

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie Et Environnement

Présenté par :

Rabia BEHLOUL

Sabrina Amina MOKRANI

Thème

**Etude, Modélisation Et Commande**

**Adaptative d'une MADA**

Soutenu publiquement, le 08 / 09 / 2020 , devant le jury composé de :

Mr. A. KERBOUA	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Mr. A. CHEMIDI	MCB	ESSA. Tlemcen	Encadrant
Mr. A. TAHOUR	Professeur	ESSA. Tlemcen	Co- Encadrant
Mr. M.C. BENHABIB	MCA	Université de Tlemcen	Examineur 1
Mr. M. LOUCIF	MCB	Université de Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 / 2020

## ***Dédicaces***

*A mes parents pour leurs sacrifices, leurs amour, leurs tendresse et leurs soutien au long de mes études. Que se modeste travail soit l'exaucement de vos vœux formulés, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*A mon cher frère Anis et ma chère sœur Marwa pour leur appui et encouragement.*

*A mes chères tantes, mes cousines et toute ma grande famille  
MOKRANI et BOULGHALEGH.*

*A tous mes amis, et à la promotion Electrotechnique option  
Energie et Environnement : session 2020.*

*Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et m'ont  
soutenu.*

*Je dédie ce modeste travail.*

***Sabrina Amina MOKRANI***

*Je dédie ce travail :*

*Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont  
beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai  
éternellement reconnaissante.*

*A mon cher frère.*

*A mon grand-père, décédé quelques jours avant d'avoir assisté à  
mon diplôme.*

*A mon oncle qui m'a poussé à devenir ingénieur.*

*A mes chers : tantes, cousins et cousines.*

*A toute la famille BEHLOUL.*

*Une dédicace plus spéciale à mon proche ami S. TAYEB pour son  
encouragement et son soutien moral.*

*A tous ceux que j'aime et m'aime.*

*A tous mes collègues de la promotion électrotechnique 2017-2020.*

*A tous qui veulent lire.*

**Rabia BEHLOUL**

# Remerciements

Nous profitons de cette opportunité pour remercier en premier lieu DIEU tout puissant de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre encadreur M.CHEMIDI Abdelkarim pour nous avoir fait découvrir le monde de la recherche par ce mémoire en proposant un sujet intéressant que celui-ci. Nous lui remercions également pour son encadrement et ses judicieux conseils ainsi son suivi durant toute la période de préparation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre Co-encadreur M. TAHOUR Ahmed, pour avoir dirigé ce travail, pour ses grandes compétences scientifiques ainsi que pour ses remarques toujours constructives.

Nous remercions très chaleureusement tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail.

Un grand merci pour l'ensemble des professeurs qui nous enseigné l'électrotechnique, plus particulièrement M.KERBOUA Abdelfattah et M.LOUCIF Mourad.

Nous tenons particulièrement à remercier M.BOUSERHANE Ismail et M.BEN MOHAMMED Fayçal pour leur rigueur, leur soutien moral ainsi que leur disponibilité.

Nous voulons remercier aussi et plus particulièrement tous les membres de la centrale éolienne de Kaberten pour leur accueil chaleureux.

S'il y a une personne à ne pas oublier, c'est bien M.KOUSSA Khaled, chercheur au centre de recherche des énergies renouvelables à Adrar, avec qui nous avons partagé son bureau, durant le stage de fin d'étude nous le remercions de son investissement dans notre travail que ce soit par ces vérifications ou son aide.

Nous sommes très reconnaissantes à toute personne qui a contribué de près ou de loin à élaborer et réaliser ce modeste mémoire.



---

# Table des matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens</b>	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Historique de l'énergie éolienne .....	5
I.3 L'énergie éolienne en Algérie.....	6
I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	6
I.4.1 Avantages.....	7
I.4.2 Inconvénients .....	7
I.5 Description du système éolien .....	7
I.5.1 Définition de l'énergie éolienne .....	7
I.5.2 Les différents types d'éolienne.....	7
I.5.2.1 Les éoliennes à axe vertical .....	7
I.5.2.2 Les éoliennes à axe horizontal.....	8
I.5.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	9
I.6 Principales composantes d'une éolienne .....	10
I.7 Quelques notions sur le vent .....	11
I.8 Topologies des aérogénérateurs .....	11
I.8.1 Générateur synchrone .....	11
I.8.2 Générateurs asynchrone .....	12
I.8.2.1 Générateurs asynchrone à cage d'écureuil.....	13
I.8.2.2 Générateurs asynchrone à cage à double stator .....	14
I.8.3 Générateur asynchrone à double alimentation .....	14
I.9 Description d'une MADA dédiée à un système éolien.....	16
I.9.1 Principe de fonctionnement de la MADA .....	16
I.9.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA .....	17
I.10 Conclusion .....	18
<b>Chapitre II : Contraintes de raccordement des éoliennes au réseau électrique</b>	
II.1 Introduction .....	20
II.2 Qualité de l'énergie électrique.....	20
II.2.1 Définition .....	20
II.2.2 Différents types de perturbation affectant le réseau électrique.....	20

II.2.2.1 Les creux de tension .....	20
II.2.2.2 Les surtensions .....	21
II.2.2.3 Variations et fluctuations de tension .....	21
II.2.2.4 Les déséquilibres .....	22
II.2.2.5 Les harmoniques et les inters harmoniques.....	22
II.2.2.6 Variation de fréquence .....	23
II.3 Contraintes de raccordement des éoliennes au réseau de transport.....	23
II.4 Problèmes induits par l'intégration de l'éolienne dans le réseau de transport .....	24
II.5 Principales réglementations techniques pour la connexion des éoliennes au réseau électrique .....	25
II.5.1 Contrôle de la puissance active .....	25
II.5.2 Contrôle de la puissance réactive .....	25
II.5.3 Allocation d'une puissance de réserve .....	26
II.5.4 Contrôle de la puissance pour la protection du système .....	26
II.5.5 Contrôle de la tension.....	26
II.5.6 Contrôle de la fréquence .....	27
II.5.7 Maintien de la production lors des défaillances du réseau.....	28
II.6 Conclusion .....	28

### **Chapitre III : Réglage des puissances statoriques de la MADA**

III.1 Introduction .....	30
III.2 Modélisation de la MADA .....	30
III.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	30
III.2.2 Mise en équation dans le plan (d-q) .....	31
III.3 Commande vectorielle de la MADA.....	32
III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....	32
III.3.2 Commande directe .....	36
III.3.3 Commande indirecte .....	36
II.3.3.1 Commande indirecte sans boucle de puissance.....	36
II.3.3.2 Commande indirecte avec boucle de puissance .....	37
III.4 La logique floue .....	38
III.5 Principe de la logique floue.....	38
III.6 Eléments de base de la logique floue .....	39
III.6.1 Ensemble floue .....	39
III.6.2 Fonction d'appartenance.....	40
III.6.3 Univers de discours.....	41

III.6.4 Variables linguistiques.....	42
III.6.5 Opérateurs de la logique floue.....	42
III.7 Commande par logique floue.....	44
III.7.1 Interface de fuzzification.....	44
III.7.2 Interface d'inférence floue.....	45
III.7.3 Interface de défuzzification.....	47
III.8 Structure de base du contrôleur flou.....	47
III.9 Résultats de simulation.....	50
III.10 Conclusion.....	52
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>56</b>
<b>Annexe A</b>	
<b>Annexe B</b>	

---

## Liste des figures

---

<b>Figure I.1</b> : Ferme éolienne de Kaberten à Adrar.....	2
<b>Figure I.2</b> : Eoliennes à axe vertical.....	4
<b>Figure I.3</b> : Eoliennes à axe horizontal.....	4
<b>Figure I.4</b> : Capteur à axe horizontal en amont et en aval.....	5
<b>Figure I.5</b> : Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	7
<b>Figure I.6</b> : Un anémomètre.....	8
<b>Figure I.7</b> : Système éolien à base de MS à aimant permanent.....	9
<b>Figure I.8</b> : Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage.....	10
<b>Figure I.9</b> : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage à double stator .....	11
<b>Figure I.10</b> : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	11
<b>Figure I.11</b> : Système éolien à base de MADA à structure Scherbius avec convertisseur MLI.....	12
<b>Figure I.12</b> : Mode de fonctionnement de la MADA.....	15
<b>Figure II.1</b> : Creux de tension .....	20
<b>Figure II.2</b> : Tension d'une phase en présence d'un flicker.....	22
<b>Figure II.3</b> : Forme d'onde d'une tension d'une phase en présences des harmoniques.....	23
<b>Figure III.1</b> : Principe d'orientation du flux statorique .....	33
<b>Figure III.2</b> : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne).....	35
<b>Figure III.3</b> : Schéma bloc de la commande directe des puissances de la GADA.....	36
<b>Figure III.4</b> : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.....	37
<b>Figure III.5</b> : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.....	38
<b>Figure III.6</b> : Fonction d'appartenance d'un ensemble classique.....	40
<b>Figure III.7</b> : Fonction d'appartenance d'un ensemble flou.....	40
<b>Figure III.8</b> : Quelques formes de fonctions d'appartenance.....	41
<b>Figure III.9</b> : Représentation de l'univers de discours.....	41
<b>Figure III.10</b> : Représentation des trois ensembles flous.....	42
<b>Figure III.11</b> : Union et intersection de deux sous ensemble flous.....	43
<b>Figure III.12</b> : Structure d'un système de contrôle flou.....	44
<b>Figure III.13</b> : Inférence floue .....	46
<b>Figure III.14</b> : Principe d'adaptation du PI par la logique floue.....	47

<b>Figure III.15 :</b> Fonctions d'appartenances de l'erreur et sa dérivée .....	48
<b>Figure III.16 :</b> Fonctions d'appartenances de $k_p'$ et $k_i'$ .....	48
<b>Figure III.17 :</b> Puissances active et réactive obtenues par la méthode directe.....	50
<b>Figure III.18 :</b> Puissances active et réactive obtenues par la méthode indirecte sans boucle de puissance.....	50
<b>Figure III.19 :</b> Puissances active et réactive obtenues par la méthode indirecte avec boucle de puissance.....	51
<b>Figure III.20 :</b> Réponse du système par la méthode directe en appliquant un PI et PI-flou....	52

---

## Liste des Tableaux

---

<b>Tableau III.1</b> : Les opérateurs flous les plus utilisés.....	43
<b>Tableau III.2</b> : Implication floue.....	44
<b>Tableau III.3</b> : Désignation standard des ensembles flous.....	45
<b>Tableau III.4</b> : Méthodes usuelles de l'inférence floue.....	46
<b>Tableau III.5</b> : Base de règle pour $k_p'$ .....	49
<b>Tableau III.6</b> : Base de règle pour $k_i'$ .....	49
<b>Tableau III.7</b> : Comparaison des performances des deux régulateurs.....	51

## Nomenclature

Nom	Symbole	Unité
Angle électrique de position	$\theta$	$^{\circ}$
Coefficient des frottements visqueux	$f$	$Nm.s/rd$
Couple électromagnétique	$C_{em}$	$Nm$
Couple mécanique de la GADA	$C_{mec}$	$Nm$
Couple résistant	$C_r$	$Nm$
Fréquence	$f_s$	$Hz$
Glissement	$g$	$/$
Inductance cyclique rotorique	$L_r$	$H$
Inductance cyclique statorique	$L_s$	$H$
Inductance magnétisante	$M$	$H$
Moment d'inertie de la génératrice	$J_{mec}$	$Kg.m^2$
Moment d'inertie de la turbine	$J_t$	$Kg.m^2$
Moment d'inertie totale	$J$	$Kg.m^2$
Nombre de paires de pôles	$p$	$/$
Puissance active statorique	$P_s$	$W$
Puissance aérogénérateur	$P_{aero}$	$W$
Puissance réactive statorique	$Q_s$	$VAR$
Pulsation des grandeurs rotoriques	$\omega_r$	$rad/s$
Pulsation des grandeurs statoriques	$\omega_s$	$rad/s$
Pulsation électrique	$\omega$	$rad/s$
Rayon de pale	$R$	$m$
Résistance rotorique	$R_r$	$\Omega$
Résistance statorique	$R_s$	$\Omega$
Vitesse mécanique de la GADA	$\Omega_{mec}$	$rad/s$
Vitesse relative optimale		

## Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
AC	Alternative Curent (Courant Alternatif)
CCM	Convertisseur Coté Machine
CCR	Convertisseur Coté Réseau
DC	Direct Curent (Courant Continu)
FLC	Fuzzy Logic Controller
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel-Intégrale



---

# Introduction générale

---

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. Par la suite, ce type d'énergie propre a servi à produire l'électricité [1]. Une production électrique à base d'une énergie renouvelable est devenu une nécessité pour des raisons environnementales et économiques.

