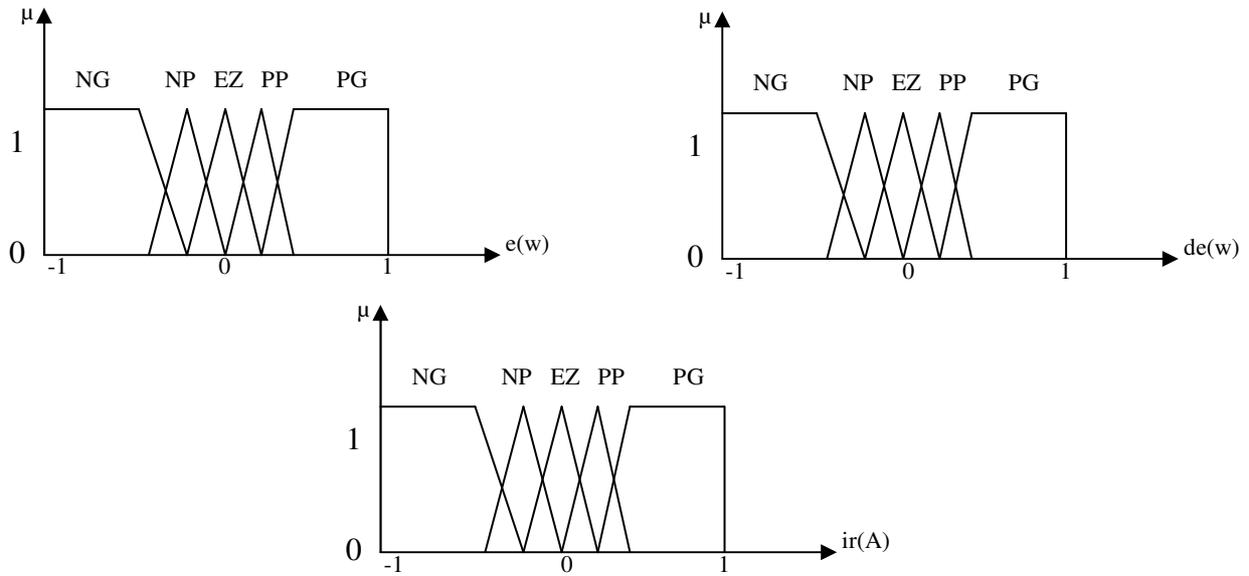


Figure 4.8 : Fonctions d'appartenance

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

Tableau 4.1 : Tableau des règles

La commande floue permet de manipuler les connaissances linguistiques et possède une richesse de possibilités concernant la forme des fonctions d'appartenance, le type de fuzzification et le défuzzification ainsi que le type d'inférence.

### X- Régulateur flou adaptatif

Dans le but de réduire le temps de stabilisation de la réponse dynamique et d'améliorer la robustesse de la commande, on propose une forme d'adaptation des paramètres du contrôleur flou considérons les gains comme étant des variable floues, qui n'est pas le cas de la commande flou classique qui utilise des gains constants.

#### - X.1 Généralités sur la commande adaptative :

La conception d'un contrôleur donné dépend de la nature du système a commandé et de la qualité des performances exigées. L'intérêt d'améliorer les performances des systèmes commandés conduit à des modélisations de plus en plus précises. Les modèles résultants sont souvent non linéaires et les outils fondamentaux des synthèses des lois de commande dans le domaine linéaire deviennent insuffisants. Il peut donc être nécessaire d'avoir recours à de

nouvelles méthodes. Plusieurs techniques de synthèses des régulateurs sont disponibles et chacune d'elles dépend du degré des non linéarités et de l'ordre du système considéré [73]. Dans les systèmes adaptatifs, il est supposé que les paramètres sont ajustés à tout moment, ce qui implique que les paramètres changent dans le processus. Cependant, il est difficile de réaliser l'analyse de la convergence et de la stabilité du système.

La commande adaptative ajuste en temps réel les paramètres du correcteur de manière à garder les performances désirées lorsque les paramètres du procédé varient dans le temps ou sont inconnus, cette adaptation se fait au prix d'une complexité algorithmique plus élevée, Elle nécessite, la plupart du temps, des outils de calcul très puissants tels que les microprocesseurs destinés au traitement du signal (Digital Signal Processor ou DSP) [74] [75].

### - X.2 Description du régulateur flou à gain de commande adaptatif :

Le contrôleur non linéaire à gains adaptés est constitué principalement de deux blocs comme il est montré dans la figure (4.9) [73].

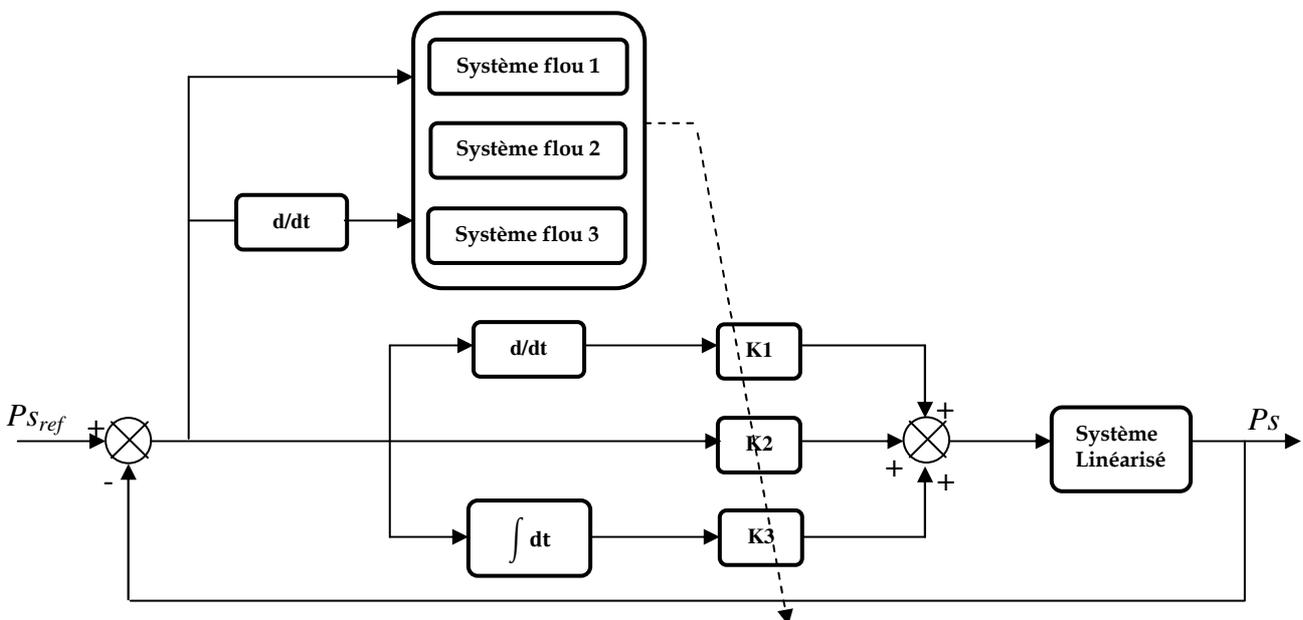


Figure 4.9 : structure d'un régulateur flou avec gain adaptatif flou.

- Une structure proportionnelle, intégrale et dérivateur comme entrée avec l'erreur (la variation de la puissance par rapport à sa référence).
- Une sortie représentant la variation de la puissance.

### - X.3 Développement de la table d'inférence :

L'adaptation floue des gains est interprétée par la table d'inférence donnée dans le tableau 4.2. Le processus d'adaptation est perfectionné dans le but de forcer la convergence de l'erreur dynamique vers zéro (Z), ce qui est un gage pour la stabilité de la réponse en présence des perturbations. Les essais par simulation ont montré que la minimisation de l'erreur statique est réglée par une augmentation du gain  $k_{\Delta e}$  et une diminution du gain  $k_e$ . Ce qui est consigné par les actions données dans la table d'inférence (Tableau 4.2 et Tableau 4.3). Ces actions peuvent être matérialisées par les relations suivantes [75] [73]:

$$k_1 = k_1 + f(e_n + \Delta e_n)$$

$$k_2 = k_2 + f(e_n + \Delta e_n)$$

$$k_{23} = k_3 + f(e_n + \Delta e_n)$$

Où,  $k_e, k_{\Delta e}$  sont les gains de la normalisation, le choix adéquat de ces derniers permet de garantir la stabilité et d'améliorer les performances dynamiques et statiques désirées du système à régler.  $f$  est l'action issue de l'adaptation floue donnée par la table (Tableau 4.2 et Tableau 4.3). Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité [73]:

$\Delta e_n \backslash e_n$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PB	PB	PB	Z	NB
NM	PM	PS	PM	PM	PM	NS	NM
NS	PS	Z	PS	PS	PS	NM	NB
PS	NB	NB	PS	PS	PS	Z	PS
PM	NB	NS	PM	PM	PM	PS	PM
PB	NB	Z	PB	PB	PB	PM	PB

Tableau 4.2 : Table d'inférence établie pour l'adaptation du gain  $k_1$ .

$\Delta e_n \backslash e_n$	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PS	NB	NM	Z	Z
NM	PB	PM	PS	PS	NM	NS	Z	PS
NS	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS	PB
Z	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PM	PB
PS	PM	PS	Z	Z	Z	Z	PM	PB
PM	PS	Z	NS	NM	PS	PS	PB	PB
PB	Z	Z	NM	NB	PM	PM	PB	PB

Tableau 4.3 : Table d'inférence établie pour l'adaptation du gain  $k_2$ .

$\Delta e_n$ \ $e_n$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NM	NM	Z	Z
NM	PB	PB	PM	NS	NS	Z	PS
NS	PB	PB	PS	Z	Z	PS	PB
Z	PB	PM	PS	Z	PS	PM	PB
PS	PM	PS	Z	Z	PS	PM	PB
PM	PS	Z	NS	NS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	NM	NM	PB	PB	PB

Tableau 4.4 : Table d'inférence établie pour l'adaptation du gain k3.

## XI- Résultats de simulation

Cette partie consiste à illustrer les résultats de simulation, et va permettre de tester et de comparer les performances des différents Régulateurs utilisés. Pour chaque série d'essais (suivi de consigne et Robustesse), nous testerons la régulation directe des puissances active et réactive, où ce mode de régulation est particulièrement intéressant dans le cas de la génération d'électricité où l'injection de la puissance active et de la puissance réactive doit être commandée d'une façon précise.

### - XI.1 suivi de consigne

#### • XI.1.1 Régulateur PI

Cette phase consiste à montrer Les résultats des simulations de la commande réalisée, par l'usage des régulateurs proportionnel intégral où on a effectué deux essais qui consistent à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe, à 1500 tr/min.

Conditions de l'essai :

I)

- La puissance active se maintient pratiquement constante et égale à  $-7000W$ .
- à  $t = 2$  s : échelon de puissance réactive,  $Q_{ref}$  passe de 10000 à  $-10000$  VAR.

II)

- à  $t = 1.5$  s : échelon de puissance active,  $P_{ref}$  passe de  $-3000W$  à  $-6000W$  puis de  $-6000W$  à  $-8000W$ .
- La puissance réactive de la machine se maintient pratiquement constante et égale à  $10000W$

Les figures suivantes présentes les résultats obtenus :

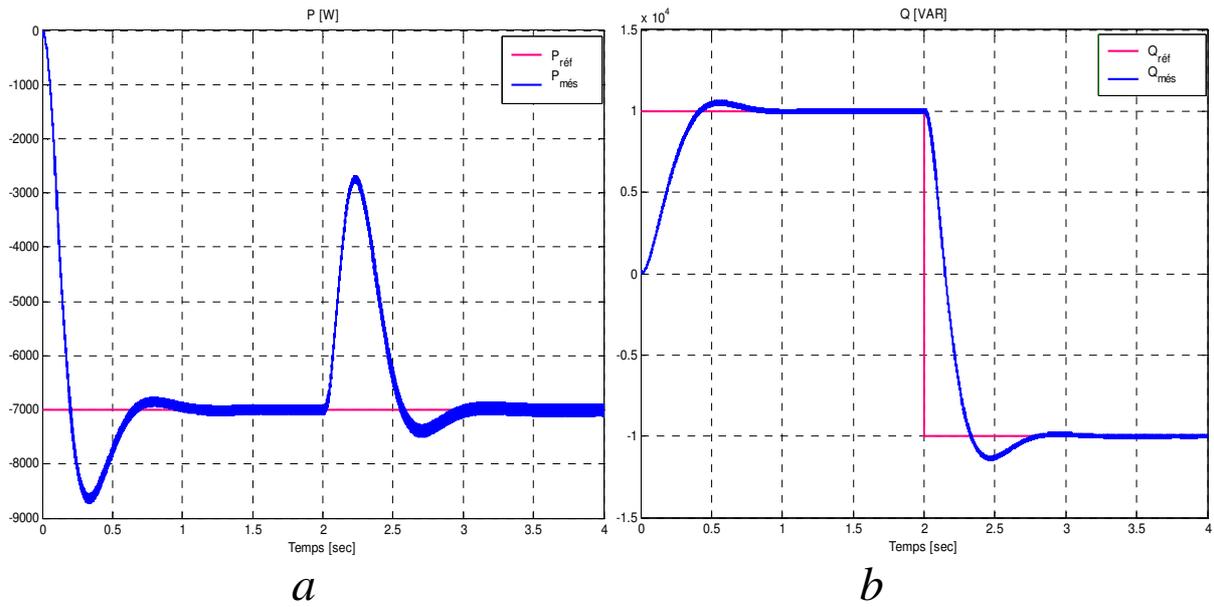


Figure 4.10 : Résultat de simulation par PI

- a. Allures de la puissance active.
- b. Allures de la puissance réactive.