Au cours du temps, les systèmes éoliens ont connu une amélioration en termes de performance et rentabilité grâce au développement connu dans le domaine de l'électronique et l'électronique de puissance. Ce qui a encouragé l'intégration de ces systèmes au sein des systèmes de la production électrique vu que les sources d'énergies fossiles ont marqué leurs limites (source épuisable et polluante). D'après le GWEC (Globe Wind Energy Council) la capacité totale d'énergie éolienne dans le monde est maintenant supérieure à 651 GW, soit une augmentation de 10 % par rapport à 2018 [1].

Dans notre étude, notre système est composé d'un aérogénérateur tripale, à axe horizontal, connecté au réseau par une MADA. La particularité de cette machine par rapport aux autres machines asynchrones est au niveau de la connexion de ses enroulements. Les enroulements du stator sont couplés au réseau alors les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance qui sont connectés au réseau. Ces derniers assurent la variation du glissement et permettent à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. Ce type de machine devient de plus en plus employé pour les éoliennes à vitesse variable.

Un autre avantage de la MADA est l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne en agissant sur la commande de la chaîne éolienne de sorte que la vitesse de rotation du rotor s'adapte à la vitesse du vent (optimisation de la vitesse spécifique). En plus, les éoliennes basées sur la MADA permettent de contrôler les échanges de puissance réactive avec le réseau et le problème de consommation de l'énergie réactive ne se pose pas avec ce type de générateur. En effet, ce type de machine peut fournir cette puissance et ainsi aider à répondre aux demandes de puissance réactive à d'autres composants du réseau électrique [2].

Pour assurer ces fonctionnalités, la machine asynchrone à double alimentation demande des algorithmes de commande. Ces derniers permettent le pilotage d'énergie entre les différents éléments du système.

Ces dernières décennies, le développement des méthodes de commande a connu un progrès. Le but de ces commandes est d'avoir un système stable, rapide et insensible (sinon peu sensible) aux variations qui peuvent arriver. Les techniques de commande classique de type PID sont les plus utilisées dans les applications industrielles. Elles sont des techniques de

commande linéaire et simple. Pour un bon moment ces techniques ont répondu au besoin mais ils ont devenu moins efficaces dans les systèmes complexes et non-linéaires. La commande classique nécessite la bonne connaissance du modèle mathématique du système ce qui est difficile et compliqué dans les systèmes non-linéaires.

Pour commander ce type de système, les chercheurs ont lancé un nouveau défi pour trouver le remplaçant de la commande classique en assurant la robustesse des systèmes complexes avec un coût raisonnable. Le fruit de ces recherches était l'apparition d'un nouveau terme : la commande intelligente qui utilise l'intelligence artificielle.

La logique floue est une commande intelligente et une branche de l'intelligence artificielle développée par le professeur Lotfi Zadeh en 1965 qui s'inspire du raisonnement humain. Le choix de ce raisonnement est dû à la flexibilité du cerveau humain en traitant les imprécisions et incertitudes. Cette technique de commande ne nécessite pas un développement approfondi du modèle mathématique mais l'utilisation des inférences avec différentes règles.

L'intégration de la logique floue dans la commande adaptative classique est aussi une solution forte intéressante pour assurer une régulation optimale qui répond aux exigences de l'utilisateur. Même dans un environnement difficile et variable, ce type de commande permet d'exploiter les avantages présentés par des contrôleurs PI et ceux de la logique floue [3].

Dans notre travail, on s'intéresse à l'application de l'adaptation des paramètres d'un contrôleur PI par logique floue à un système de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dont le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite.

La répartition des chapitres est comme suit :

- Le premier chapitre a pour objectif la présentation des généralités sur les systèmes éoliens avec les différents générateurs utilisés dans la production électrique.
- Le deuxième chapitre est consacré aux contraintes de raccordement des éoliennes au réseau électrique dont nous présenterons quelques problèmes rencontrés lors du raccordement des éoliennes et réglementation technique pour réaliser la connexion entre le système éolien et le réseau électrique.
- Le troisième et dernier chapitre est réparti en deux parties. Premièrement, nous allons présenter la modélisation de la MADA ainsi la théorie de la logique floue et ses éléments de base. La deuxième partie est consacrée à la commande PI utilisant la technique Gains Sheduling (FLC-PI adaptatif). A la fin du chapitre, une présentation des résultats obtenus et une interprétation.

---

# Chapitre I

## Généralités sur les systèmes éoliens

---

## **I.1 Introduction**

Depuis son existence, l'homme avait besoin de l'énergie pour survivre et satisfaire ses besoins. Au début il a utilisé le feu pour cuire, allumer et se chauffer ensuite il a voulu plus de confort donc il a exploité les sources d'énergies primaires disponibles : l'hydrocarbure, le charbon, le vent, le solaire, l'uranium, Biomasse...etc.

Aujourd'hui, la production énergétique mondiale à base de combustible et nucléaire représente 81% et avec l'accroissement de la population et les besoins énergétiques cette production devrait doubler d'ici 2040 d'après les spécialistes [4]. Etant ses sources polluantes et épuisables, l'exploitation des autres sources d'énergie propre et inépuisable est une nécessité pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et satisfaire nos besoins.

Parmi ces énergies renouvelables : l'énergie du vent que l'homme avait utilisé pour le pompage d'eau et la mouture du grain. Cette énergie éolienne est une source intermittente avec une puissance électrique assez importante par rapport aux autres comme l'énergie photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on représentera des généralités sur l'éolienne avec les différentes machines électriques utilisées pour la production électrique.

## **I.2 Historique de l'énergie éolienne**

Depuis l'antiquité, la première utilisation de l'énergie éolienne était à travers les bateaux à voile.

Au VII<sup>e</sup> siècle, les Perses ont pu actionner des pompes avec la force du vent. Les Egyptiens ont appliqué cette technique pour créer leur système du pompage pour l'irrigation de la terre.

Entre temps les Perses travaillaient sur le développement de cette énergie et l'amélioration de leur machine par la fixation des voiles sur un axe vertical .Donc ils ont développé le premier moulin qui produise une énergie mécanique.

En 1839, un système d'ailes (élytres) a été inventé par le français P. Berton pour éliminer la tache de l'insertion ou l'élimination des toiles (tissus) en fonctions du vent.

En 1841, l'idée d'une production électrique à base du vent apparaît à travers le Belge Nollet. Cette idée à inspirer les trois chercheurs C. Bruch, J. Blyth et V. de Feltre pour créer les premiers aérogénérateurs en 1880. Et par la suite C. de Goyon a inventé une éolienne avec deux dynamos. Ces inventions étaient de faible puissance électrique donc on ne pouvait pas satisfaire

les besoins électriques mais avec l'arrivée de 1956 J. Juul a réalisé une éolienne avec une puissance de 200kW.

Le modèle de J. Juul a été utilisé pour le développement des éoliennes plus puissantes et performantes. Aujourd'hui on parle d'éolienne avec une puissance de quelques MW [5].

### **I.3 L' énergie éolienne en Algérie**

En Algérie, une unique ferme éolienne a été mise en service en 2014, à la région de Kaberten wilaya d'Adrar. Elle est composée de 12 éoliennes d'une puissance totale de 10.2 MW ,850 KW chacune. Leur diamètre est de 52 m avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie est de 5% par rapport au réseau local. Notons que cette description ainsi ces paramètres caractéristiques sont obtenus lors d'un stage de fin d'étude effectué au sein de la centrale éolienne de Kaberten. La figure I.1 représente la ferme éolienne de Kabrten.



FigureI.1 - Ferme éolienne de Kaberten à Adrar

### **I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

Chaque technologie développée par l'être humain est bénéfique mais possède certains risques. C'est le cas pour la production électrique par énergie éolienne.

#### **I.4.1 Avantages**

- L'énergie éolienne est une source d'énergie durable et renouvelable ;
- Production électrique sans émission de CO<sub>2</sub> ;
- Un rendement énergétique important avec une grande puissance électrique ;

#### **I.4.2 Inconvénients**

- Le vent est une source d'énergie aléatoire aussi l'implantation d'une éolienne dépend de la topologie et la météo ;
- Une technologie coûteuse ;
- Elle est dangereuse pour les oiseaux ;
- Nuisance sonore.

### **I.5 Description du système éolien**

#### **I.5.1 Définition de l'énergie éolienne**

Une éolienne ou bien un aérogénérateur est un dispositif utile dans la production électrique. Elle permet de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. On peut classer les éoliennes en trois catégories selon leur puissance :

- Eolienne de petite puissance (moins de 40 KW) ;
- Eolienne de moyenne puissance (40 KW à 1 MW) ;
- Eolienne de grande puissance (1 MW et plus).

#### **I.5.2 Les différents types d'éolienne**

Les turbines éoliennes sont classées selon l'orientation de leur axe de rotation en deux grandes familles :

- Eoliennes à axe vertical;
- Eoliennes à axe horizontal.

##### **I.5.2.1 Les éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles, elles ne nécessitent aucun système d'orientation des pales. De nombreuses variantes ont été testées, mais seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation sont l'éolienne de Savonius et celle de Darrieus [6] (Figure I. 2).



Figure I. 2 - Eoliennes à axe vertical [7]

### I.5.2.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie des moulins à vent. Elles sont plus largement employées, et nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Pour la production d'électricité, les éoliennes à axe horizontal présentent généralement un nombre des pales compris entre 1 et 3 qui sont fixées au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La force de portance du vent est utilisée pour générer un couple moteur entraînant sa rotation. Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono pale, bipales, tripales ou multi-pales (figureI.3) mais la technologie la plus dominante actuellement c'est l'éolienne tripale, elle est plus stable car la charge aérodynamique est relativement uniforme et présente le coefficient de puissance le plus élevé actuellement.

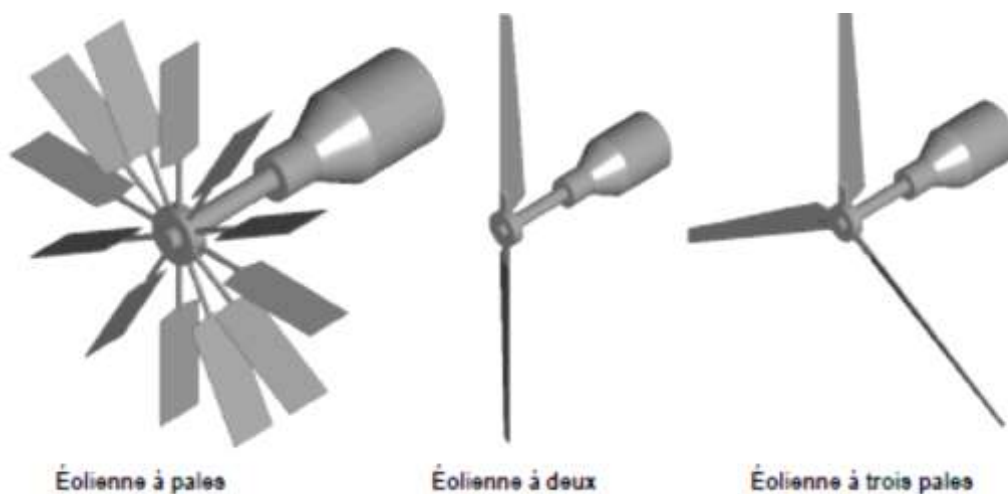


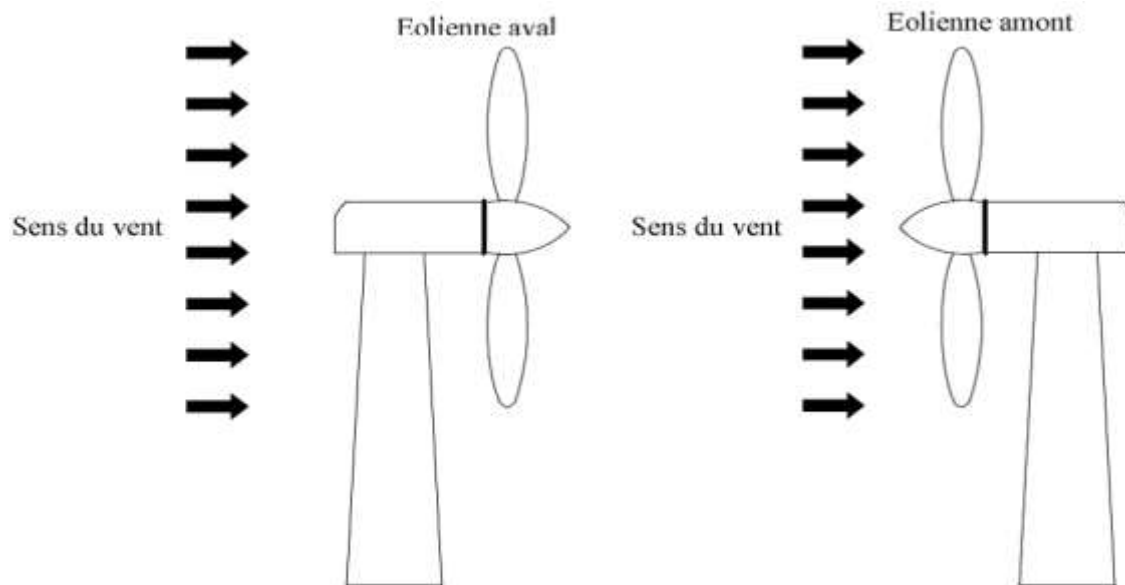
Figure I.3 - Eoliennes à axe horizontal [7]



On distingue deux catégories d'éolienne à axe horizontal [7] (figure I.4) :

**Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

**Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



FigureI.4 - Capteur à axe horizontal en amont et en aval [8]

### I.5.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une centrale éolienne produit de l'électricité grâce à la force du vent. Il existe des parcs terrestres et des parcs à implanter en mer. L'hélice qui est composée généralement de trois pales se met à tourner selon l'effet d'un vent au moins de 10 km/h, la nacelle sur laquelle elle est fixée s'oriente automatiquement pour être toujours face au vent et les pales pivotent pour capter le maximum du vent. Si le vent dépasse 90 km/h, l'éolienne se met en drapeau par mesure de sécurité.

Dans la nacelle, l'hélice fait tourner un axe sa vitesse de rotation n'est pas suffisante pour générer de l'électricité : un multiplicateur augmente cette vitesse jusqu'à 1000 tr/min et la transmet à un second axe qui fait tourner un alternateur. Dans l'alternateur, l'interaction entre les électroaimants du rotor et les bobines du fil de cuivre du stator produit un courant électrique. Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension à 20kV. L'électricité ensuite est acheminée par un câble souterrain ou sous-marin et sera à nouveau élevée à 225 ou 400 kV par un poste de transformation pour être transportée dans les lignes à haute tension.

## I.6 Principales composantes d'une éolienne

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées dans la production électrique. Elles se composent de trois parties essentielles : la tour, la nacelle et le rotor (Figure I.5).

### – La tour

On trouve plusieurs types de tour selon la puissance de l'éolienne mais la plus utilisée est celle en tube d'acier fixé par une fondation en béton ferrailé. La hauteur de la tour est liée au rendement.

### – La nacelle

Elle rassemble les éléments du couplage entre le rotor éolien et le générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur de vitesse, système de contrôle, système de refroidissement, équipements de mesure du vent et un système de freinage de sécurité. Le générateur qui est généralement composé d'une machine synchrone ou asynchrone, des systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (Frein aérodynamique).

### – Le rotor

Il permet de transférer une partie de la puissance du vent à l'arbre lent de l'éolienne. Son diamètre détermine la puissance qui pourra être récupérée. Il est composé d'un moyeu auquel sont accouplées des pales. Les matériaux entrants dans la composition des pales sont essentiellement à base de composites comme la fibre de verre, la fibre de carbone ou encore la résine d'époxy afin de résister aux nombreuses contraintes mécaniques (torsion et flexion) ainsi qu'au phénomène d'abrasion auquel s'ajoute un phénomène de corrosion en milieu marin. Les pales peuvent être articulées sur leur axe totalement ou partiellement, ou encore être conçues afin de décrocher aérodynamiquement sous des vitesses de vent excessives [8].

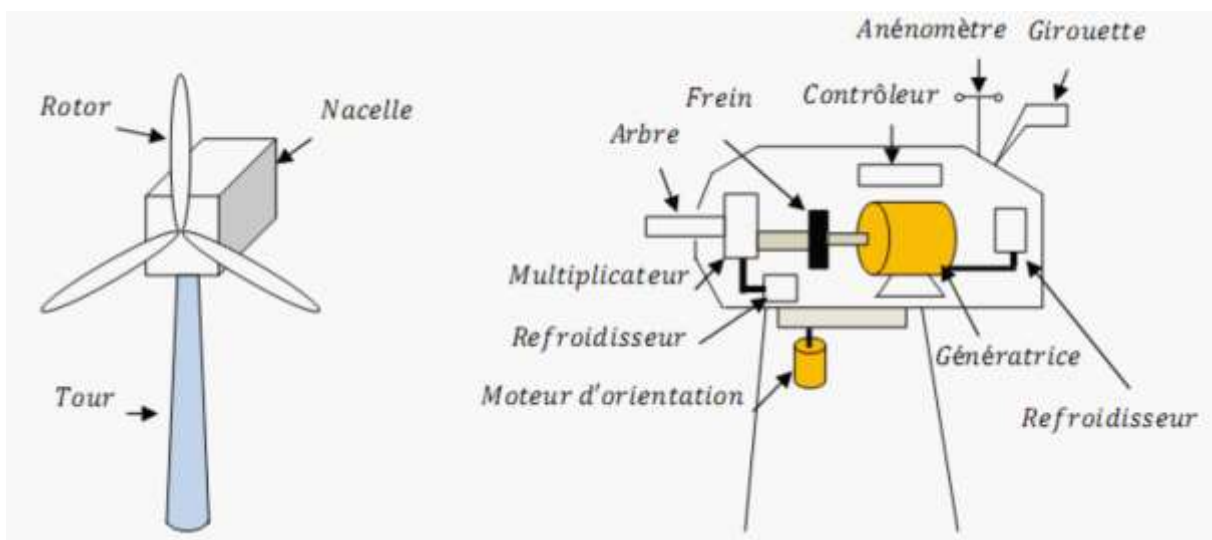


Figure I.5 - Constitution d'une éolienne à axe horizontal [9]

## I.7 Quelques notions sur le vent

Le vent est la source de l'énergie éolienne, il résulte de différentes influences qui sont étudiées par les météorologues et climatologues, son énergie provient des différences de rayonnement solaire et de refroidissement entre l'équateur et les pôles. Les variations de température induites créent des zones de basses et hautes pressions entre lesquelles se déplacent les masses d'air.

Pour l'application éolienne, la principale étape consiste à connaître localement la nature des vents de l'endroit où l'on souhaite implanter des machines. On détermine ainsi la valeur moyenne du vent, mais aussi le niveau de turbulence, l'amplitude des rafales rencontrées etc...

En premier lieu, ces données permettent de définir le potentiel du site ainsi que la nature des éoliennes à utiliser et leur répartition optimale [10].

Le vent est défini par sa direction et sa vitesse, cette dernière varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. En effet, un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement (Figure I.6).



Figure I.6 - Un anémomètre [11]

## I.8 Topologies des aérogénérateurs

### I.8.1 Générateur synchrone

Depuis longtemps, les alternateurs sont les plus utilisables pour la production d'énergie électrique. Ils sont principalement utilisés dans les centrales diesel, nucléaire, à vapeur et même hydraulique. Parmi ses avantages : la vitesse de rotation qu'elle est proportionnelle à la fréquence du réseau. Ainsi, l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ

magnétique de ces alternateurs peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnelle.

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets Offshore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si de plus la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient majeur de cette structure (figure I.7) est la nécessité pour sa connexion au réseau d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent [12].

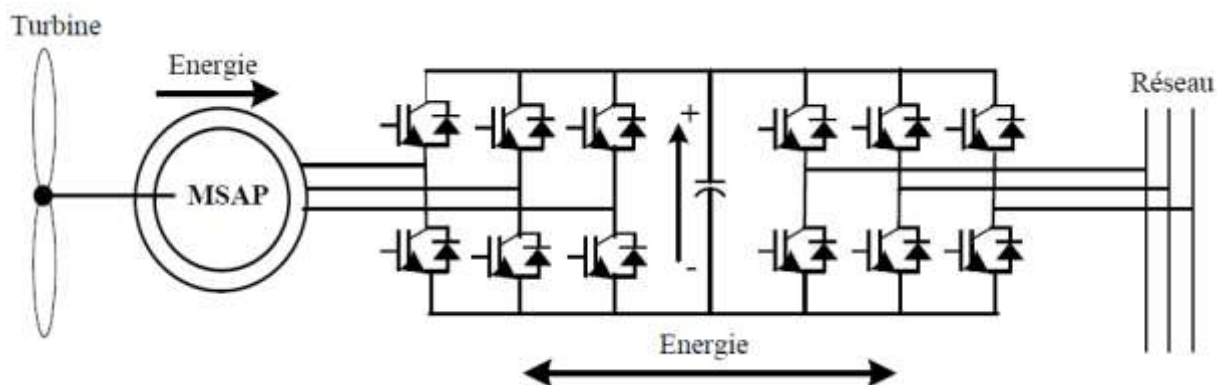


Figure I.7 - Système éolien à base de MS à aimant permanent [13]

### I.8.2 Générateur asynchrone

Les machines asynchrones sont les machines employées le plus fréquemment dans l'industrie. En mode génératrice, elles sont actuellement les mieux adaptées pour les systèmes de conversion à énergie éolienne à moyenne et grande puissance. Elles possèdent plusieurs avantages par rapport aux machines à courant continu : simplicité, robustesse, coût réduit et entretien facile.

L'inconvénient majeur de cette machine est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

### I.8.2.1 Générateur asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement à la production traditionnelle de l'énergie électrique qui assurée par les alternateurs synchrones, les générateurs asynchrones à cage d'écureuil sont aujourd'hui largement utilisés pour le fonctionnement à vitesse fixe. En effet, une grande partie des éoliennes installées sont équipées par ce type de machine grâce à ses qualités d'être moins coûteuse, robuste, réversible et simple (absence de contact électrique balais collecteurs ou contact glissant de bagues).

Pour assurer le bon fonctionnement de dispositif, la génératrice doit garder une vitesse de rotation légèrement supérieure à celle de synchronisme donc le dispositif le plus simple consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission d'aérogénérateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse afin de connecter le stator de la machine au réseau (figure I.8).

La machine a un nombre de paires de pôles fixe et donc doit fonctionner sur une plage de vitesse limitée (glissement inférieur à 2%) [6]. La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

Au démarrage, la puissance réactive est consommée afin d'établir le champ magnétique dans la machine (la magnétisation de rotor), c'est pour cette raison qu'un banc de condensateurs est utilisé pour réaliser une compensation électrique de cette puissance [12] (qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne) (Figure I.8).

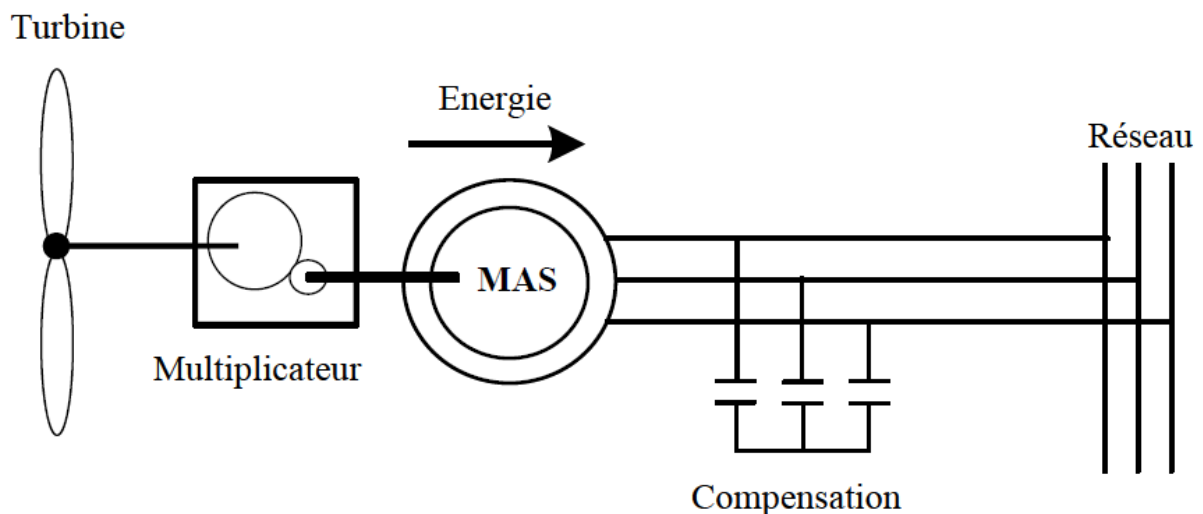


Figure I.8 - Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage [13]

### I.8.2.2 Générateur asynchrone à cage à double stator

Le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être vibrant, ce qui rend le rendement aérodynamique faible, donc le réseau présente des problèmes de décrochage. Pour pallier à ces problèmes, les constructeurs ont développé une machine asynchrone à cage à double stator fonctionnant à vitesse variable, ce type de génératrice est constitué d'un double bobinage au niveau de stator qui induit un nombre de paires de pôles variable (Figure I.9).