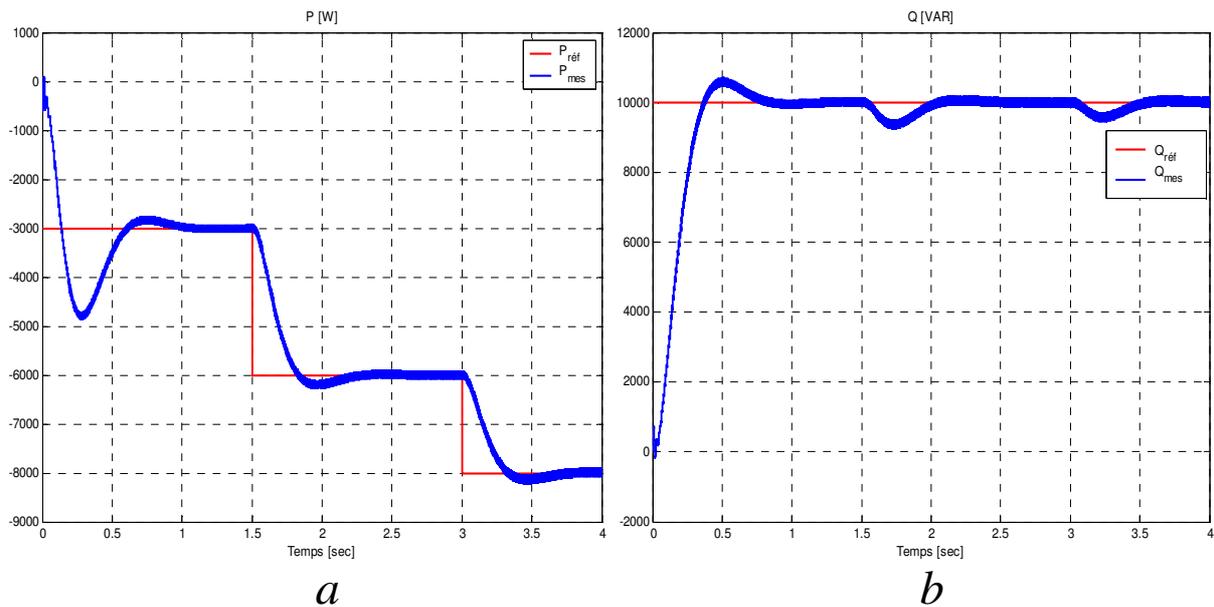


Figure 4.11 : Résultat de simulation par PI

- a. Allures de la puissance active.
- b. Allures de la puissance réactive.

• **XI.1.2 Régulateur RST**

Cette partie consiste à illustrer les résultats de simulation obtenue par l'usage du régulateur RST pour les mêmes conditions de l'essai que la commande précédente, ceci pour avoir une commande plus améliorée de notre système.

Les figures suivantes présentes les résultats obtenus :

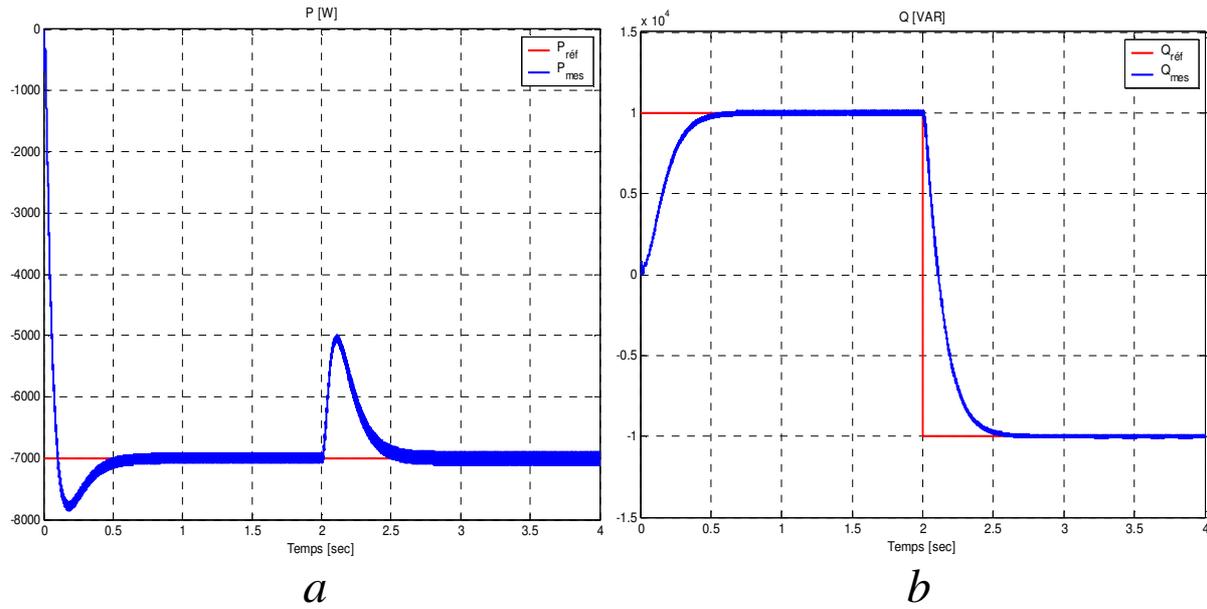


Figure 4.12 : Résultat de simulation par RST

- a. Allures de la puissance active.
- b. Allures de la puissance réactive.

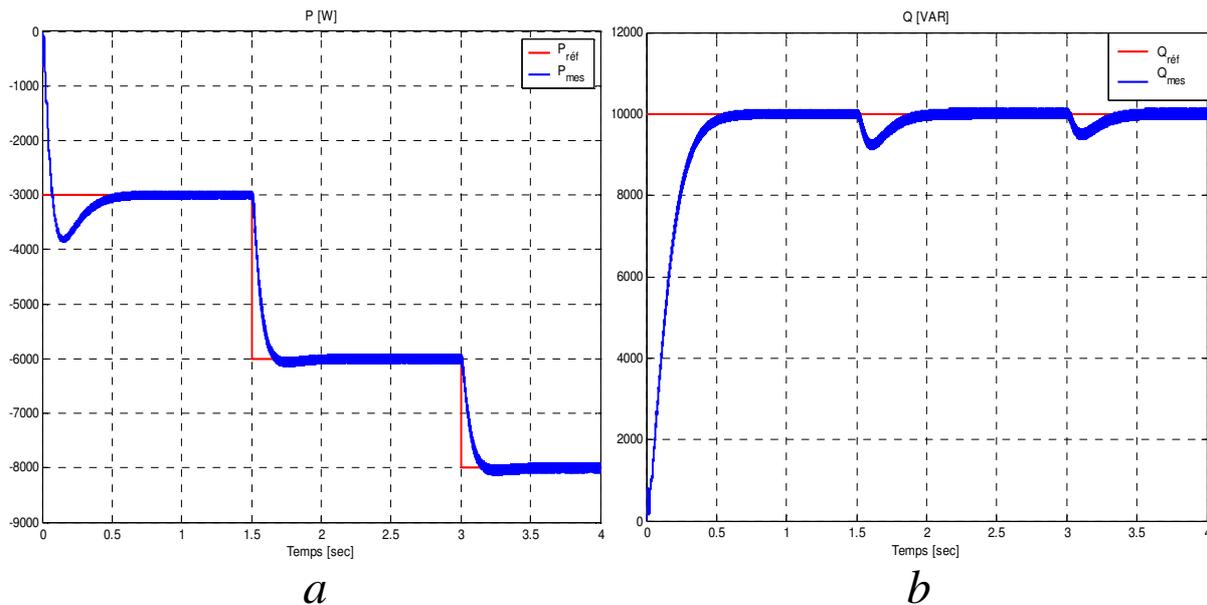


Figure 4.13 : Résultat de simulation par RST

- a. Allures de la puissance active.
- b. Allures de la puissance réactive.

• **XI.1.3 Régulateur FLOUE**

Dans le but d'avoir une commande plus robuste et performante de notre système, et d'améliorer les résultats obtenu par les deux techniques de contrôle appliquées que ce soit par la commande par PI ou par RST, on va réaliser une commande par PI floue.

Les figures suivantes présentes les résultats obtenus :

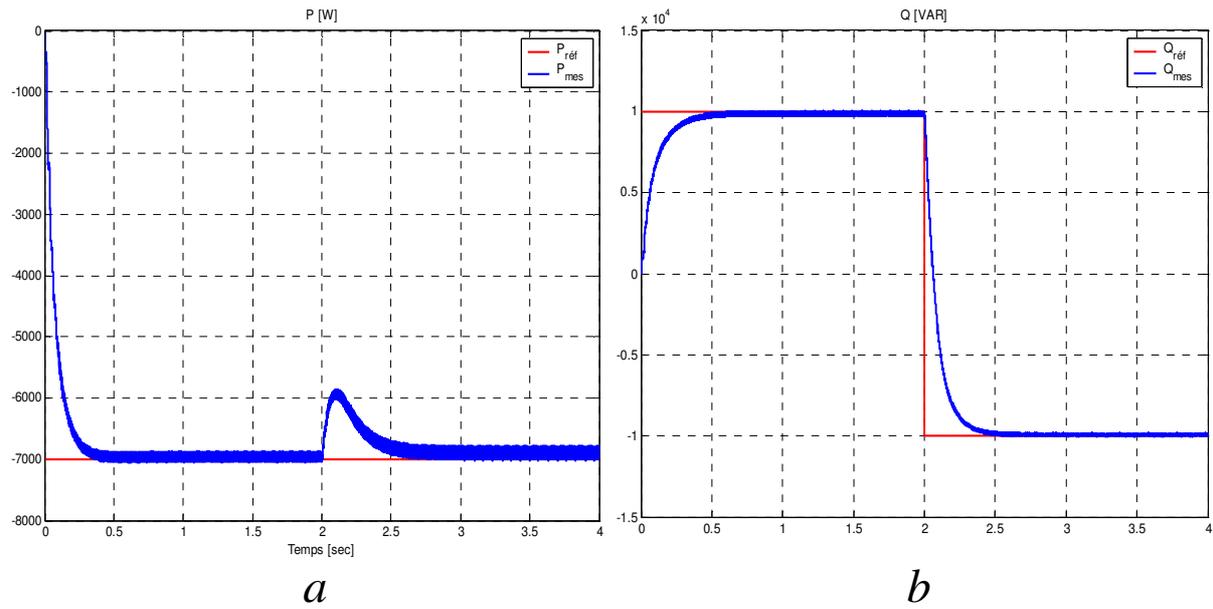


Figure 4.14 : Résultat de simulation par PI floue

- a. Allures de la puissance active.
- b. Allures de la puissance réactive.

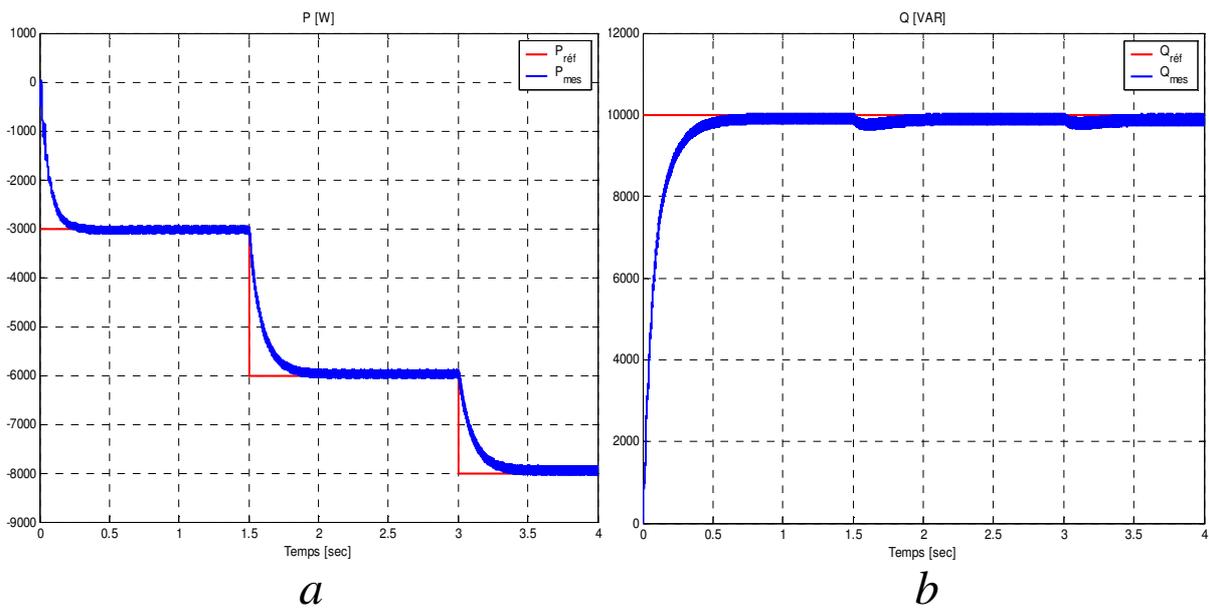


Figure 4.15 : Résultat de simulation par PI floue

- c. Allures de la puissance active.
- d. Allures de la puissance réactive.

• **XI.1.4 Régulateur FLOUE ADAPTATIF**

Les simulations utilisées dans cette partie permettent de mettre en évidence les performances que l'on peut espérer obtenir au moyen d'un régulateur flou adaptatif robuste, ceci dans le but d'améliorer la robustesse de la commande et de réduire le temps de stabilisation de la réponse dynamique.

Sur les figures suivantes, nous donnons les résultats de simulation :

**Les valeurs initiales des gains sont :**

$$G_{pp0} = G_{PQ0} = 10^{-12}, G_{ip0} = G_{IQ0} = 5 \cdot 10^{-5}, G_{dp0} = G_{DQ0} = 10^{-5}$$

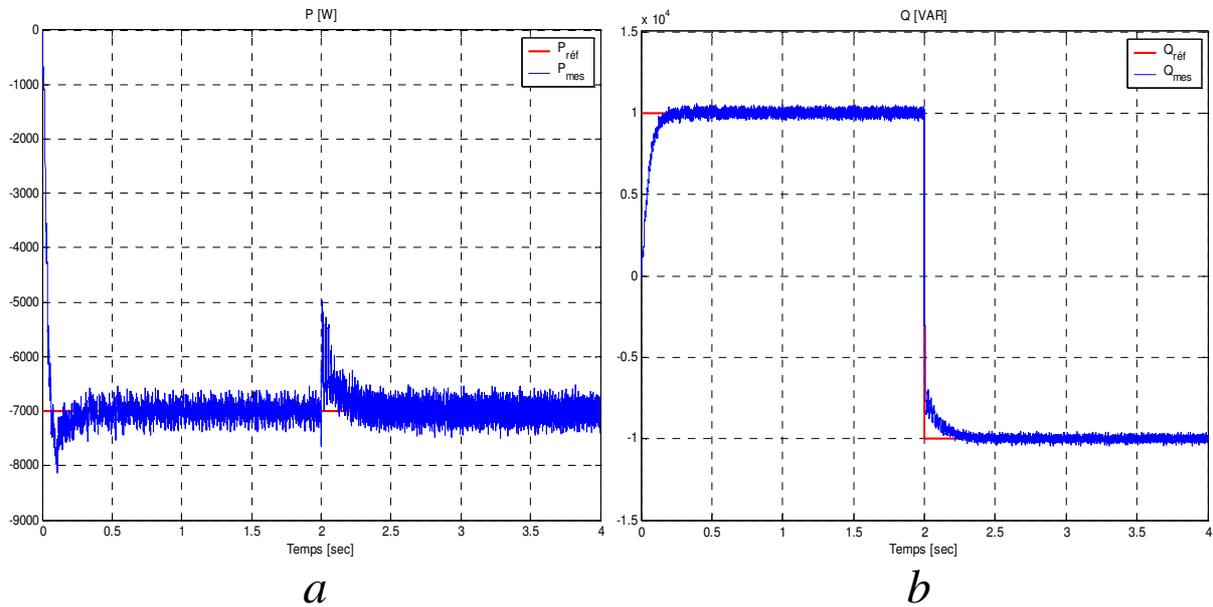


Figure 4.16 : Résultat de simulation par PID floue adaptatif

a. Allures de la puissance active.

b. Allures de la puissance réactive.