En effet, l'enroulement du stator ayant un nombre de paires de pôles réduit est adapté pour des vitesses de vent assez élevées et donc pour des puissances élevées. Le deuxième enroulement du stator ayant un nombre de paires de pôles important est très adapté pour des vitesses de vent faibles et des puissances faibles. Ce système reste essentiellement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. Mais il reste efficace car la connexion au réseau est plus facile grâce à la variation du glissement entre la vitesse de rotation du rotor et le flux du stator [14].

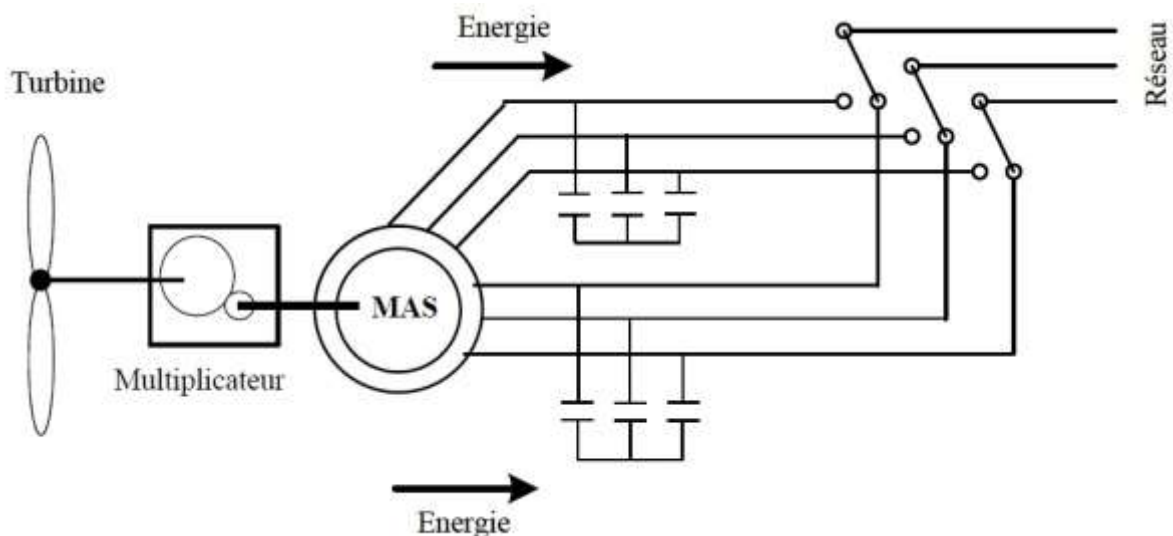
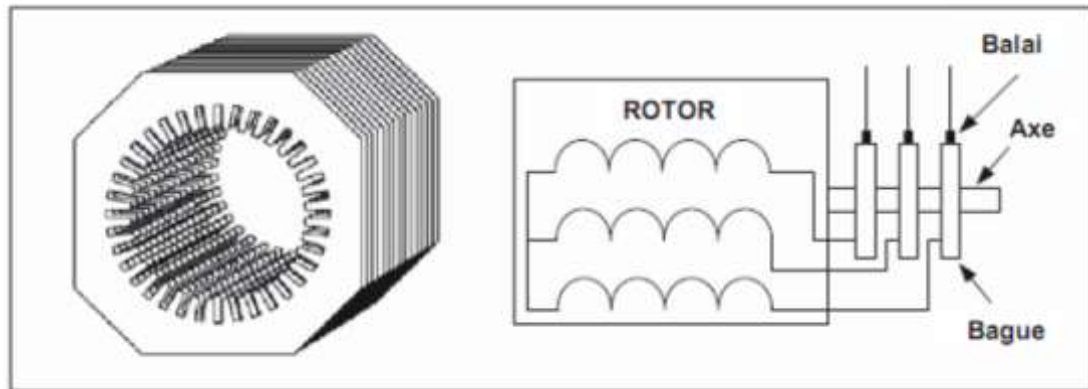


Figure I.9 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage à double stator [13]

### I.8.3 Générateur asynchrone à double alimentation

De nos jours, la technologie la plus utilisable dans les systèmes éoliens c'est la machine asynchrone à double alimentation (MADA) surtout en mode génératrice.

La MADA présente un stator identique à celui des machines asynchrones à cage et un rotor à bobinage triphasé est rendu accessible grâce à un système de balais-bagues (trois bagues munies de contacts glissants) [13] (Figure I.10).



FigureI.10 – Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [9]

Pour les systèmes éoliens utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs électroniques [15]. Ces derniers assurent la variation du glissement et permettent à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor.

Parmi les configurations existent dans la littérature, on peut citer principalement :

- ✓ Générateur asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée ;
- ✓ Générateur asynchrone à double alimentation à structure de Kramer ;
- ✓ Générateur asynchrone à double alimentation avec cyclo convertisseur ;
- ✓ Générateur asynchrone à double alimentation à structure scherbius avec convertisseur MLI ;
- ✓ Générateur asynchrone à double alimentation avec convertisseur matriciel.

La configuration que nous intéresse dans ce travail est celle de Scherbius avec convertisseur MLI. Cette structure utilise deux onduleurs de tension en cascade à base des IGBT qui sont connectés au travers d'un bus continue (figureI.11). Ces interrupteurs IGBT peuvent être commandé à l'ouverture et à la fermeture alors que les onduleurs sont commandés en MLI, ce type de convertisseur est choisi pour limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet les fréquences harmoniques non nulles vers les fréquences élevées), de contrôler le flux, les puissances (active et réactive) statoriques échangées avec le réseau et la vitesse de rotation. Ainsi, il est possible de les contrôler de manière à extraire le maximum de puissance [16]. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo-synchrone et le contrôle du facteur de puissance du côté réseau [14].

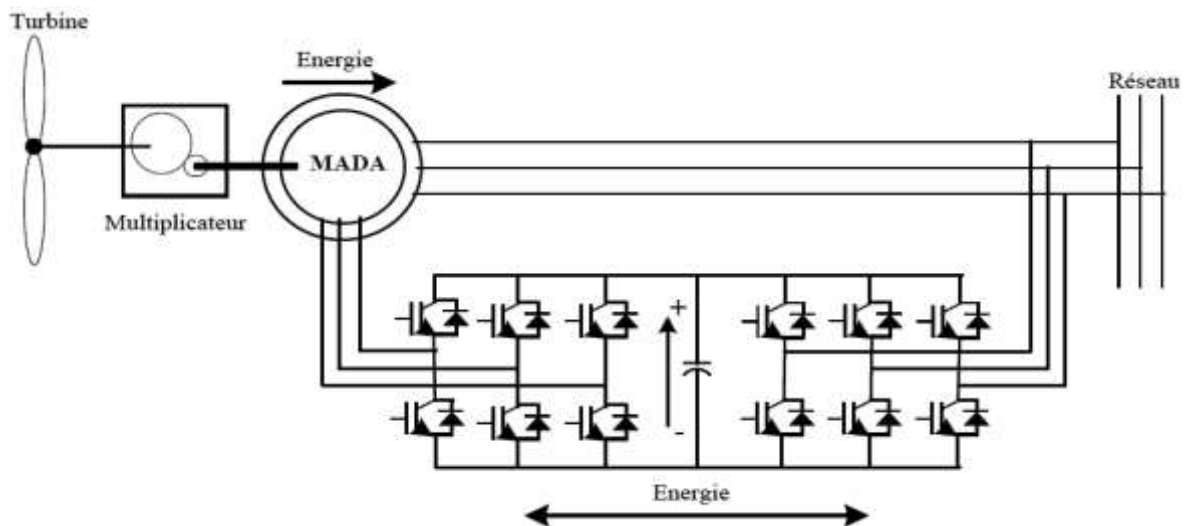


Figure I.11 - Système éolien à base de MADA à structure Scherbius avec convertisseur MLI [13]

### I.9 Description d'une MADA dédiée à un système éolien

Notre système de génération d'énergie éolienne peut être divisé en deux parties principales qui seront modélisées séparément :

- ❖ La partie mécanique du système qui est composée de la turbine, du multiplicateur et de l'arbre de transmission (cette partie a été abordée précédemment dans le mémoire de l'ingénieur).
- ❖ La MADA dont le stator est connecté directement au réseau, alors que son rotor est relié au réseau à travers deux convertisseurs statiques bidirectionnels et un bus continu dans une configuration appelée Back-to-Back, ces convertisseurs pouvant fonctionner en redresseur ou en onduleur selon le sens du transit de l'énergie.

#### I.9.1 Principe de fonctionnement d'une MADA

Le stator est alimenté par une source de tension triphasée de fréquence  $f_s$ , une deuxième source alternative de fréquence  $f_r$  alimente le rotor. Les courants circulant dans les enroulements statoriques créent un champ tournant à la vitesse synchrone  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ , de la même manière les courants rotoriques créent un champ rotorique tournant à une vitesse  $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$  [17], [18].

L'écart entre ces deux vitesses présente la vitesse de rotation de rotor  $\Omega$  tel que :

$$\Omega = \Omega_s - \Omega_r \quad (I.1)$$

Ou encore :

$$\omega = \omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega \quad (I.2)$$

$\omega$  : Pulsation électrique.



$\omega_s$  : Pulsation des grandeurs statoriques.

$\omega_r$  : Pulsation des grandeurs rotoriques.

$p$  : Nombre de paires de pôles.

Maintenant on peut définir une grandeur sans dimension qui est le glissement donnée par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{I. 3})$$

Selon le signe de glissement on peut distinguer deux régimes de fonctionnement hypo et hyper synchrone :

- **Le régime hypo-synchrone** : les champs statorique et rotorique tournent dans le même sens de telle façon que le rotor tourne avec une vitesse moins vite que la vitesse de synchronisme ( $\Omega < \Omega_s$ ) et donc un glissement positif ( $g > 0$ ).
- **Le régime hyper-synchrone** : dans ce cas les deux champs tournent dans des sens opposés, le rotor tourne avec une vitesse plus vite que la vitesse de synchronisme ( $\Omega > \Omega_s$ ), donc le glissement devient négatif ( $g < 0$ ).

## I.9.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La machine asynchrone doublement alimentée a la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme, en mode moteur qu'en mode générateur. Cette propriété est obtenue par la commande de l'amplitude et la phase des tensions rotoriques, celles-ci permettant de contrôler le champ magnétique à l'intérieur de la machine [19].

On peut déterminer les quatre modes de fonctionnement selon le transfert des puissances (illustré dans la figure I.12) [16], [19] :

### a. Fonctionnement en mode moteur Hypo-Synchrone

Le réseau fournit une puissance  $P_{res}$  au stator, la puissance de glissement (de rotor) est injectée au réseau et la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme c.-à-d. un glissement positif.

### b. Fonctionnement en mode moteur Hyper-Synchrone

Dans ce cas une partie de la puissance  $P_{res}$  est toujours fournie au stator, l'autre partie est absorbée par le rotor pour être convertie en puissance mécanique, et la vitesse de rotation est supérieure à la vitesse de synchronisme ( $g < 0$ ).

**c. Fonctionnement en mode génératrice Hypo-Synchrone**

La puissance est délivrée au réseau via le stator de la machine, une partie de cette puissance est réabsorbée par le rotor.

**d. Fonctionnement en mode génératrice Hyper-Synchrone**

La puissance mécanique que reçoit la machine est transmise au réseau, via le stator et par le rotor.