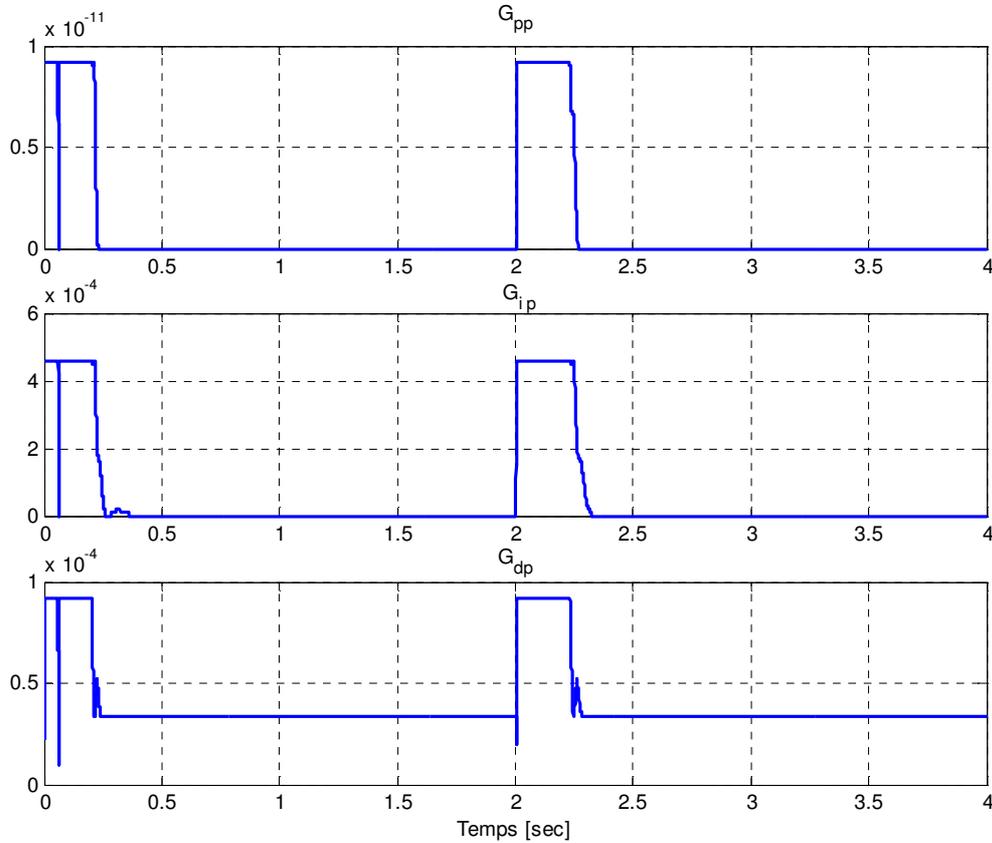


Figure 4.17 : gains d'adaptation pour la puissance active

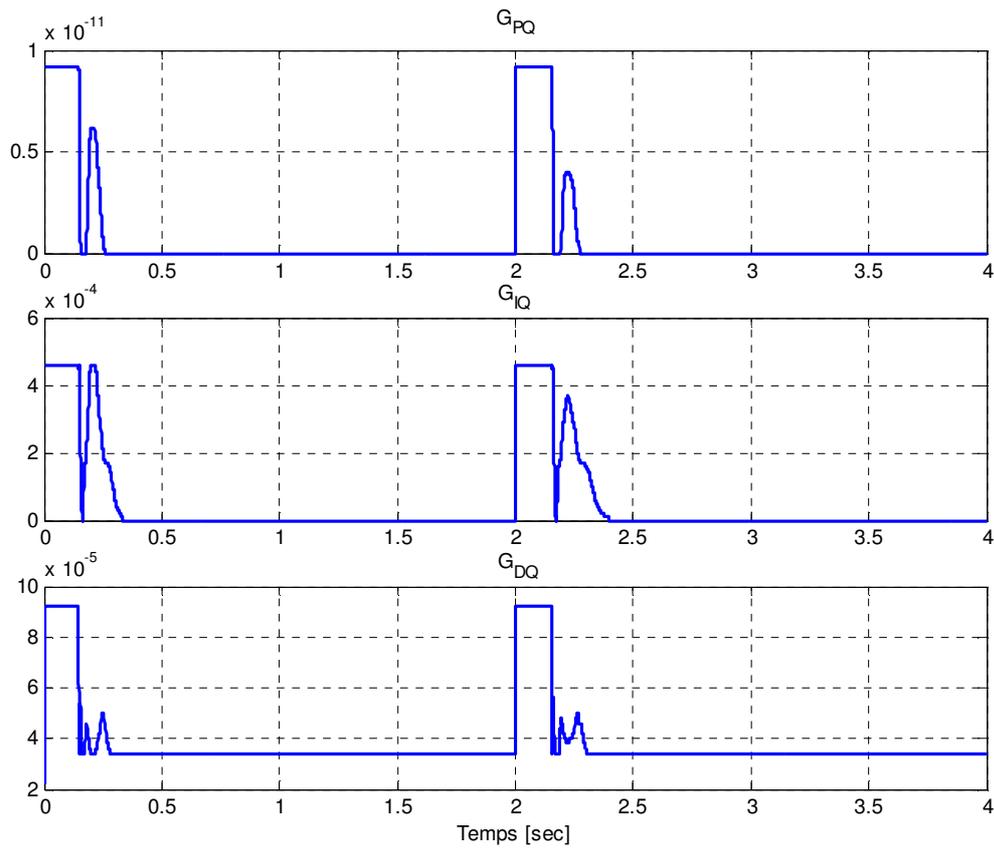


Figure 4.18 : gains d'adaptation pour la puissance réactive

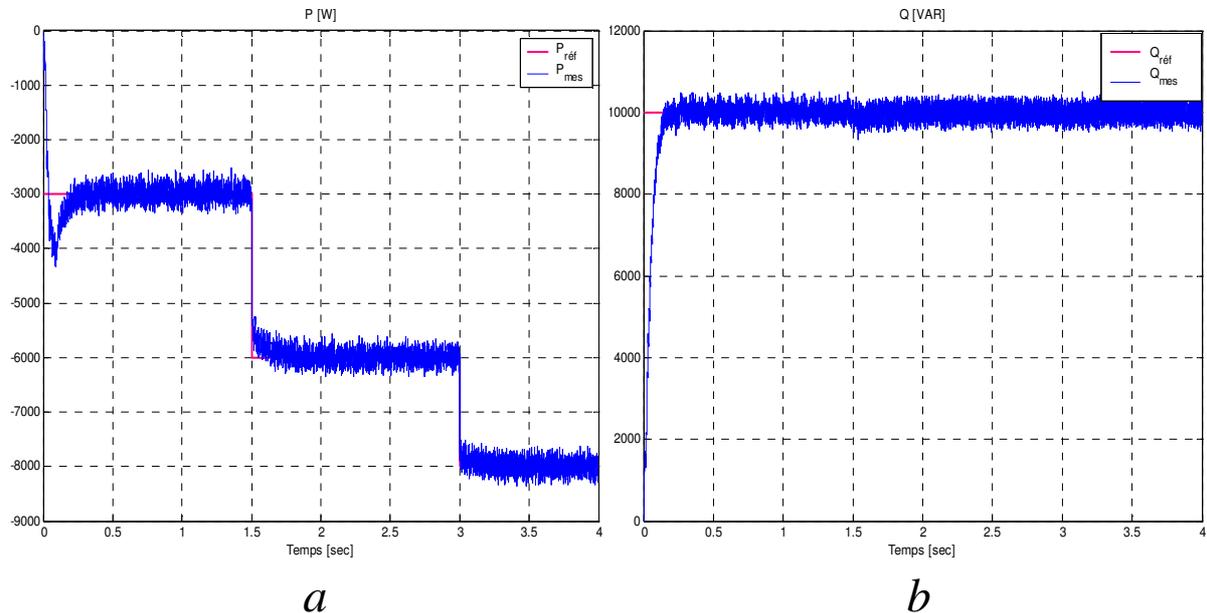


Figure 4.19 : Résultat de simulation par PID flou adaptatif

c. Allures de la puissance active.

d. Allures de la puissance réactive.

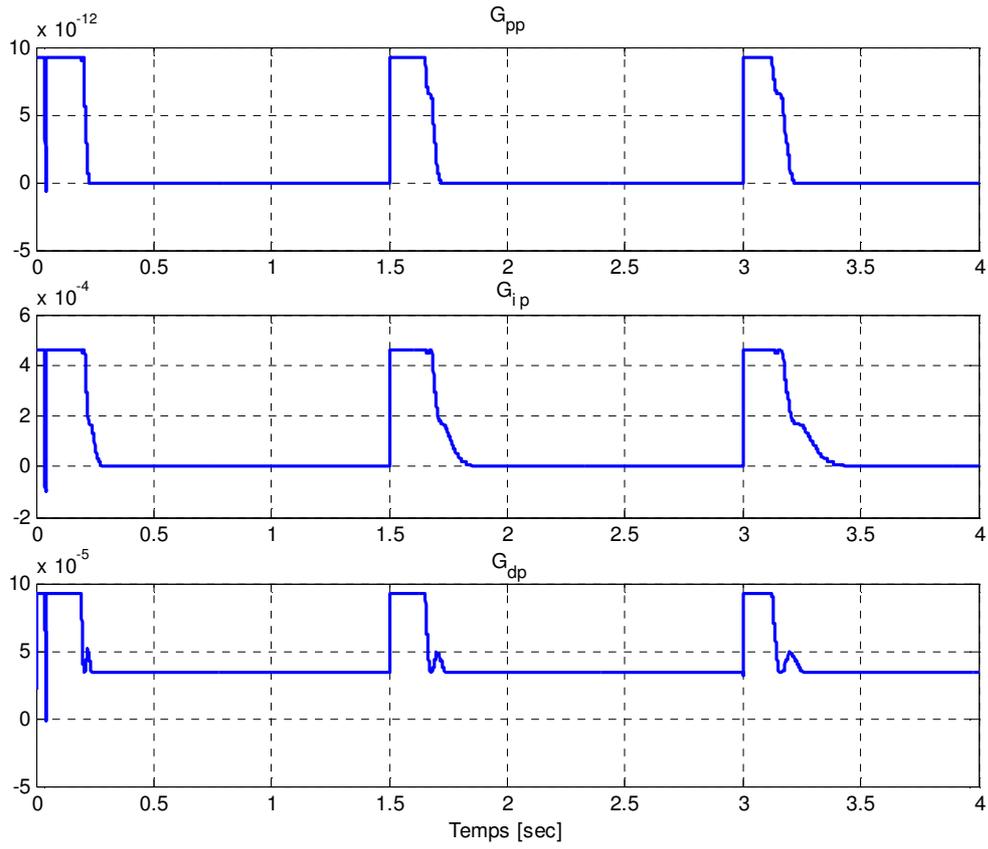


Figure 4.20 : gains d'adaptation pour la puissance active.

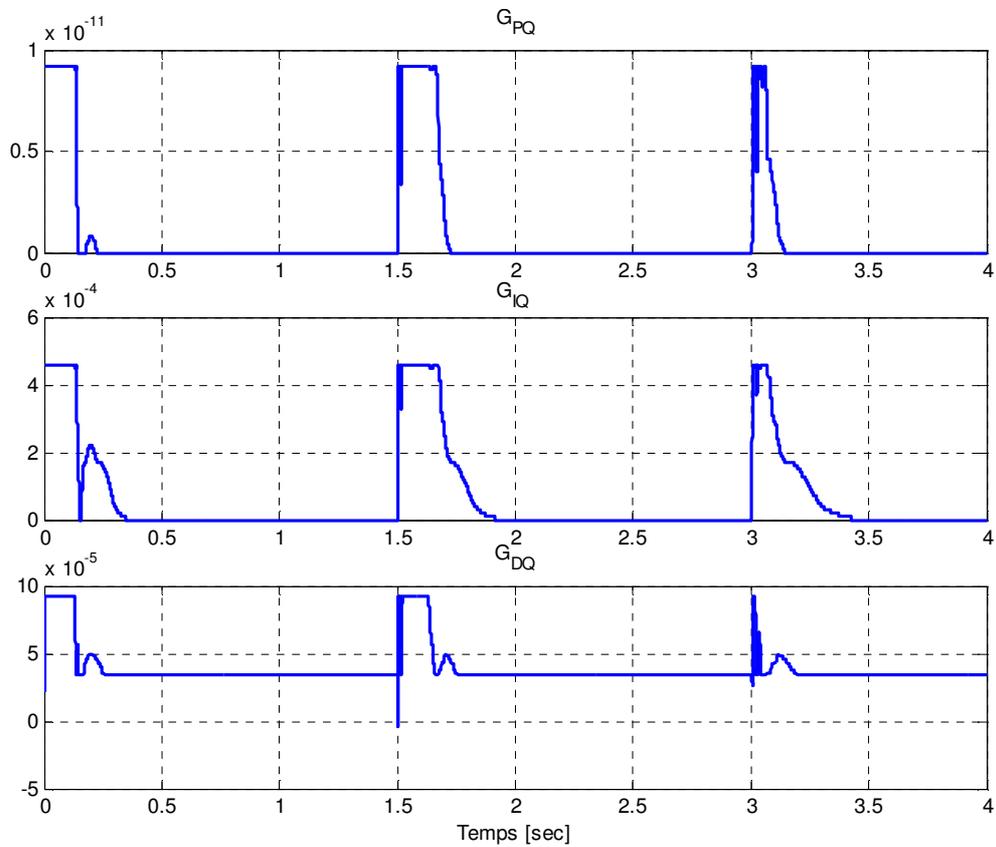


Figure 4.21 : gains d'adaptation pour la puissance réactive

- **XI.1.5 Interprétation et étude comparative**

- Régulateur PI

Les figures 4.10 et 4.11 donnent l'allure de la réponse de  $P_{mes}$  et de  $Q_{mes}$  face à des références imposées.

On observe bien la convergence des variables mesurés ( $P_{mes}$ ,  $Q_{mes}$ ) vers les variables de références ( $P_{réf}$ ,  $Q_{réf}$ ) avec un dépassement de 60 % et une dynamique de 0.57sec pour la puissance active, pour la puissance réactive on marque un dépassement de 7 % et un temp de réponse de 0.6 sec. De plus, on remarque que le découplage est affecté lors changement de consigne, ceci se traduit par un pic de puissance active et par une chute relative de puissance réactive.

- Régulateur RST

Pour la commande RST le comportement est simulé, avec les mêmes valeurs et les mêmes changements de référence que pour la commande par PI, figure 4.12 et la figure 4.13, on constate que les réponses obtenu sont amélioré par rapport aux celles obtenu par PI, la puissance réactive suit bien sa référence sans dépassement avec un temps de réponse de 0.4 sec, la poursuite de la référence de la puissance active est vérifiée avec un dépassement bien moindre 1.43 % et une dynamique de 0.35sec. On remarque aussi que le découplage entre les deux puissances est affecté.

- Régulateur PI FLOUE

Les résultats obtenus sont représentés par les figures 4.14 et 4.15, ces deux figures nous montrent la supériorité du régulateur PI flou où ces résultats sont plus performants que les commandes précédentes, les échelons de références des puissances active et réactive imposées à la MADA sont bien suivis sans dépassement et avec un temps de réponse très amélioré, 0.225sec pour puissance active et 0.35 sec pour la puissance réactive, de plus le couplage entre les deux puissances est très faible.

- Régulateur PID FLOUE ADAPTATIF

Les résultats de simulation obtenus, figures 4.14 et 4.15, montrent bien l'amélioration de la réponse dynamique des puissances active et réactive et sans dépassement pour la puissance réactive, les deux puissances atteindront leur références en un temps de réponse de 0.15 sec, donc c'est une réponse rapide et meilleur comparativement à celle obtenue par PI flou classique et par les deux autres régulateurs. De plus, le découplage n'est pas affecté et il persiste toujours, ce qui montre la robustesse de ce régulateur

Nous remarquons que lors de changement de consigne, les gains adaptatifs, figures 4.17, 4.18, 4.20 et 4.21, prend des valeurs importantes puis ils se restabilisent à leur valeurs précédentes tout au long du régime permanent, se qui montre que l'adaptation des gains assure la stabilité du système.

La figure 4.16 et 4.17 permettent de comparer les performances des différents régulateurs en simulation.

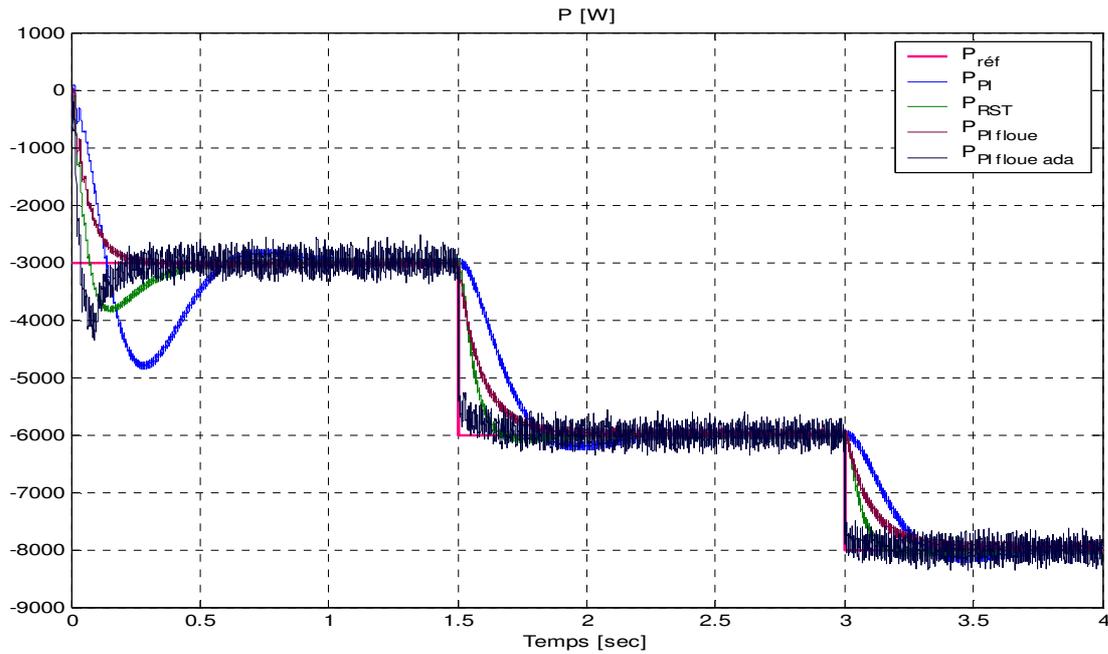


Figure 4.1622 : Allures de la puissance active, comparaison entre la commande par PI, RST et PI floue.

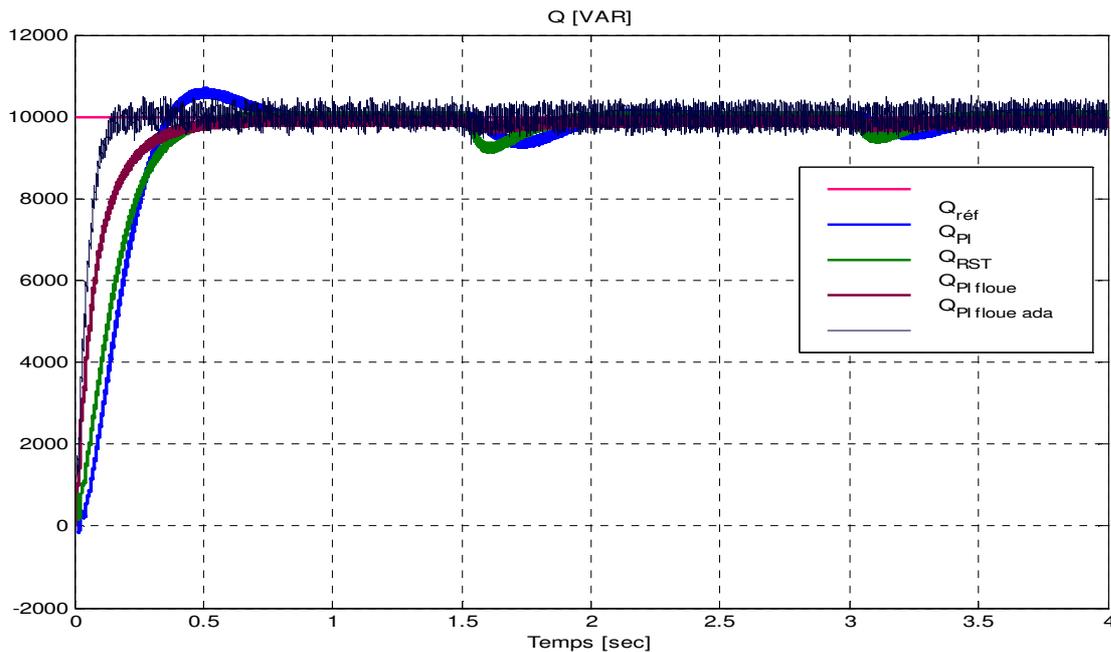


Figure 4.1723 : Allures de la puissance réactive, comparaison entre la commande par PI, RST et PI floue.

- **XI.2 Test de robustesse**

Cet essai permet de montrer l'effet de la variation de la résistance statorique et de tester les performances et la robustesse de la commande, Pour cela on a varié la résistance statorique de 80% de sa valeur nominale ( $R_s=R_s+0.8*R_s$ ). En effet les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. Toutefois, dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (échauffement des résistances, saturation des inductances ...).

Conditions de l'essai :

- La puissance active se maintient pratiquement constante et égale à  $-6000\text{W}$ .
- La puissance réactive de la machine aussi se maintient pratiquement constante et égale à  $10000\text{VAR}$
- à  $t = 1.5\text{ s}$ , on a augmenté la valeur de la résistance statorique de  $80\%$  de sa valeur nominal.

Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes :

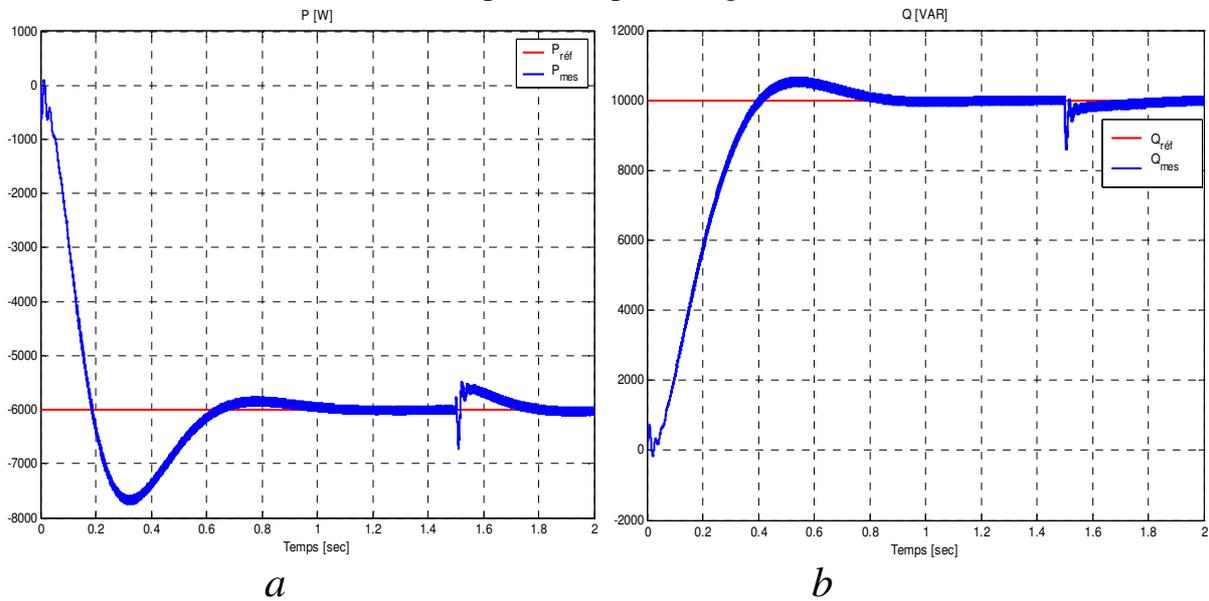


Figure 4.1824 : Résultat de simulation par PI pour une augmentation de  $80\%$  de  $R_s$

a. Allures de la puissance active.

b. Allures de la puissance réactive.

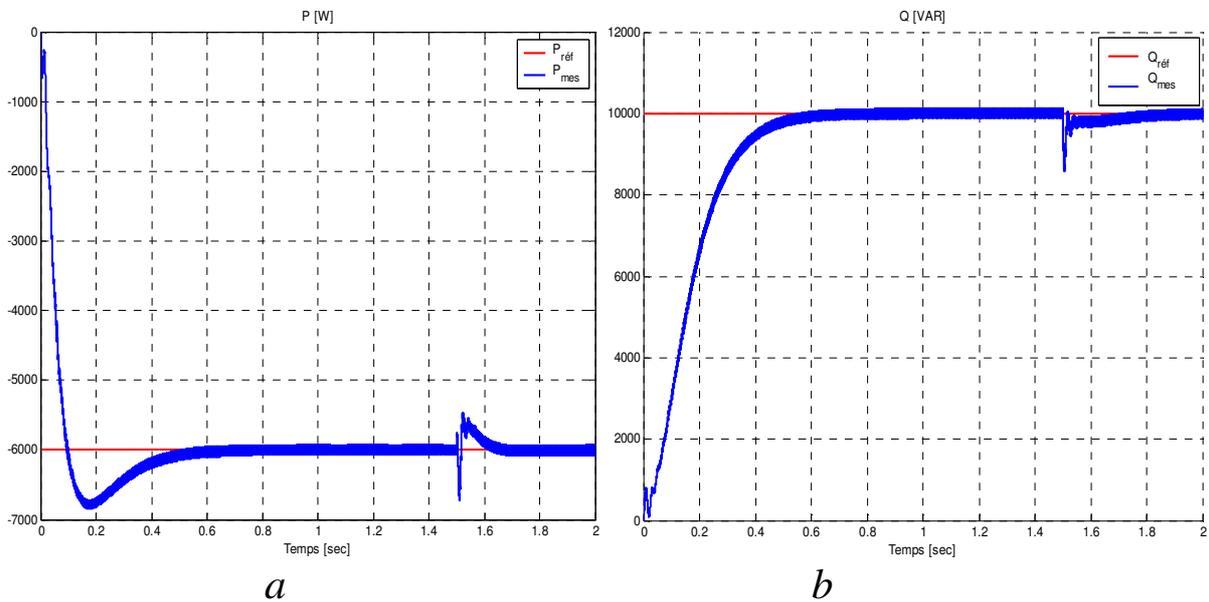


Figure 4.1925 : Résultat de simulation par RST pour une augmentation de  $80\%$  de  $R_s$

a. Allures de la puissance active.

b. Allures de la puissance réactive.

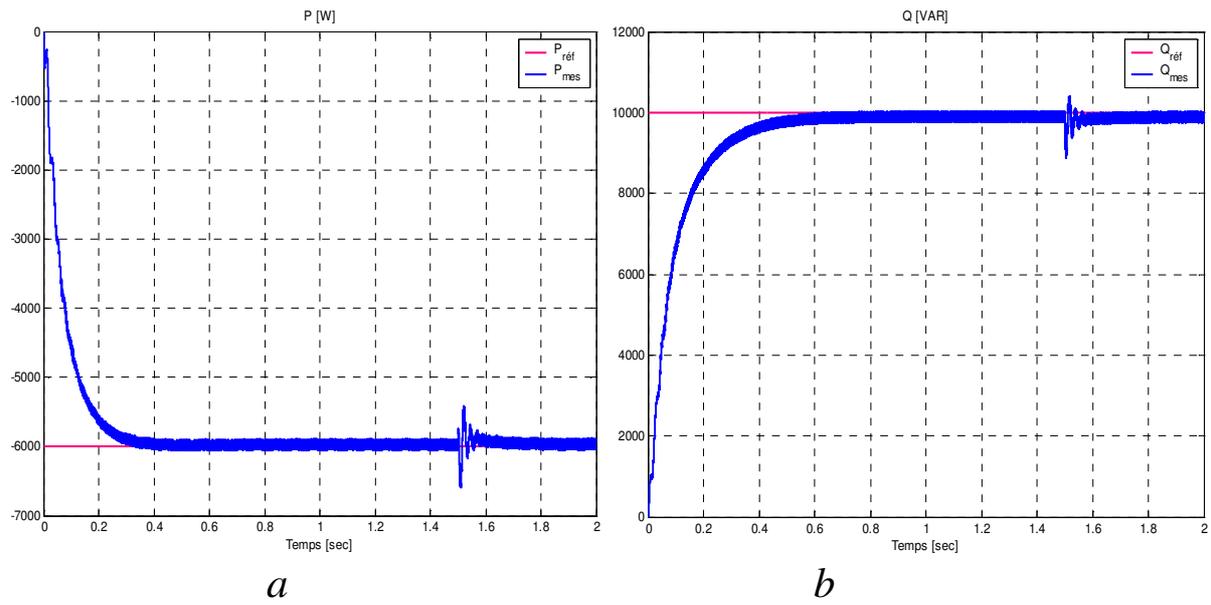


Figure 4.2026 : Résultat de simulation par PI floue pour une augmentation de 80% de  $R_s$

a. Allures de la puissance active.

b. Allures de la puissance réactive.