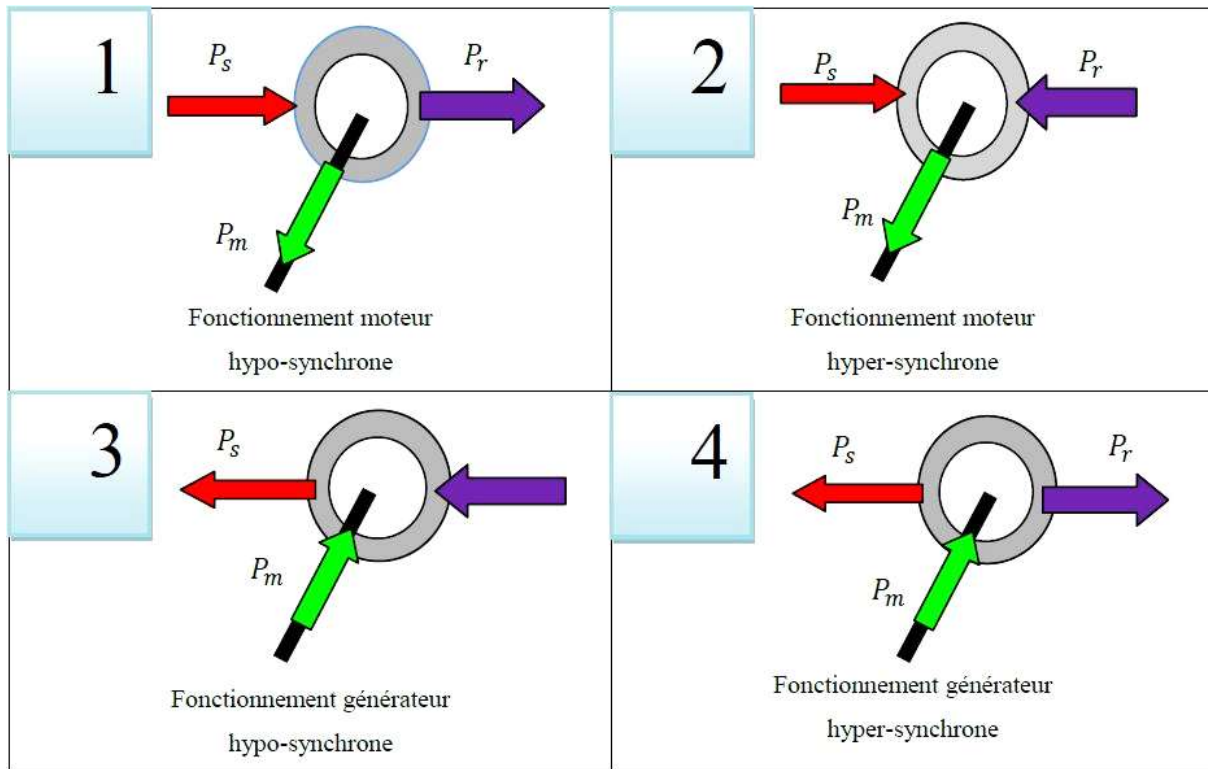


Figure I.12 - Modes de fonctionnement de la MADA [9]

**I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une brève historique de l'énergie éolienne et son développement en Algérie donnant une petite description de la centrale éolienne de Kabrten, ses avantages et inconvénients, après on a passé par une description générale de système éolien, les différents constituants d'un aérogénérateur ainsi que des notions sur le vent. Ensuite, nous avons présenté un état de l'art sur les générateurs électriques à savoir la génératrice synchrone, asynchrone et un intérêt particulier a été consacré à la technologie d'éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation et ses structures.

Le prochain chapitre, est consacré aux contraintes de raccordement des éoliennes au réseau électrique.

---

# Chapitre II

## Contraintes de raccordement des éoliennes au réseau électrique

---

## **II.1 Introduction**

A cause du caractère intermittent de la source primaire, les centrales éoliennes ne participent pas aux services systèmes (réglage de la tension, de la fréquence...qui sont généralement assurés par les sources traditionnelles). Ainsi, le système éolien produit des puissances fluctuantes qui peuvent affecter la stabilité du réseau garantie par l'équilibre entre la puissance générée et la puissance consommée. Donc, l'intégration de production éolienne au réseau électrique doit répondre aux contraintes techniques de raccordement afin de garantir le bon fonctionnement du système électrique.

Ces différentes contraintes, les problèmes induits par l'intégration des générateurs éoliens dans le réseau électrique ainsi les réglementations techniques de raccordement feront l'objectif de ce chapitre.

## **II.2 Qualité de l'énergie électrique**

### **II.2.1 Définition**

La qualité de l'énergie désigne la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs essentiels que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service [20].

- La continuité d'alimentation recouvre les coupures ou interruptions du réseau. On distingue les coupures très brèves (entre 1 seconde et 3 minutes) des coupures longues (supérieures à 3 minutes).
- La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions, les variations de fréquence...etc.
- La qualité de l'énergie dépend aussi de la qualité de service qui caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau (délais de mise en service, délais d'intervention d'urgence, délais de raccordement...).

### **II.2.2 Différents types de perturbations affectant le réseau électrique**

#### **II.2.2.1 Les creux de tension**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension, en un point de réseau électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1% (selon la norme CEI 61000-2-1, CENELECEN 50160) d'une tension nominale, ou entre 90 % et 10 % (selon la norme IEEE

1159) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz et 8.33 ms à 60 Hz) et une minute [21]. Les creux de tension se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude, ils ont pour principale origine des courts-circuits.

L'exemple de la Figure II.1, représente le cas d'un creux de tension de 15% affectant une phase du réseau électrique dans un intervalle de temps de [0.1, 0.2].

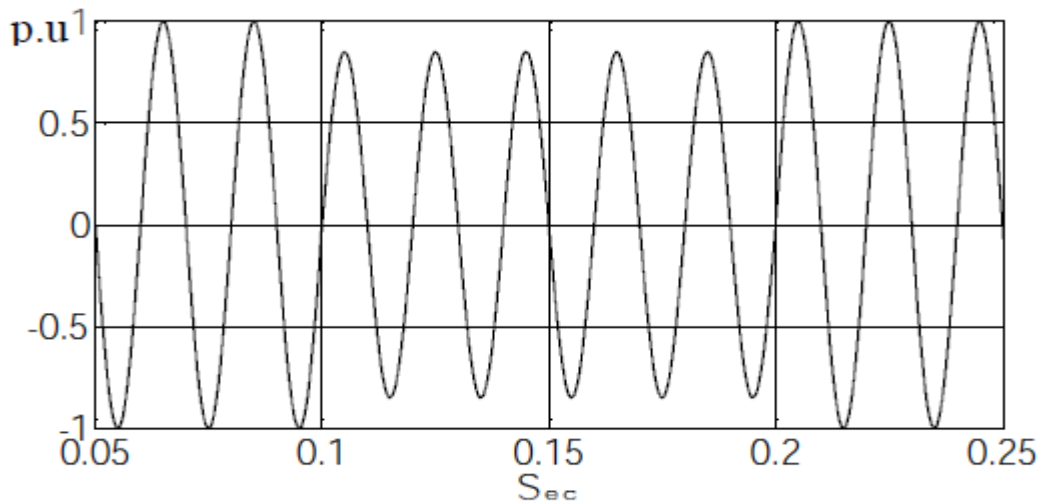


Figure II.1 - Creux de tension

### II.2.2.2 Les surtensions

On dit une surtension lorsque la valeur efficace de la tension dépasse la valeur nominale suivi d'un rétablissement de la tension après une courte durée.

Les surtensions sont de nature temporaire, de manœuvre ou d'origine atmosphérique (court-circuit, débranchement des charges importantes, la foudre ...).

### II.2.2.3 Variations et fluctuations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale.

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [22].

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas  $\pm 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).

La figure II.2 donne l'allure d'une tension en présence d'un flicker.

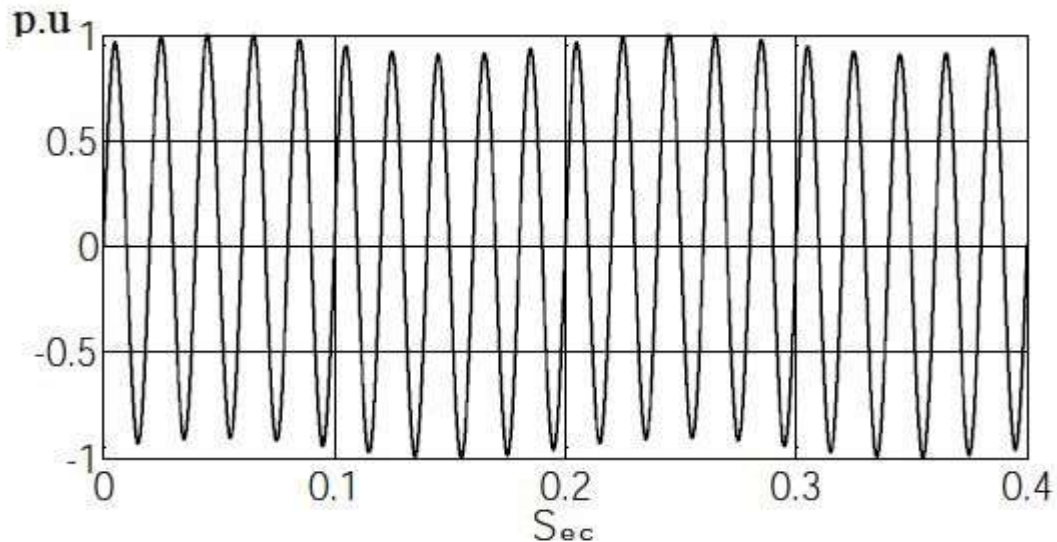


Figure II.2-Tension d'une phase en présence d'un flicker

#### II.2.2.4 Les déséquilibres

On dit qu'un système triphasé est déséquilibré si les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres d'un angle de  $\frac{2\pi}{3}$ .

Parmi les principaux effets de déséquilibre, on cite le sur-échauffement des machines asynchrones triphasées. En effet, la réactance inverse d'une machine asynchrone est équivalente à sa réactance pendant la phase de démarrage. Le taux de déséquilibre en courant sera donc plusieurs fois celui de la tension d'alimentation. Les courants de phase peuvent alors différer considérablement. Ce qui accroît l'échauffement de la ou des phases parcourues par le courant le plus élevé et réduit la durée de vie de la machine [22].

#### II.2.2.5 Les harmoniques et les inters harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont les fréquences correspondent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 ou 60 Hz) [23].

Les harmoniques de tension proviennent principalement des charges non linéaires. En effet, ces charges (comme par exemple les charges industrielles : variateur de vitesse ...) sont, en général, constituées par des éléments d'électronique de puissance qui imposent un courant riche en harmoniques. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau

créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source.

La Figure II.3 montre la forme d'onde d'une tension triphasée formée par la fondamentale (50Hz) et les harmoniques d'ordre 3 et 5.

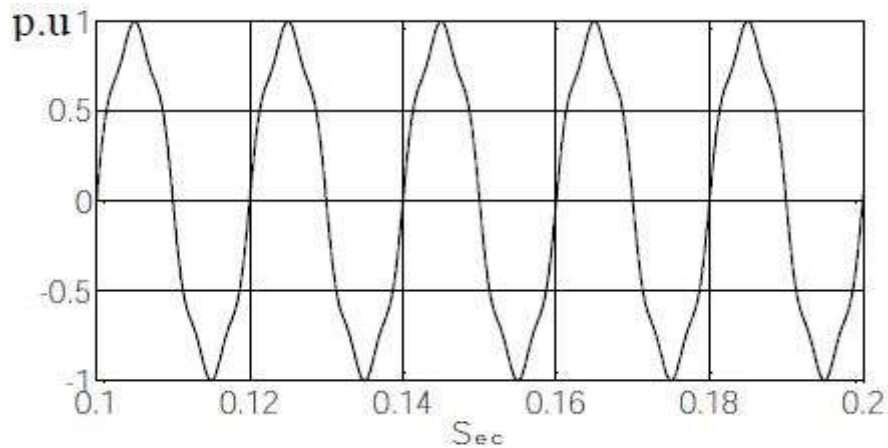


Figure II.3 - Forme d'onde d'une tension d'une phase en présence des harmoniques

Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de celle du fondamentale sont nommées les inter-harmoniques.

### II.2.2.6 Variations de fréquence

La fréquence doit être toujours contrôlée et maintenue à  $\pm 0,5$  Hz autour de 50 Hz ou 60Hz dans certains pays [24]. Une variation en dehors de cette plage, des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître.

## II.3 Contraintes de raccordement des éoliennes au réseau de transport

Les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique sont précisées dans des décrets et des arrêtés [25]. Le décret présente quelques considérations générales sur ces contraintes de raccordement :

- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement. Ainsi, elles doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr (réglage primaire et secondaire de la tension et de la fréquence...).

- les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.
- Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport.

L'arrêté précise ces contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Nous allons évoquer quelques contraintes dans ce qui suit [20], [25], [26].

### – **Réglage de la tension**

Toutes les unités de production, y compris les éoliennes, doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison.

### – **Réglage de la fréquence**

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour des installations de production mettant en œuvre de l'énergie fatale telles que les fermes éoliennes.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien, car ce réglage est reporté sur les groupes traditionnels. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien pourraient donc évoluer.

### – **Couplage et perturbations**

Le couplage de l'installation au réseau doit respecter des contraintes sur la fréquence, l'amplitude et la phase de la tension et ne doit pas affecter la stabilité du réseau.

Les perturbations produites par l'installation au point de raccordement doivent être limitées en ce qui concerne les à-coups de tension, le flicker, les déséquilibres et les harmoniques.