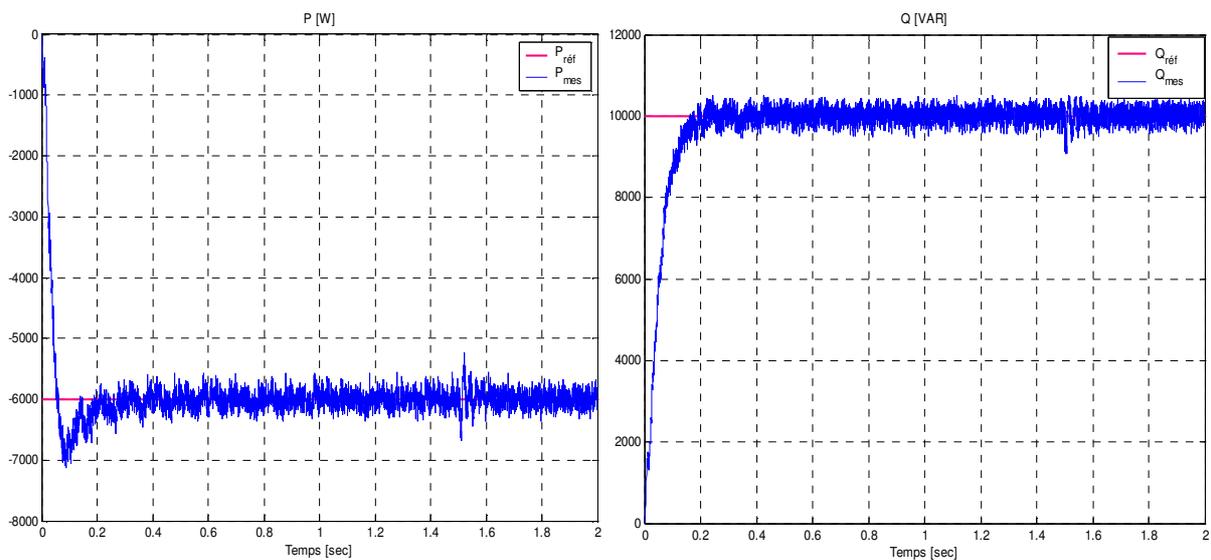


Figure 4.2027 : Résultat de simulation par PID floue adaptatif pour une augmentation de 80% de  $R_s$

a. Allures de la puissance active.

b. Allures de la puissance réactive.

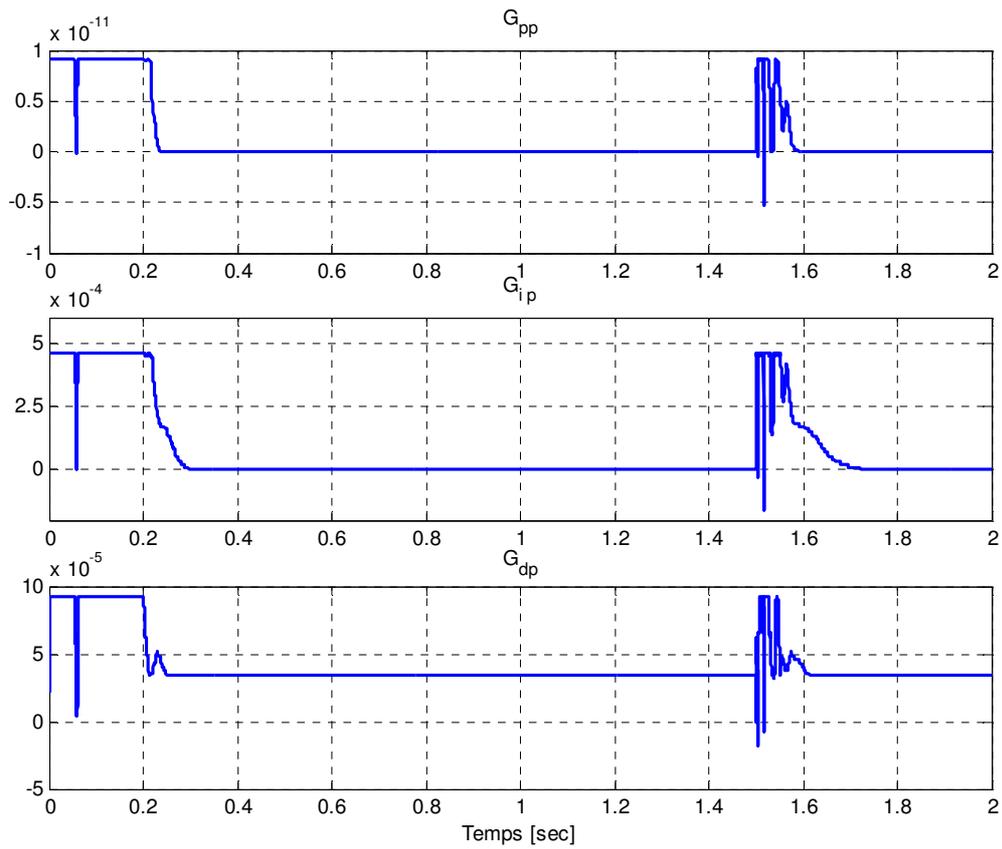


Figure 4.28 : gains d'adaptation pour la puissance active.

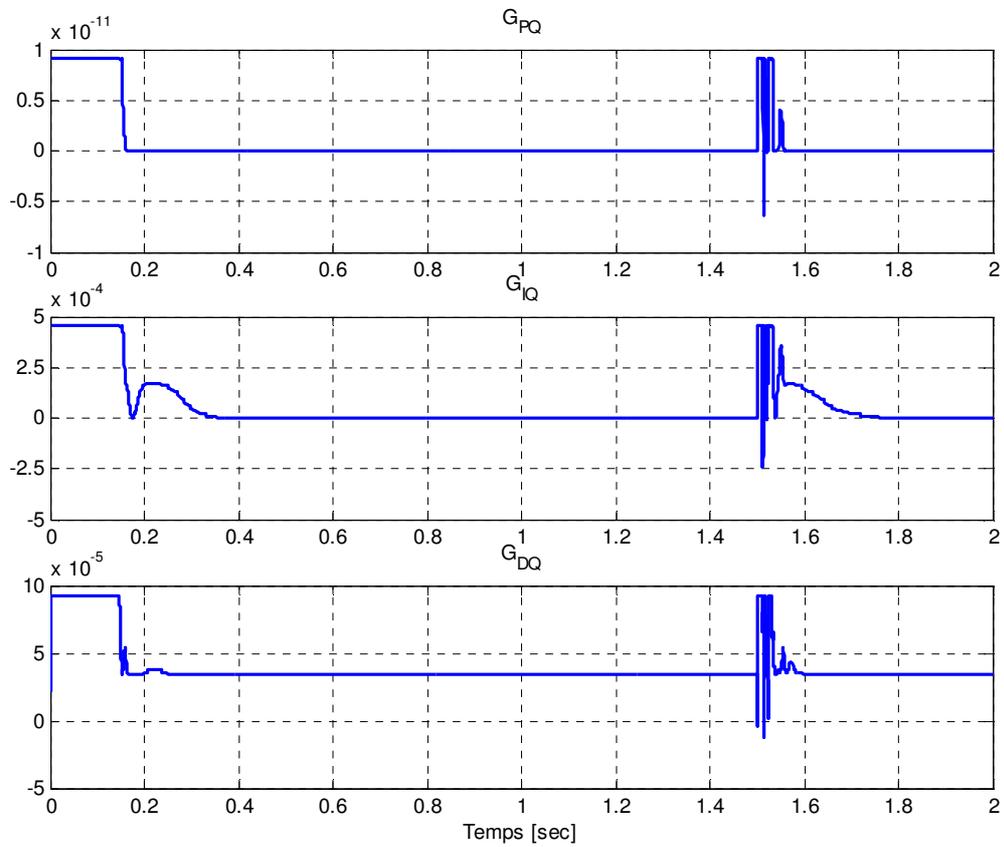


Figure 4.29 : gains d'adaptation pour la puissance active.

- **XI.2.1 Interprétation et étude comparative :**

Dans le but de tester la robustesse de chaque régulateur, à  $t=1.5s$  nous faisons une variation brusque de la résistance statorique à  $+80\%$  de sa valeur nominale. En conséquence, cette variation va induire une perturbation des puissances.

D'après ces résultats de simulation, on remarque principalement que la variation de la résistance statorique ne dégrade pas les performances de la méthode proposée et affecte peu le système, et ceci apparaît dans la bonne poursuite des puissances à des références imposées, ce qui montre la robustesse de la commande vectorielle face à cette variation.

La figure 4.24 nous permet de constater que le régulateur PI n'est pas parfaitement robuste vis-à-vis de la variation de la résistance statorique. Cependant, on voit bien l'influence de cette variation, en effet, on marque des oscillations des puissances avec une augmentation de la puissance active et un pic de puissance réactive de  $1500var$  à l'instant de l'augmentation de la résistance statorique. D'après la figure 4.25 nous en constatons qu'il y'a une similitude entre ces résultats et ceux obtenus par le PI avec la différence qu'avec le régulateur RST la stabilisation des puissances se fait rapidement par rapport au régulateur PI où les puissances prennent un certain temps pour qu'ils se stabilisent

La figure 4.26 montre les résultats de simulation à base d'un contrôleur flou vis-à-vis la variation de la résistance statorique, on remarque qu'à l'instant de l'augmentation de la résistance une apparition des petites oscillations des puissances et qui se stabilisent rapidement, ce qui implique la robustesse de ce régulateur.

D'après la figure 4.27 Nous remarquons clairement que cette variation paramétrique n'a pas affecté le contrôle des puissances et ne provoque aucun effet indésirable, ce qui prouve que le régulateur flou adaptatif présente une forte robustesse vis à vis cette variation, de plus il apparaît dans les figures des gains d'adaptations, figure 4.28 et 4.29, que ces derniers s'adaptent lors de la variation de la résistance et assurent la stabilité des puissances

Par conclusion le flou adaptatif présente des résultats très satisfaisants, une bonne dynamique, le découplage entre les deux puissances est réalisé, ce qui implique l'efficacité et la robustesse de ce régulateur même avec la variation de la résistance statorique.

Une comparaison entre les résultats obtenus par les trois régulateurs a montré la supériorité et l'efficacité du régulateur PI flou où il permet d'avoir une bonne robustesse vis-à-vis de la variation paramétrique (résistance statorique), comme illustré par les figures suivantes :

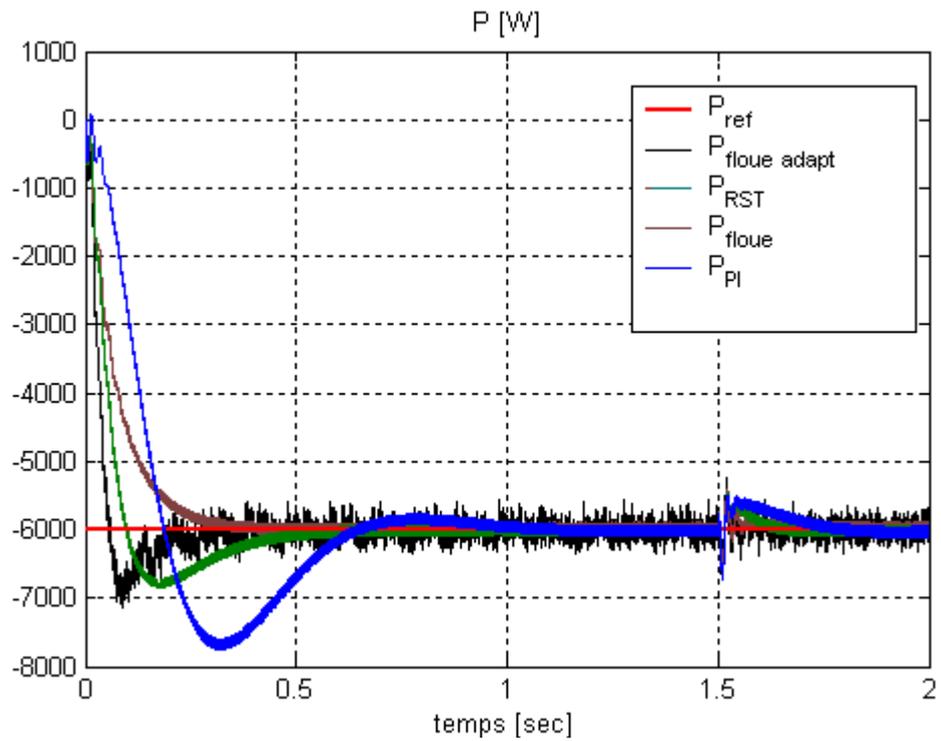


Figure 4.30 : Allures de la puissance active, comparaison entre la commande par PI, RST et PI floque lors d'une variation de 40% de la valeur de résistance  $R_s$

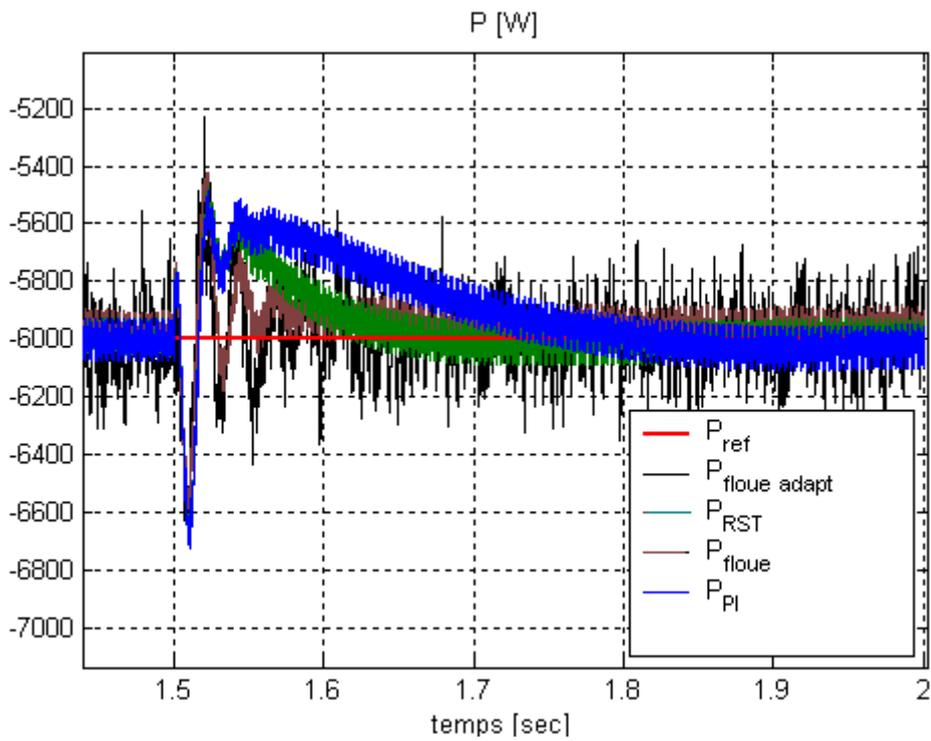


Figure 4.31 : agrandissement de la figure 4.30

## **XII- Conclusion**

Ce chapitre nous à permis d'établir quatre approches de commande pour la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en génératrice. La première a été réalisée par le régulateur PI, la seconde par un régulateur polynomial RST, la troisième par un régulateur flou et la quatrième par un régulateur flou adaptatif. Le but de ces régulateurs est de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

En effet la différence entre les trois régulateurs est peu significative en ce qui concerne le suivi de consigne, Mais en termes de rapidité et robustesse on a vu la supériorité du régulateur flou adaptatif avec ses résultats qui sont plus performants et très concluants que les commandes précédentes.

# Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans cette thèse a essentiellement porté sur l'étude de deux modes de fonctionnement des machines asynchrones utilisées dans les systèmes éolien.

Ce travail a été focalisé beaucoup plus sur les aspects machine asynchrone, en fonctionnement générateur, et leur commande pour d'éventuelles utilisations pour un site isolé et pour une connexion sur un réseau.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un survol sur les systèmes éoliens a été donné avec une présentation des principes fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Différentes associations machine convertisseur de puissance ont été présentés.

Le deuxième chapitre consiste à établir un bilan des performances et des limites d'utilisation de la machine asynchrone auto-excité. La magnétisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil lui est fournie par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage, le fonctionnement correct de cette génératrice oblige la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine (par une inductance magnétisante variable en fonction du courant) magnétisant. En suite on a montré par des simulations l'influence des grandeurs statoriques par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la machine.

La troisième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude et à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable. Où il est présenté une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statorique.

La dernière partie met en œuvre la commande vectorielle basée sur quatre régulateurs de philosophie différente (Proportionnel Intégral utilisé comme référence, régulateur RST, régulateur flou et le régulateur flou adaptatif ) afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la machine et le réseau. Ces régulateurs sont testés et comparés afin d'analyser leurs performances.

Nous espérons et projetons comme perspective :

- . Etudier la MADA associée à d'autres stratégies de commande
- . Utiliser d'autres types de convertisseurs de fréquence, tel que les cycloconvertisseurs et les convertisseurs matriciels adaptés aux grandes puissances.

- Etudier un système comportant une ferme d'éoliennes.
- La réalisation d'une plateforme expérimentale permettant d'expérimenter en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur un réseau alternatif et par la même valider les résultats de simulation présentés dans cette thèse.

## Bibliographie

- [1] A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [2] A. Boyette, "Contrôle – Commande d'un Générateur Asynchrone avec un Système de Stockage pour la production Eolienne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006
- [3] A. ABDELLI, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, Soutenue le 15 octobre 2007
- [4] Alain Damien, La biomasse énergie, définition ressources, usage
- [5] A. Bellamoudi, "étude et simulation d'un système de conversion d'énergie électrique à base d'une machine asynchrone", Thèse de Magister, Université de Batna, 1996.
- [6] A. Kishore, R.C. Prasad, MATLAB SIMULINK Based Modeling and Dynamic Characteristics of Three Phase Self Excited Induction Generator, Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006, Cambridge, USA, March 26-29
- [7] A. Dendouga, "Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par onduleur de tension," Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 2004
- [8] A. Doria-Cerezo, "Modeling, Simulation and Control of a Doubly-Fed Induction Machine Controlled by a Back-to-Back Converter", PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, 2006.
- [9] B. Multon, O. Gergaud, H. Benahmed, Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques, pp.1–12, Mai 2002
- [10] B. Multon, "Les Aérogénérateurs Electrique" Lésir Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieur de Cachan 2004.
- [11] Bent. Sorensen, "Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", Roskilde University Energy & Environment Group, Institute 2, University tsvej 1, P. O. Box 260 DK-4000 Roskilde, Denmark
- [12] C. Benoudjit « Etude pour la conception d'un banc d'essais pour " énergie éolienne ",

- mémoire de magistère de l'université de Batna, juin 2004
- [13] Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone, Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 51 – 54.
- [14] Chaîne de K. Idjdarene, D. Rekioua et D. Aouzellag, "Modélisation et Simulation d'une Conversion à Energie Eolienne Basée sur une Générateur Asynchrone en Fonctionnement Autonome", 3rd Conference on Electrical Engineering 04 - 06 October 2004, pp 297 -300
- [15] C. Apstoia Member, IEEE, "MATLAB-Simulink Model of a Stand-Alone Induction Generator", Purdue University Calumet-USA.
- [16] C. Saget, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne ", REE, n° 7, Juillet 1998, pp. 42-48.
- [17] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [18] D. Grenier, F. Labrique, H. Buyse, E. Matagne, "Electromécanique, convertisseurs d'énergie et actionneurs," Editions Duond, Paris, 2001
- [19] D. Seyoum, C. Grantham, and M.F. Rahman, "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", IEEE Transactions on industry application, vol. 39, no. 4, July/August 2003.
- [20] Debiprasad P., Benedict E. L. Venkataramanan G. and Lipo T. A. "A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine", Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, 30 Sept.-4Oct. 2001, pp. 1695-1702.
- [21] E. De Vries," Wind turbines technology trends", Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003.
- [22] E. S. Abdin, W. Xu,"Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE Trans. on Energy conversion, vol.15, No1, March 2000.
- [23] F. Poitiers, "Etude et Commande de Générateurs Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [24] Fonctionnement d'un générateur asynchrone, <http://www.eole.org/SitIngF.htm>.
- [25] G.Sturtzer, E.Smigiel, «Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés. » Ellipses Edition Marketing Paris, 2000.
- [26] G. Salloum, "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [27] GHOSN R *Contrôle Vectoriel de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné à Double Alimentation* Thèse de Doctorat – ENSEEIHT – Institut National Polytechnique de Toulouse Octobre 2001.

- [28] H.Camblong, "minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2003.
- [29] H. Godfroid, A. Mirzaian, D. Ramuz, "Machine Synchrone pour Procédés exigeants", Revue Internationale de Génie Electrique, Volume 1, n° 1, 1998, pp. 9-35.
- [30] Jean Chatelain, Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [31] Jean-Claude SABONNADIÈRE, Nouvelles technologies de l'énergie 3, géothermie & énergie de la biomasse, 1ère édition
- [32] Etude réalisée par EUR observer Le journal éolien, série N°12- février 2013
- [33] J-P.Caron, J-P.Hautier, «Modélisation et commande de la machine asynchrone. » Edition TECHNIP, Paris 1995.
- [34] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [35] K. M. Nachida, " Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Thèse de doctorat, université abou bekr belkaid de Tlemcen, 2006
- [36] K. Kouzi, "Commande Vectorielle d'un Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI-Flou à Gains-Flous Adaptés Associé à un Observateur d'Etat par Mode de Glissement", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [37] L. Khettache, Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée, mémoire de magistère de l'université de Batna, 2007
- [38] L.LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat de Université des sciences et technologies de Lille 1, le 14 décembre 2004
- [39] la terre et l'univers encyclopédie ÉDITEUR : TRADEXIM SA-Genève.
- [40] L. Moreau, "Modélisation, Conception et Commande de Génératrice à Réductances Variable à Besse Vitesse", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 9 Décembre 2005.
- [41] L.Baghli, « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Flou, des réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques. » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier99.
- [42] L.Baghli,«Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone.» Cours de commande IUFM de LorraineUHP, 03/04.
- [43] M. Djurovic, G. Joksimovic, R. SaveljiC, I Marieic, "Double Fed Induction Generator with Two Pair of Poles", Elektrotehniklu fakultet Podgorica, Sever Subotica, Yugoslavia
- [44] M. IVAN, "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance",

- Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM)
- [45] M. Lajoie-Mazenc, P. Viarouge, "Alimentation des Machines Synchrones", Techniques de l'Ingénieur, D 3 630.
  - [46] Mukund R. Patel, Ph.D., P.E, "Wind ind and Solar Power Systems". U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
  - [47] M.Boussak, « Commande Numérique Vectorielle des Machine Asynchrone Triphasées. » école supérieur d'ingénieurs de Marseille, Version 2.1, Août 1994.
  - [48] M. S. Abdoulaziz, Etude de générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, ENP, Alger.
  - [49] M. L. Elhafyani, S. Zouggar, Permanent and Dynamic Behaviours of Self-excited Induction Generator In balanced mode, journal Volume7, number 1, 1 January 2006, e Université Mohammed 1<sup>er</sup> Morocco.
  - [50] N. Laverdure, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, le 9 décembre 2005
  - [51] N. Naït –Saïd, "Contribution à l'identification et à la commande de la machine à induction", Thèse de Doctorat, Université de Batna, juin 2003.
  - [52] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau," Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
  - [53] Oceans of opportunity - harnessing europe's largest domestic energy resource - eole0906 ÉDITEUR : European Wind Energy Association - EWEA DATE ÉDITION : 1/09/09
  - [54] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
  - [55] P. Terrier, TCH-090-095, " projet technologique étude d'une éolienne" Montréal, le 14 août 2006.
  - [56] P. Terrier, "Étude d'une éolienne", Ecole de l'université supérieure, Université de Québec
  - [57] P. E. Vidal, "Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
  - [58] R.Abdessemed, M.Kadjoudj, «Modélisation des Machines Electriques. » Presses de l'Université de Batna 1997
  - [59] R. Mukand Patel, " Wind and solar power systems", CRC Press, 1999.
  - [60] RAMUZ D Machine Généralisée Alimentée par Deux Convertisseurs, Thèse de Doctorat UFR des Sciences Techniques et Gestion de l'Industrie Université de Franche Comté Mai 2000.

- [61] R. Hubert, "La Machine à Induction : Commande et Défaillance", Habilitation à Diriger des Recherches en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2000.
- [62] S. El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologie d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension ", Thèse de doctorat, Université de Lille
- [63] Sébastien quazola, "Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économique et application photovoltaïque bas cout", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003.
- [64] S. Drid, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie et Expérimentation", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [65] S. K. El Khil, commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA), Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2006
- [66] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [67] T.Abdelmounaim "An Approach for the Modeling of an Autonomous Induction Generator Taking Into Account the Saturation Effect" International Journal of Emerging Electric Power Systems Volume 4, Issue 1 2005 Article 1052
- [68] T. Boutabba « commande vectorielle de la machine asynchrone par régulateur RST » mémoire d'ingénieur université Batna 2004.
- [69] V. ROGEZ, "Modélisation simplifiée 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, UNIVERSITE D'ARTOIS de Lille, 17 décembre 2004
- [70] Wang, L and Su, J. Y., "Dynamic performances of an isolated self-excited induction generator under various loading conditions" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, March 1999, pp. 93-100.
- [71] 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.
- [72] Y.Kumsuwan, W.Srirattanawichaikul "Matlab/Simulink Modeling of selfexcited induction generator" Journal University of technology Ianna Tak, Thailand.
- [73] ZEBIRI. F, "commande non linéaire d'un onduleur à trois niveaux", Mémoire de Magister, université des sciences et de la technologie d'Oran, juin 2011.
- [74] Z.A. Saghafinia and H. Wooi Ping, "High Performance Induction Motor Drive Using Fuzzy Self-Tuning Hybrid Fuzzy Controller", IEEE international conference on power and energy (PEC on 2010), Nov29-Dec 1, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia
- [75] Z.K. Kouzi', L. Mokrani , M-S. NaYt-SaYd, "A New Design of Fuzzy Logic Controller with Fuzzy Adapted Gains Based on Indirect Vector Control for Induction Motor Drive", IEEE 2003

- [73] <http://www.membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole/Eole.html>
- [74] <http://www.parc-eolien.com/>
- [75] <http://www.energies-environnement.fr/energies/energie-eolienne/les-avantages-de-l-energie-eolienne>
- [76] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3381>
- [77] [www.apgc.fr/géothermie](http://www.apgc.fr/géothermie)
- [78] [www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org)
- [79] [www.windturbinesnow.com](http://www.windturbinesnow.com)
- [80] "Introduction à la Logique Floue", Document d'Internet, Disponible à : [www.tn.refer.org](http://www.tn.refer.org)
- [81] "Pour y Voir Plus Clair ... dans la Logique Floue !", Document d'Internet, Disponible à : <http://perso.club-internet.fr/bmantel/pages/logfloue/logfloue01.html>

## ANNEXE A

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

Tableau A.1: Caractéristiques des sites et stations

## I- ATLAS PRELIMINAIRE DU VENT A 10 METRES

En figure 2, est présentée la carte des vitesses moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres au-dessus du sol. Les vitesses obtenues à l'aide de l'interpolation varient de 1 à 6 m/s.