## **II.4 Problèmes induits par l'intégration de l'éolienne dans le réseau de transport**

Le gestionnaire de réseau électrique doit assurer la sécurité de ce réseau, ainsi la stabilité de la fréquence et de tension. Cependant, L'insertion des générateurs éoliens dans le réseau électrique pose plusieurs problèmes conduisant à des perturbations du signal électrique. Parmi ces problèmes :

- Production aléatoire et imprévisible des fermes éoliennes due aux incertitudes de prévision de la vitesse du vent ;
- Sensibilité des générateurs éoliens aux perturbations du réseau, donc une déconnexion intempestive et rapide lors d'un creux de tension par exemple ou lors d'une variation de fréquence ;
- Qualité dégradée de l'énergie produite.

## **II.5 Principales réglementations techniques pour la connexion des éoliennes au réseau électrique**

La connexion des fermes éoliennes au réseau électrique est conditionnée par des exigences imposées par le gestionnaire de réseau. Ces exigences concernent notamment les modes de contrôle des puissances active et réactive qui sont classés en plusieurs types [15] :

### **II.5.1 Contrôle de la puissance active**

Dans ce mode de contrôle, la puissance active produite par la ferme ne doit pas dépasser un niveau maximum prédéfini par le gestionnaire de réseau, même en présence d'un surplus de puissance aérodynamique disponible. Au-dessous de ce maximum, la ferme est contrôlée en MPPT pour fournir son maximum de puissance. La raison principale sollicitant ce mode de contrôle par le gestionnaire de réseau est d'éviter de payer le surplus de puissance au producteur éolien lorsqu'il n'y a pas assez de consommation. Sinon, le gestionnaire doit exporter l'excès de puissance aux réseaux électriques voisins gratuitement [15].

### **II.5.2 Contrôle de la puissance réactive**

De même que pour la puissance active, le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Les objectifs du contrôle de puissance réactive dans le réseau sont les suivants [14] :

- ✓ Générer/absorber une puissance réactive spécifique ;
- ✓ Contrôler la tension au point de raccordement.

### II.5.3 Allocation d'une puissance de réserve

La capacité du système à établir l'équilibre entre l'offre et la demande en énergie sure tout en période de pointe exige l'allocation d'une puissance de réserve qui oblige la ferme d'être capable d'augmenter sa production. Ceci limite la production électrique en dessous de la puissance disponible avec une puissance de réserve fixe  $\Delta P$  déterminée par le gestionnaire. Par ailleurs, ce contrôle peut aider à réduire les fluctuations de la puissance active [15].

### II.5.4 Contrôle de la puissance pour la protection du système

Ce type de contrôle est sollicité pour protéger le système électrique lorsqu'il y a une surcharge du réseau électrique. Dans ce cas, le gestionnaire de réseau exige la réduction de la production de la ferme d'une manière rapide [14], [15].

### II.5.5 Contrôle de la tension

Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT (ou HTB), les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive. C'est pourquoi, il est demandé aux éoliennes actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive. Ce réglage est possible avec les éoliennes connectées au réseau via une interface de l'électronique de puissance pour les structures à vitesse variable [25], [26].

Le contrôle de la tension en contrôlant la puissance réactive peut être expliqué par un modèle simple du système de puissance composé d'un générateur à l'extrémité 1 (poste source), d'une ligne de puissance et d'une charge à l'extrémité 2 (Figure II.4).  $V_1$  et  $V_2$  sont respectivement la tension à l'extrémité 1 et à l'extrémité 2.

La ligne électrique a une résistance  $r$  et une réactance  $x$ .  $P$  et  $Q$  représentent respectivement, les puissances : active et réactive transmises à l'extrémité 2.

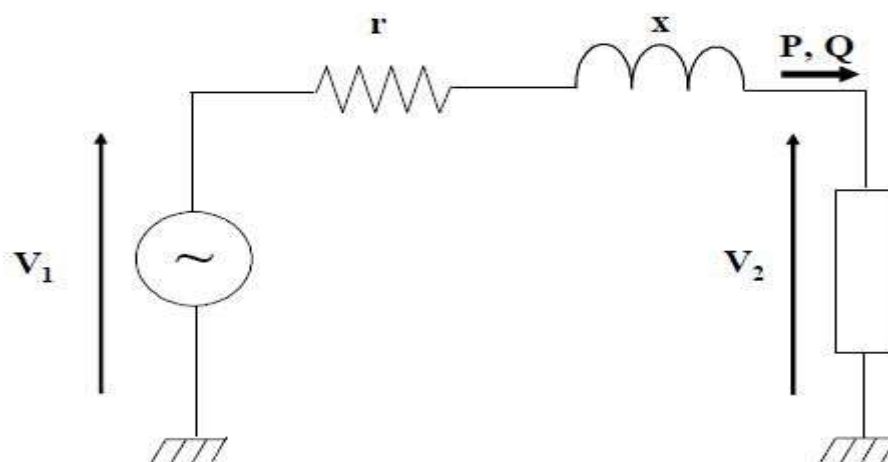
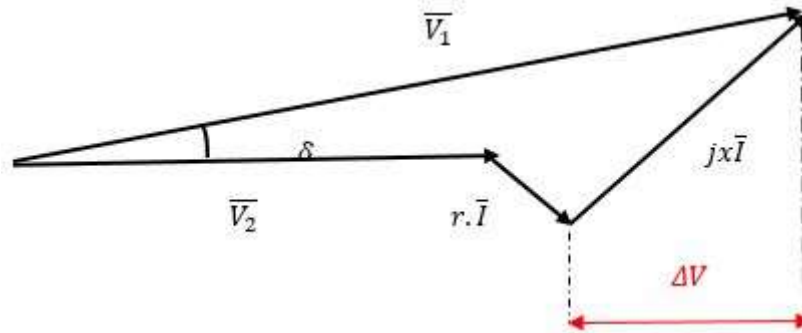


Figure II.4 - Schéma équivalent simplifié d'une ligne de transport

D'après la figure II.5, et en supposant que le déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$  est petit, la chute de tension est donnée par :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{r.P + x.Q}{V_1} \quad (\text{II. 1})$$



FigureII.5 - Diagramme des tensions équivalentes d'une ligne de transport

En générale, dans le réseau de transport, la résistance est négligeable devant la réactance ( $x \gg r$ ) donc l'équation (II.1) devient :

$$\Delta V \approx \frac{x.Q}{V_1} \quad (\text{II. 2})$$

L'équation II.2 montre bien que le contrôle de la tension dans les réseaux de transport se fait par le contrôle de la puissance réactive transitée le long de la ligne.

Les fermes éoliennes à base de MADA peuvent aisément contrôler la tension rotorique via le contrôle de la puissance réactive transmise au réseau électrique.

### II.5.6 Contrôle de la fréquence

L'un des objectifs majeurs du contrôle des systèmes de puissance est de maintenir l'équilibre entre la puissance électrique produite et celle consommée .En fonctionnement normal, la fréquence est homogène sur l'ensemble du réseau .En cas d'évolution des charges ou des générateurs, pour ajuster la production à la demande, il convient de régler la fréquence. Le gestionnaire de réseau dispose de trois niveaux de réglage de la fréquence à savoir le réglage primaire, secondaire et tertiaire [27].Citons par exemple le réglage primaire :

Le réglage primaire de la fréquence est basé sur le constat qu'un déséquilibre entre la production et la consommation induit une variation de fréquence due à la variation de vitesse des groupes alternateurs classiques. Le réglage primaire de fréquence est réalisé automatiquement au niveau des groupes de production. Il assure une correction rapide, en

quelques secondes [20]. Ce type de réglage est obligatoire pour tous les groupes de production classique raccordés au réseau de transport.

### **II.5.7 Maintien de la production lors des défaillances du réseau**

La majorité des éoliennes connectées au réseau électrique sont contrôlées soit pour fournir leur maximum de puissance au réseau, ou pour fournir une puissance active prédéterminée par le gestionnaire de réseau et satisfaire ainsi la puissance réactive demandée.

Cependant, ces éoliennes se déconnectent rapidement lorsqu'un défaut de court-circuit ou d'un creux de tension survient sur le réseau. Ceci conduit à un déséquilibre entre la puissance consommée et celle produite ce qui provoque de graves problèmes tel que la chute de fréquence. Si la réserve de puissance répartie sur l'ensemble du système électrique est insuffisante pour combler la puissance manquante, un black-out peut se produire [15], [25].

Afin de contribuer à la stabilité du réseau électrique, les éoliennes doivent être contrôlées pour rester connectées à ce dernier, même en présence d'une défaillance. Par conséquent, la reconfiguration des stratégies de contrôle des éoliennes doit être obligatoirement conforme à cet état de fonctionnement [14].

## **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées à l'étude de raccordement des éoliennes au réseau électrique. En premier lieu, nous avons commencé par des notions sur la qualité d'énergie électrique suivies par les différentes perturbations qui peuvent affecter le réseau. Ensuite, Les prescriptions techniques relatives au raccordement d'une ferme éolienne au réseau de transport sont traitées en citant quelques problèmes induits. Enfin une présentation des principales réglementations liées à la connexion Eolien-Réseau, qui sont imposées par le gestionnaire de réseau.

Le prochain chapitre a pour objectif la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et le réglage des puissances en appliquant une commande adaptative basée sur la logique floue.

---

# Chapitre III

## Réglage des puissances statoriques de la MADA

---

### **III.1 Introduction**

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché [28]. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle [29].

Ce chapitre est composé de deux parties, la première partie est consacrée pour la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, une deuxième pour la théorie de la logique floue et l'application de l'adaptation des paramètres d'un contrôleur PI par logique floue sur notre système de conversion éolien.

### **III.2 Modélisation de la MADA**

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation reste identique à celle d'une machine asynchrone à cage, sauf que dans ce cas le rotor n'étant pas mis en court-circuit.

#### **III.2.1 Hypothèses simplificatrices**

Avant d'aborder la modélisation de la MADA, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [30] :

- La saturation du circuit magnétique, les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligeables ;
- On admet que le flux créé par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale ;
- La construction de la machine est symétrique ;
- L'entrefer est constant ;
- Les effets complexes tels que l'effet de peau sont négligeables.

Ces hypothèses signifient que [31] :

- Les flux sont additifs ;
- Les inductances propres sont constantes ;
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

### III.2.2 Mise en équation dans le plan (d-q)

Le modèle de la GADA dans un référentiel diphasé (d-q) lié au champ tournant, peut être développé à partir de ces équations électriques magnétiques et mécaniques fondamentales [7], [12], [32], [33] :

#### - Equations électriques des tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$R_s, R_r$ : sont respectivement les résistances statoriques et rotoriques.

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$  : Les composantes directes et en quadratures des tensions statoriques et rotoriques.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$ : Les composantes directes et en quadratures des courants statoriques et rotoriques.

$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}$ : Les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques.

#### - Equations magnétiques des flux statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$L_s = l_s - m_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - m_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{max}$  : Inductance magnétisante.

$l_s, l_r$  sont les inductances propres d'une phase, alors que  $m_s$  et  $m_r$  sont les inductances mutuelles entre deux phases de la même armature.

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

- **Equation mécanique**

L'équation fondamentale de la dynamique de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{III.5})$$

Où :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$J$  : Le moment d'inertie de la partie tournante.

$f$  : Le coefficient des frottements visqueux.

$\Omega$  : vitesse mécanique de la machine.

- **Equation du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{III.6})$$

Les puissances actives et réactives des deux armatures sont données par les expressions suivantes

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} \cdot I_{dr} - V_{dr} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

### III.3 Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances : active et réactive de la MADA, en commandant séparément le flux et le couple électromagnétique. Son principe est basé sur le choix du référentiel lié aux flux qu'on veut l'orienter.