Si on veut définir des classes, suivant leur importance dans la figure, on distingue quatre classes, à savoir :

$V < 3.0$ m/s	classe 1
$3.0 < V < 4.0$ m/s	classe 2
$4.0 < V < 5.0$ m/s	classe 3
$5.0 < V$	classe 4

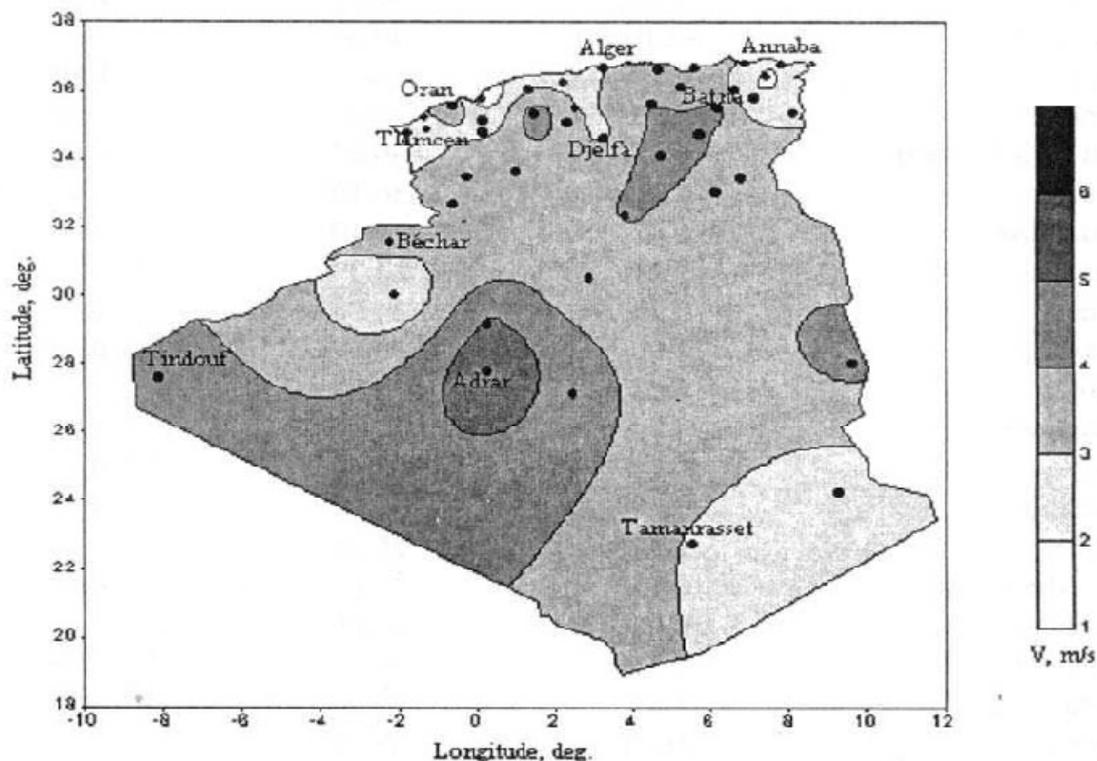


Figure A.1: Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude

On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoun).

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Amenas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni Abbès présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles ( $< 3$  m/s).

### I-1 Potentiel utile

Au vu de la carte des vents donnée en figure 2, les sites susceptibles d'être exploités à des fins énergétiques, sont rares. En effet, bien que cela varie en fonction des types d'éoliennes, il faut un minimum de vent pour que cette dernière se mette à tourner.

La vitesse d'amorçage se situe généralement autour de 4.5 m/s. Toutefois, les éoliennes sont généralement installées à des hauteurs supérieures ou égales à 25 mètres du sol. C'est pour cela qu'une étude permettant la détermination de la carte des vents de l'Algérie à 25 mètres a été établie.

## II- ATLAS PRELIMINAIRE DU VENT A 25 METRES

Les vitesses du vent, dont la rugosité du lieu est disponible, ont été extrapolées de la hauteur de 10 mètres à une altitude de 25 mètres, les vitesses du vent obtenues, varient 1.5 et 7 m/s. En figure 3, est représentée la carte des vents de l'Algérie à 25 mètres du sol.

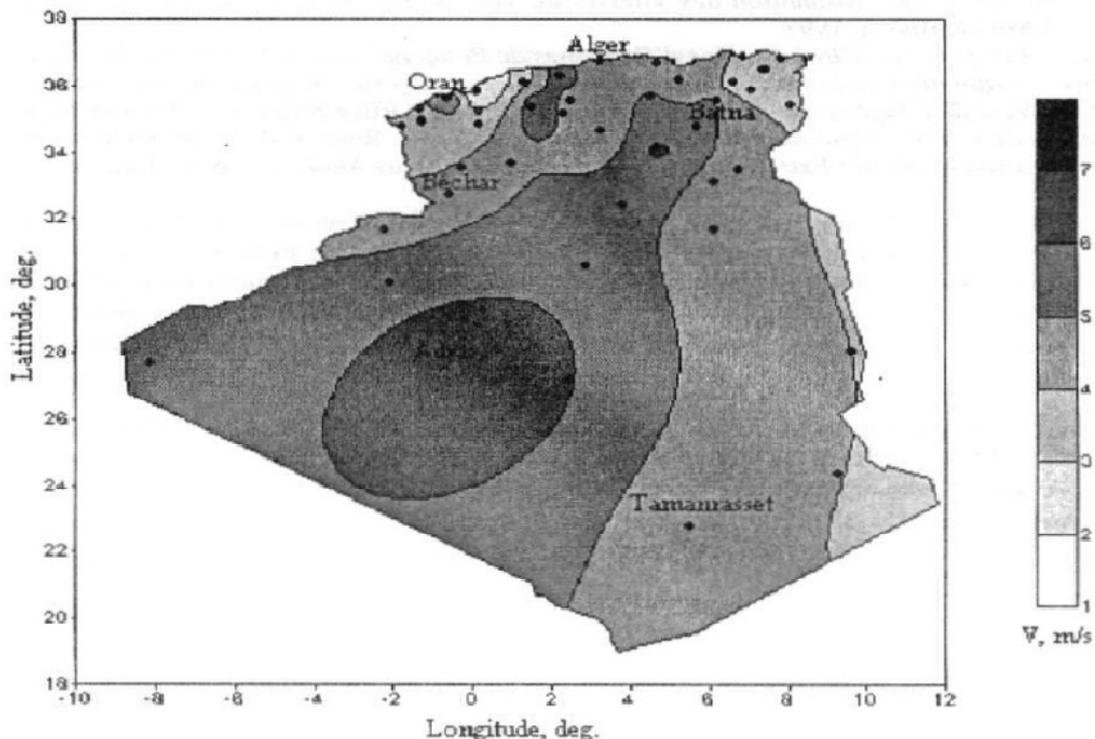


Figure A.2: Tracé de la carte des vents à 25 mètres d'altitude

La prédominance de la quatrième classe, ( $V \Rightarrow 5$  m/s), telle que définie précédemment se voit nettement sur la figure.

On remarque au centre du Sahara de l'Algérie une ellipse entourant les sites d'Adrar, In Salah et Timimoun, où les vitesses enregistrées sont supérieures ou égales à 6 m/s. Cette ellipse est entourée par une large bande, qui domine le territoire, englobant l'essentiel du sud du pays et en particulier les régions de Ghardaïa, Biskra et Tindouf. Par ailleurs, on distingue un couloir présentant des vitesses variant de 4 à 5 m/s, allant de Tamarrasset jusqu'à Béchar en passant par la côte d'Alger. Enfin, on remarque, un micro climat, où la vitesse est supérieure à 5 m/s, autour de la région de Tيارت et s'étirant jusqu'à Ténès.

### II-2 Potentiel utile

Au vu de la carte des vents, tracée à l'altitude de 25 mètres du sol, il est clair que les possibilités d'utilisation du vent à des fins énergétiques deviennent prometteuses.

En enfer, plus de 80 % du territoire national bénéficie d'une vitesse du vent supérieure ou égale à 4 m/s, vitesse moyenne à partir de laquelle une éolienne démarre. Toutefois ceci reste valable pour de petites applications nécessitant de faibles puissances. La région d'Adrar offre bien sûr de plus grandes possibilités.

## CONCLUSION

En conclusion, les cartes de la vitesse du vent établies, permettent l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne.

Pour qu'un site soit jugé exploitable avec une petite éolienne, il faut disposer au minimum d'une vitesse de l'ordre de 6 m/s. En Algérie, il est clair que ceci devient possible, lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 25 mètres.

Toutefois, une fois les zones ventées identifiées, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Par ailleurs, étant donné que généralement les différentes mesures prélevées, se font à 10 mètres du sol et que les formules empiriques d'extrapolations ont été établies pour des climats différents du notre, une étude expérimentale détaillée, doit être établie pour la correction de ces dernières.

## ANNEXE B

Les sous-systèmes des différents blocs développés sous Matlab pour la simulation de l'autoamorçage

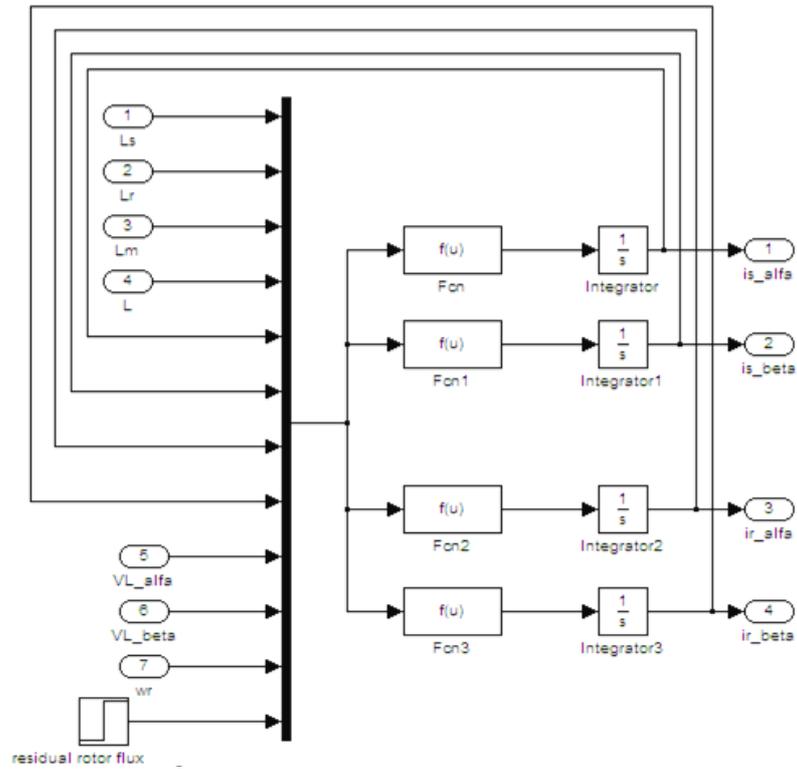


Figure B.1 : blocs sous-système des courants statoriques et rotoriques

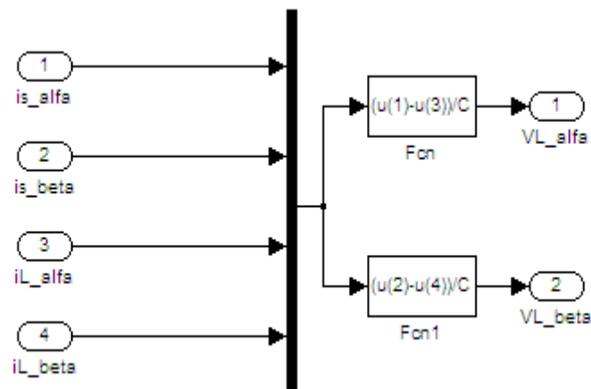


Figure B.2 : blocs sous-système des tensions de charge.

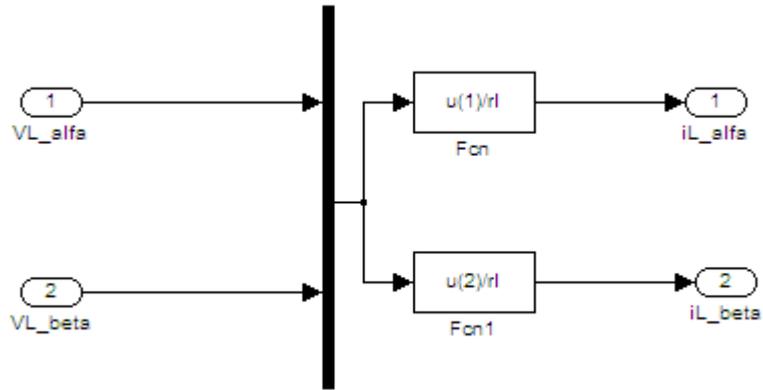


Figure B.3 : blocs sous-système des courants de charge

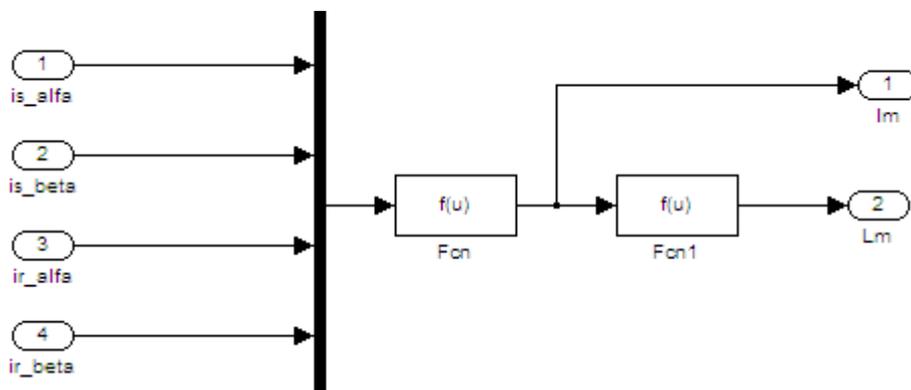


Figure B.4 : blocs sous-système du courant magnétisant et de l'inductance magnétisante.

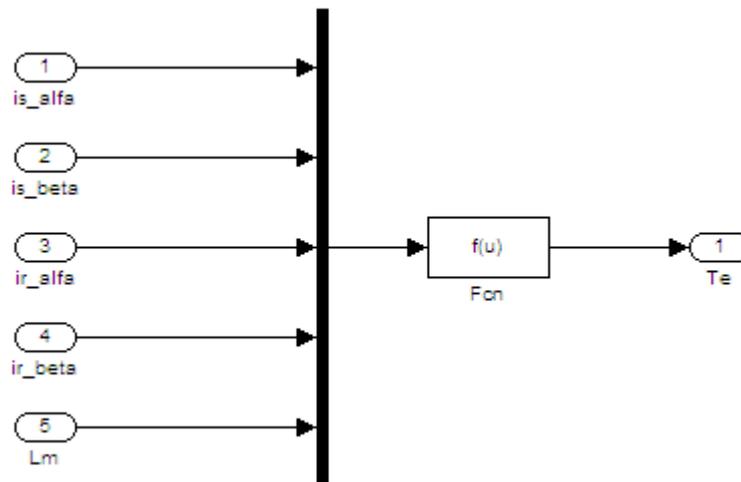


Figure B.5 : blocs sous-système du couple électromagnétique.

**ANNEXE C****C.1 Données de la machine à induction (autoexcitée)**

Valeurs nominales : 4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A, 1440 rpm

$R_s$  (Résistance de phase statorique) = 1.2  $\Omega$

$R_r$  (Résistance de phase rotorique) = 1.8  $\Omega$

$L_s$  (Inductance cyclique statorique) = 0.1554 H

$L_r$  (Inductance cyclique rotorique) = 0.1568 H

$L_m$  (Inductance mutuelle) = 0.15 H

$P$  (nombre de paire de pôles) = 2

Constantes mécaniques:

$J$  (Inertie du rotor) = 2 kg /m<sup>2</sup>

$f$  (Coefficient de frottement) = 0 I.S.

Valeurs nominales : 4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A, 1440 rp

**C.2 Données de la machine à induction (double alimentée)**

$P_n=4$  kW.

$V_s=400$  V

$V_r=130$  V

$f_n= 50$ H.

$R_s$  (Résistance de phase statorique) = 1.374  $\Omega$

$R_r$  (Résistance de phase rotorique) = 0.100  $\Omega$

$L_s$  (Inductance cyclique statorique) = 0.2241 H

$L_r$  (Inductance cyclique rotorique) = 0.0287 H

$M$  (Inductance mutuelle) = 0.074 H

$P$  (nombre de paire de pôles) = 2

Constantes mécaniques:

$J$  (Inertie du rotor) = 0.01862 kg /m<sup>2</sup>

$f$  (Coefficient de frottement) = 0.014 N.m.s/rd.

**C.3 Paramètres utilisés pour la modélisation de la turbine :**

La turbine éolienne est de 1.5MW.

$\rho$  : est la densité de l'air =1.225 kg/ m<sup>3</sup>

$\beta$  est l'angle de calage des pales en degrés et  $\lambda$ , Le ratio de vitesse. Pour  $\beta = 0$  nous avons  $C_p = C_{pmax} = 0.41$  et  $\lambda = \lambda_{nom} = 8$ , comme il est montré sur la figure suivante :

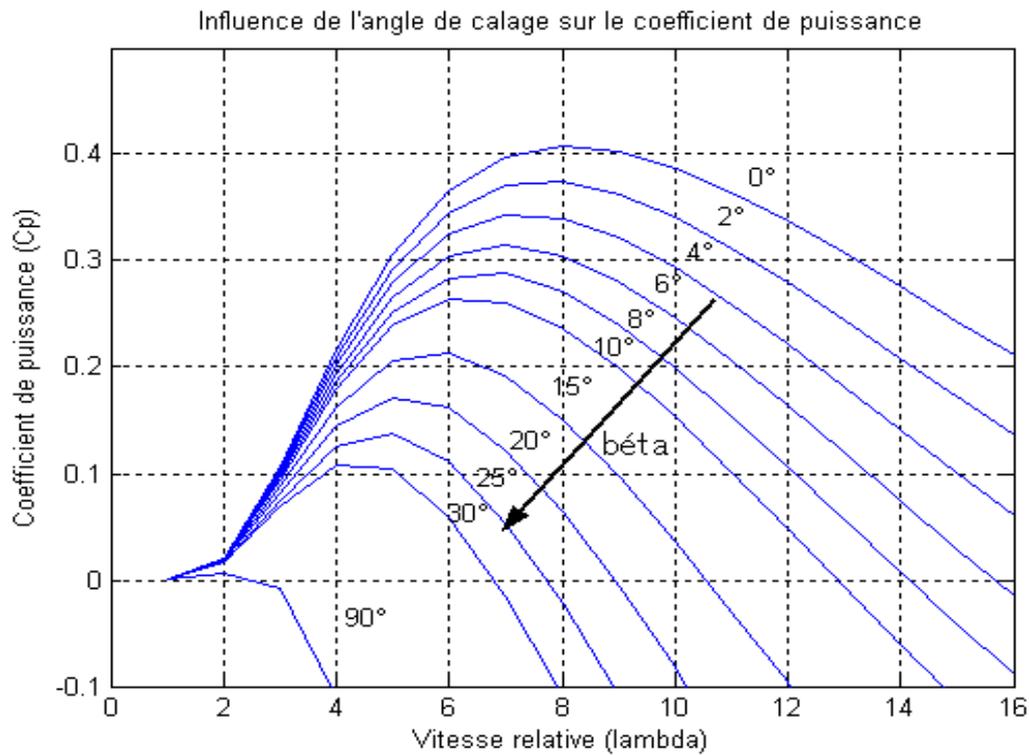


Figure C.1 : influence de l'angle  $\beta$  sur le coefficient  $C_p$

$G=90$  Gain du multiplicateur de vitesse.

$R=35.25$  (m) Rayon de l'éolienne, avec une masse de 6.5 tonnes [9].

$J=1000$  Inertie de l'arbre ( $\text{kg/m}^2$ ).

#### C.4 Calcule des régulateurs :

##### C.4.1 Coefficient des régulateurs PI :

$$\begin{cases} K_p = 23 \cdot 10^{-4} \\ K_i = 53.5 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

##### C.4.2 Polynômes du régulateur RST :

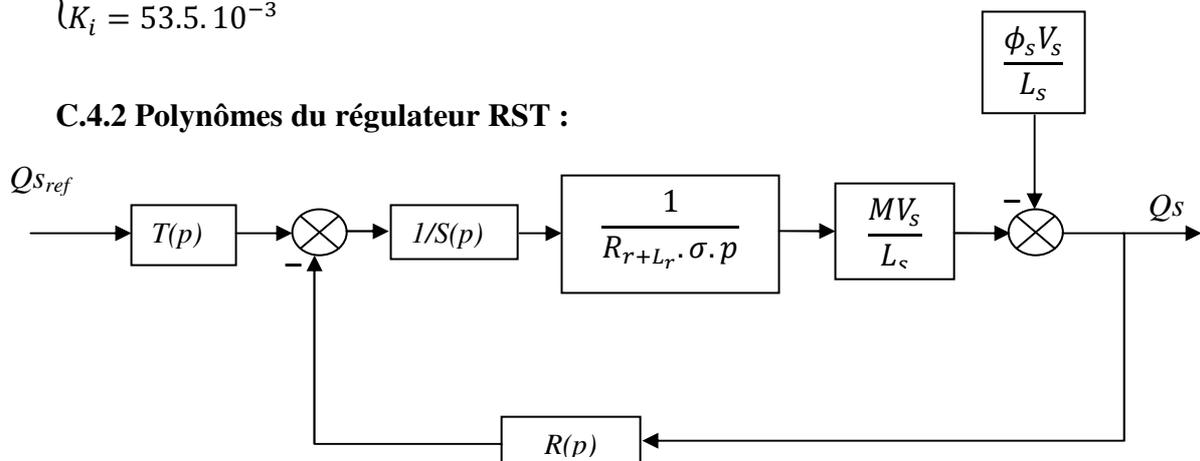


Figure C.2 : Structure RST pour la puissance réactive

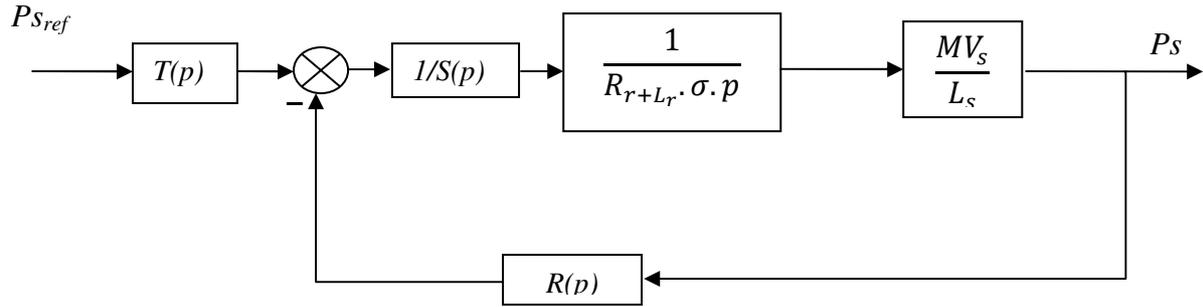


Figure C.3 : Structure RST pour la puissance active

$$A_{pq}(p) = a_{pq0} \cdot p + a_{pq1} = L_r \cdot \sigma \cdot p + R_r$$

$$a_{pq0} = L_r \cdot \sigma$$

$$a_{pq1} = R_r$$

$$B_{pq}(p) = b_{pq} = \frac{-M \cdot V_s}{L_s}$$

$$\begin{bmatrix} a_{pq0} & 0 & 0 & 0 \\ a_{pq1} & a_{pq0} & 0 & 0 \\ 0 & a_{pq1} & b_{pq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{pq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_{pq0} \\ s_{pq1} \\ r_{pq0} \\ r_{pq1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{pq0} \\ d_{pq1} \\ d_{pq2} \\ d_{pq3} \end{bmatrix}$$

$$D_{pq}(p) = (p + 16) \cdot (p + 281.7 + j281.7) \cdot (p + 281.7 - j281.7)$$

$$D_{pq}(P) = p^3 + 57.94 * 10 p^2 + 1677.2 * 10^2 p + 2539.36 * 10^3$$

$$D_{pq}(P) = d_{pq3} p^3 + d_{pq2} p^2 + d_{pq1} p + d_{pq0}$$

$$a_{pq0} = 0.0043$$

$$a_{pq1} = 0.1$$

$$b_{pq} = -132$$

$$\begin{bmatrix} s_{pq0} \\ s_{pq1} \\ r_{pq0} \\ r_{pq1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{pq0} & 0 & 0 & 0 \\ a_{pq1} & a_{pq0} & 0 & 0 \\ 0 & a_{pq1} & b_{pq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{pq} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} d_{pq0} \\ d_{pq1} \\ d_{pq2} \\ d_{pq3} \end{bmatrix}$$

$$S_{pq}(p) = s_{pq0} \cdot p^2 + s_{pq1} \cdot p$$

$$S_{pq}(p) = 2.3 * 10^2 \cdot p^2 + 195.38 * 10^3 p$$

$$R_{pq}(p) = r_{pq0} \cdot p + r_{pq1}$$

$$R_{pq}(p) = -23.3 * 10^2 p - 360.7 * 10^3$$

$$T_{pq}(p) = -360.7 * 10^3$$

### C.4.3 paramètres du régulateur PI flou

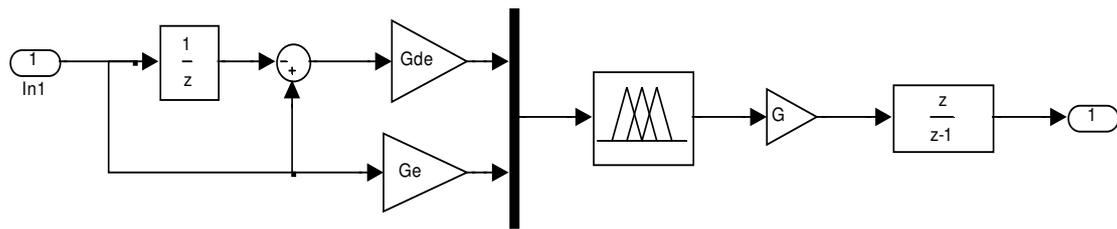


Figure C.4 : Structure de la commande floue.

Gain de l'erreur = 0.002

Gain de la dérivée de l'erreur = 0.1265

Le gain = 12.

## Résumé

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer, c'est un élément crucial pour tout développement socio-économique, c'est pour cela que la production de l'énergie est importante.

Dans le courant du siècle dernier, à cause de l'industrialisation massive et à cause de l'augmentation des besoins énergétiques de la population, la consommation d'énergie a considérablement augmenté qui fait réduire les réserves en énergie fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, c'est la raison pour laquelle il est intéressant de pouvoir trouver des solutions alternatives aux énergies fossiles afin d'en produire toujours plus de manière plus propre et plus durable.

L'énergie éolienne est, parmi les énergies renouvelables, celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde, du fait des caractéristiques intrinsèques de cette source d'énergie (intermittence de la source primaire, technologies diverses des générateurs, présence d'interfaces d'électronique de puissance).

Ce mémoire traite de l'étude, la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone utilisée dans la production de l'énergie éolienne.

Pour ce faire, après un court historique nous avons dressé d'abord un état de l'art des énergies renouvelables, ainsi qu'une description du gisement éolien est présenté avec une présentation des ensembles machines – convertisseurs utilisés dans l'énergie éolienne.

Une deuxième partie est destinée à montrer les performances et les limites d'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée par un banc de capacités dans un système éolien. Pour cela il a été étudié l'effet de la charge et des capacités connectés sur la tension et la fréquence, ainsi que la variation de la vitesse du rotor est également étudié.

La troisième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude théorique de la machine asynchrone à double alimentation MADA concernant son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients et ses domaines d'applications ainsi que sa modélisation. Une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statorique pour l'utilisation de la MADA dans un système éolien est présentée.

Vient ensuite la dernière partie qui met en œuvre la commande vectorielle basée sur trois régulateurs linéaires de philosophies différentes pour la commande de la MADA utilisée en génératrice (Proportionnel Intégral utilisé comme référence, régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles, régulateur flou et le régulateur flou adaptatif).

Les résultats de simulation de notre étude sont présentés, permettant une étude comparative des régulateurs utilisés.

## Mots clés :

Eolienne, modélisation, machine asynchrone auto-excitée, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, convertisseur. Commande adaptative, lois adaptative floue,

## ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة، نموذجية و تحكم في مولد لا ترامني في غرض استعماله لتوليد الكهرباء بالطاقة الهوائية. من أجل ذلك، بعد عرض تاريخي موجز قمنا أولاً بعرض الأساسيات، المفاهيم والمعادلات التي تتعلق بالطاقة الهوائية والتي تتحكم في تسيير نظام الرياح. الجزء الثاني من هذه المذكرة يتعلق أساساً بدراسة مولد قفص السنجاب اللازامي ذو الاشتغال الذاتي وإمكانية استعماله في إنتاج الطاقة الهوائية وذلك من أجل استعماله في المناطق النائية وكذلك ربطه بالشبكة الكهربائية، مبيّن خصائصه ومحدودية استعماله ومدى تأثير الحمولة الكهربائية، مكثفة الحث الذاتية وسرعة الرياح على قيمة الجهد والتواتر. الجزء الثالث والرابع لهذه المذكرة مكرس لكيفية إنتاج الطاقة الهوائية بواسطة استعمال الماكينات اللازامية المزدوجة التغذية، حيث تطرقنا إلى إيضاح مبدأ التشغيل، الإيجابيات والسلبيات، ثم انتقلنا إلى إعطاء النموذج الرياضي لنظام تحويل الطاقة ودراسة إستراتيجية التحكم فيه، أما فيما يتعلق بالتحكم بين التدفق والعزم فقد استعملنا التحكم الشعاعي الذي يوجه فيه التدفق وفق العضو الساكن حيث يتركز التحكم على أربع ضوابط: ضابط تناسبي تكاملي، ضابط متعدد الحدود، ضابط مؤسس على تقنية المنطق الغامض و ضابط مؤسس على تقنية المنطق الغامض المتلائم. اختتمت هذه الدراسة بمقارنة النتائج الحاصل عليها حيث بينا فعالية كل ضابط وصلابته.

## كلمات مفاتيح:

الماكينات اللازامية المزدوجة التغذية، الطاقة الهوائية، التحكم الشعاعي، ذاتي التهيّج، النموذجية، التحكم الشعاعي، ضابط تناسبي تكاملي، ضابط مؤسس على تقنية المنطق الغامض، ضابط متعدد الحدود، المنطق الغامض المتلائم.