#### III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

En choisissant un référentiel diphasé (d-q) lié au champ tournant et en alignant le vecteur flux statorique  $\vec{\Phi}_s$  sur l'axe direct comme le montre la figure III.1, ce qui permet d'écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$



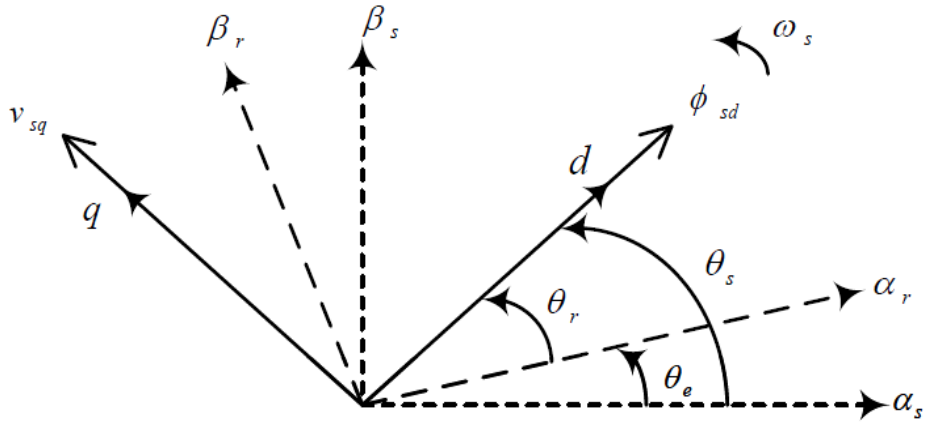


Figure III.1 - Principe d'orientation du flux statorique [13]

En remplaçant l'équation (III.9) dans (III.3), nous obtenons :

$$\begin{cases} \varnothing_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} = \varnothing_s \\ \varnothing_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} = 0 \end{cases} \quad (III.10)$$

A partir de l'équation (III.10), les expressions des courants statoriques sont :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varnothing_s - M \cdot I_{dr}}{L_s} \\ I_{qs} = \frac{-M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.11)$$

L'équation (III.6) du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = -p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varnothing_s \cdot I_{qr} \quad (III.12)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\varnothing_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (III.12) montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$ .

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques  $R_s$ , hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne [34], les équations (III.1) des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varnothing_s \end{cases} \quad (III.13)$$

L'adaptation d'équation (III.7) des puissances active et réactive au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant les expressions des courants statoriques (III.11) dans les expressions de puissances (III.14), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \cdot \emptyset_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Sachant que :  $\emptyset_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ , l'expression de la puissance réactive devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \quad (\text{III.16})$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

D'abord nous exprimons les flux rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.4) les courants statoriques par leurs expressions de l'équation (III.11) :

$$\begin{cases} \emptyset_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \emptyset_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Ces expressions des flux rotoriques sont intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.2). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Avec :  $\omega_r = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s$

En régime permanent, les dérivées des courants rotoriques s'annulent, donc le système d'équation (III.18) devient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - e_q \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + e_d + e_{fe} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Sachant que :

$$e_q = g \cdot \omega_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \quad (\text{III. 20})$$

$$e_d = g \cdot \omega_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} \quad (\text{III. 21})$$

$$e_{fe} = g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \quad (\text{III. 22})$$

$e_q, e_d$  : Termes de couplage entre les deux axes  $d$  et  $q$ .

$e_{fe}$  : Force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des équations (III.15), (III.16) et (III.18), il est possible de décrire le schéma bloc ci-dessous de la MADA qui sera le bloc à réguler par la suite.

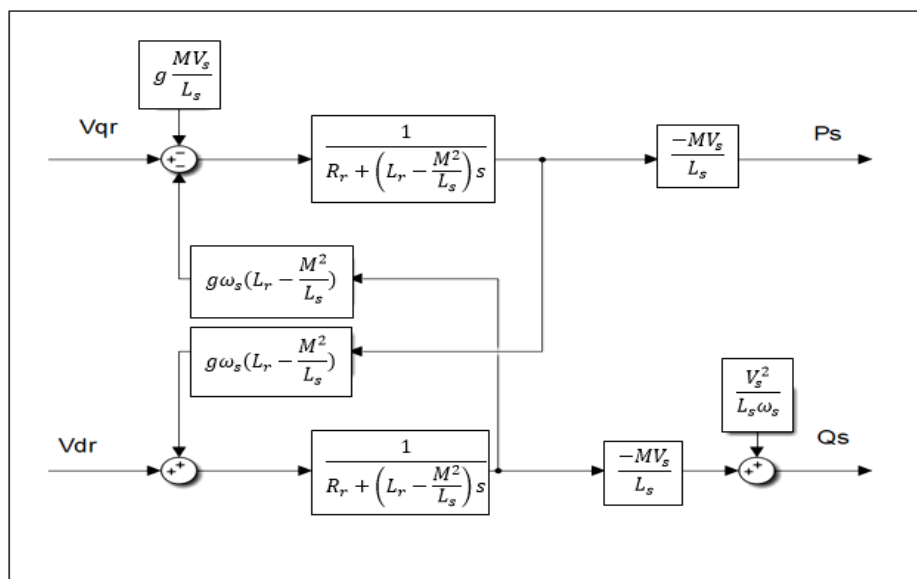


Figure III.2 - Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne)

Dans ce schéma nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances statoriques. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs PI [35].

### III.3.2 Commande directe

La tension de réseau étant considérée comme constante, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque axe avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage entre les deux axes, une synthèse adéquate des régulateurs permettra de les compenser. Ce principe de commande est montré dans la figure III.3

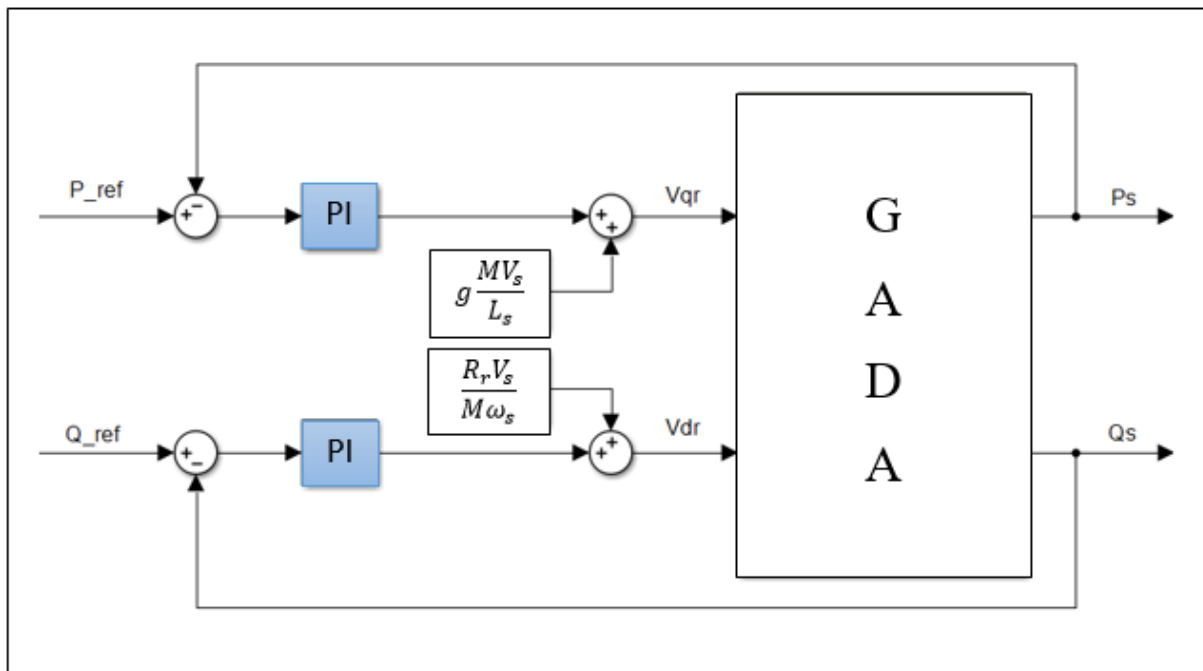


Figure III.3 - Schéma bloc de la commande directe des puissances de la GADA

### III.3.3 Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à construire un schéma bloc permettant le contrôle des puissances statoriques et les courants rotoriques. En combinant les différentes équations établies précédemment, nous pouvons exprimer les tensions du rotor en fonction des puissances statoriques. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans sens inverse.

#### III.3.3.1 Commande indirecte sans boucle de puissance

En gardant toujours les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine [19],[34]. Le système de régulation est illustré dans la figure III.4.

A partir des équations (III.15), (III.16) de la puissance active et réactive statorique, on déduit les expressions des courants rotoriques de référence :

$$\begin{cases} I_{dr\_ref} = \frac{-L_s}{M.V_s} Q_{s\_ref} + \frac{V_s}{M.\omega_s} \\ I_{qr\_ref} = \frac{-L_s}{M.V_s} P_{s\_ref} \end{cases} \quad (III.23)$$

Avec :

$I_{dr\_ref}$  et  $I_{qr\_ref}$  : sont les composantes directe et en quadrature du courant rotorique.

$P_{s\_ref}$  et  $Q_{s\_ref}$  : sont les puissances active et réactive de référence.

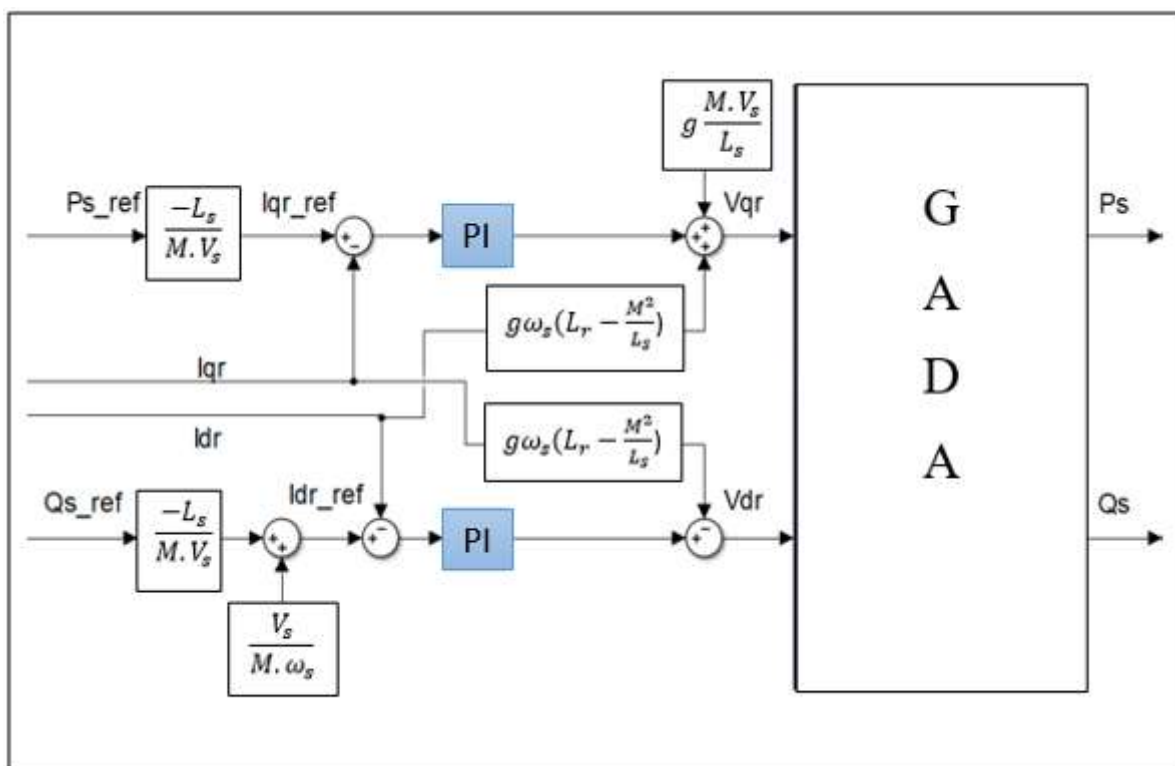


Figure III.4 - Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance

### III.3.3.2 Commande indirecte avec boucle de puissance

Dans le but d'améliorer la commande directe, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des courants afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté à la figure III.5 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance [15].

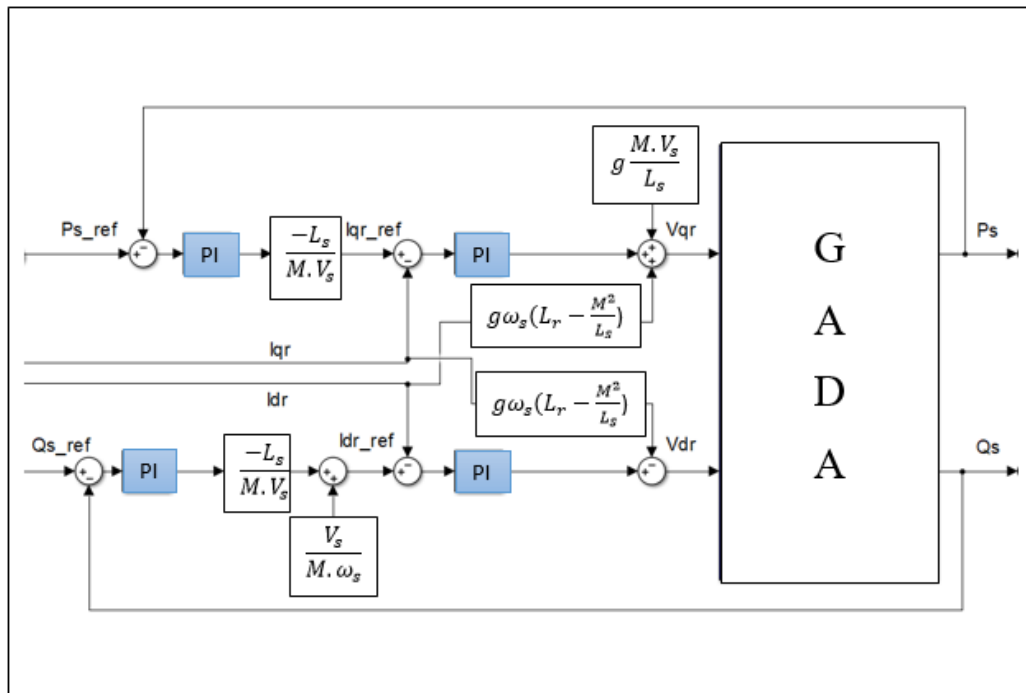


Figure III.5 - Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

### III.4 La logique floue

La première apparition de la logique floue était en 1965 par le professeur d'automatique Lotfi Zadeh qui a publié l'article "fuzzy sets" dans lequel il a développé la théorie des ensembles flous et introduit le terme fuzzy dans la littérature technique [36]. Ce professeur a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme flous, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle [29].

La première expérimentation de cette théorie est faite par M.Mandani qui a commandé une chaudière à vapeur par cette logique en 1974. Après cette réussite plusieurs applications ont vu le jour comme la régulation de fours de cimenterie en 1978 par la société Smidt-Fuller, elle a été considérée comme la première véritable application industrielle de la logique floue [9].

Et à partir de la fin des années 1980 et début des années 1990, de nombreux produits utilisant cette technique ont vu le jour dans les pays industrialisés notamment au Japon. En 1995 grâce à Jang, l'application de la logique floue s'élargit aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle [29], [37].

### III.5 Principe de la logique floue

La logique classique ou bien la logique de Boole est utilisée dans la résolution de plusieurs problèmes de régulations industrielles. Cette technique est basée sur la connaissance

du modèle mathématique précis du système ce qui est parfois difficile et même impossible dans certains systèmes non-linéaires complexes. Cette limite de la logique classique a poussé les automaticiens à trouver d'autres techniques de régulation qui s'adaptent avec ce type de systèmes et aussi aux données incertaines et imprécises, parmi ces techniques on trouve la logique floue.

L'idée de la logique floue est de capturer l'imprécision de la pensée humaine et de l'exprimer avec des outils mathématiques appropriés. La résolution d'un problème exige la recherche d'un modèle qui est le plus objectif et le plus certain possible. Les modèles de notre cerveau peuvent être assez compliqués et également vagues, flous ou imprécis. L'homme ne raisonne pas comme l'ordinateur : au tout ou rien [29].

Dans la logique classique, les variables booléennes ne prennent que deux valeurs 0 ou bien 1 pour s'exprimer qu'une action est vraie ou fausse. En fait dans le monde réel certaines situations ne peuvent pas être classées en vrais ou faux mais par un raisonnement flou inspiré du raisonnement humain. Le raisonnement par logique floue prend en considération toutes les valeurs compris entre 0 et 1 en les exprimant en variables linguistiques pour assurer une flexibilité face aux imprécisions et incertitudes.

Pour modéliser un phénomène par la logique floue on fait appel à un algorithme du type {Si...alors...}. On peut prendre par exemple la prise d'une douche, Si l'eau de la douche est très chaude alors on ouvre le robinet pour régler la température. Si l'eau devient très froide alors automatiquement on fait tourner le robinet dans le sens inverse jusqu'à trouver la température appropriée de l'eau. En réalité, on ne connaît pas la température exacte de l'eau mais à l'aide des capteurs corporels, le cerveau transforme cette information en une sensation de confort et à partir de cela qu'on prend des décisions.

## III.6 Élément de base de la logique floue

### III.6.1 Ensemble floue

Dans un ensemble classique, l'appartenance d'un élément ne peut prendre que deux valeurs discrètes : 1 si l'élément appartient totalement ou bien 0 si l'élément n'appartient pas.

La fonction caractéristique de cet ensemble est définie comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Avec

$A$  : L'ensemble classique.

Par contre dans un ensemble flou, un élément peut aussi appartenir partiellement à ce dernier selon un degré d'appartenance.

Si on prend par exemple la qualité de la nourriture dans un restaurant et on compare les deux fonctions d'appartenance pour un ensemble classique et un ensemble flou, on obtient :

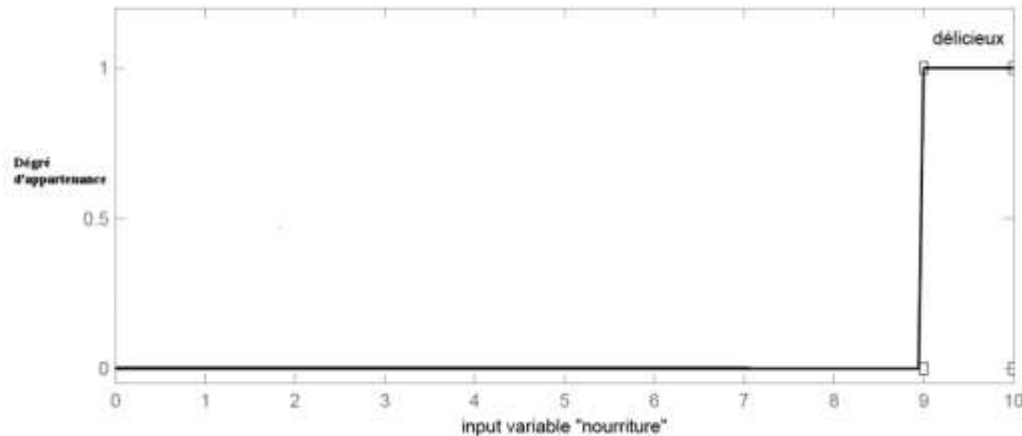


Figure III.6 - Fonction d'appartenance d'un ensemble classique

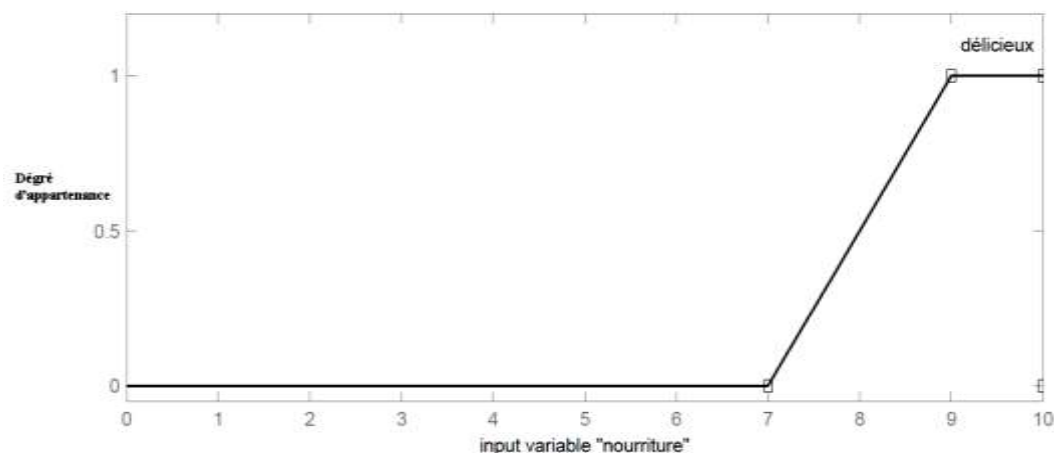


Figure III.7 - Fonction d'appartenance d'un ensemble flou

### III.6.2 Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est déterminé par une fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique. Elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou [38]. Une fonction d'appartenance permet la représentation d'une variable linguistique numériquement.

Il existe plusieurs formes de fonctions d'appartenance : monotones, triangulaires, gaussiennes, trapézoïdales, ...etc. Le choix de ces derniers dépend de l'application mais généralement les fonctions de forme triangulaire et trapézoïdale sont les plus utilisées.



La figure III.8 représente quelques formes de fonctions d'appartenance

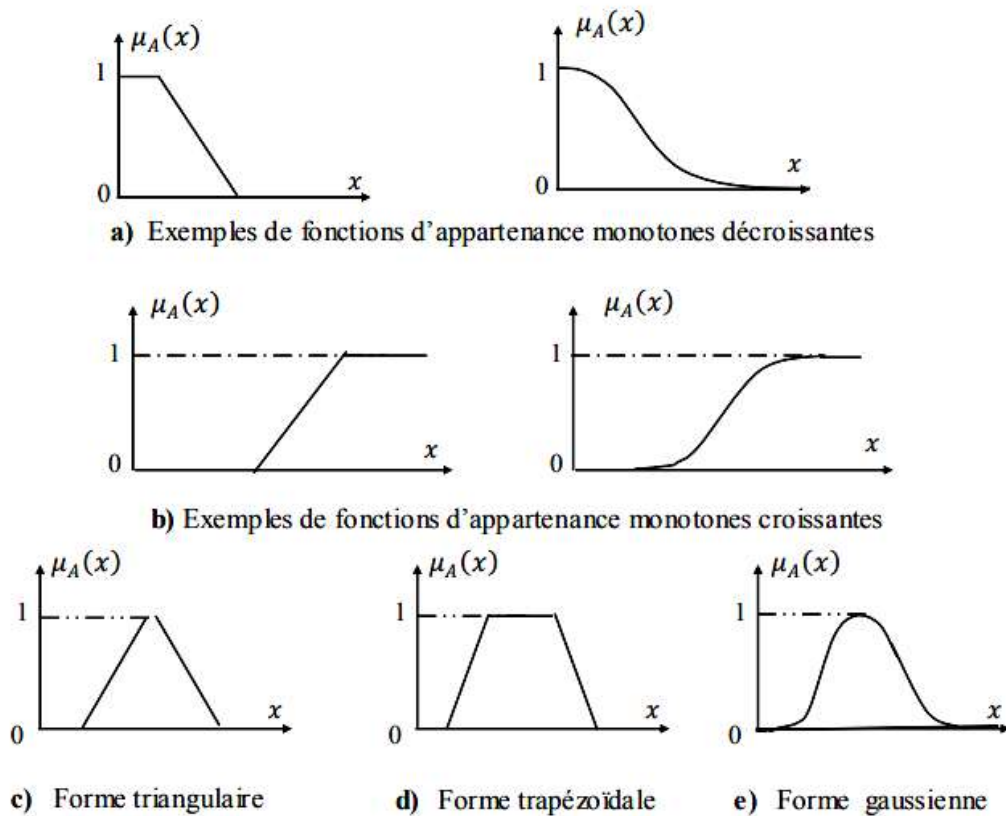


Figure III.8 - Quelques formes de fonctions d'appartenance[29]

### III.6.3 Univers de discours

Pour réaliser une application floue il faut d'abords définir l'univers de discours. L'univers de discours est la plage de variation possible d'une variable.

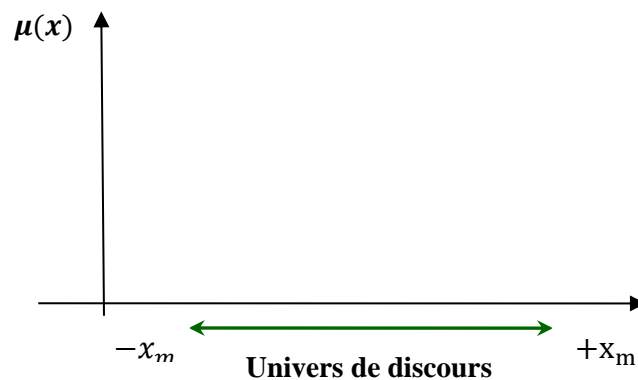


Figure III.9 - Représentation de l'univers de discours

### III.6.4 Variables linguistiques

Une variable linguistique comme son indique est l'ensemble des mots et expressions du langage naturel utilisé pour décrire un phénomène ou les variables du système ne sont pas numériques. La qualité de la nourriture dans un restaurant n'est pas mesurable par une variable booléenne.

Une variable linguistique est caractérisée par un triplé  $(x, T(x), U)$ .

Où :

$x$  : Le nom de la variable.

$T(x)$  : L'ensemble des valeurs linguistiques possibles de la valeur  $x$ .

$U$  : L'univers de discours.

Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours  $U = [0, 100]$  rd/s, et son ensemble de catégories floues  $T(\text{vitesse}) = (\text{lente}, \text{rapide}, \text{moyenne})$ . Ces trois ensembles flous peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance comme le montre la figure III.10 [29].

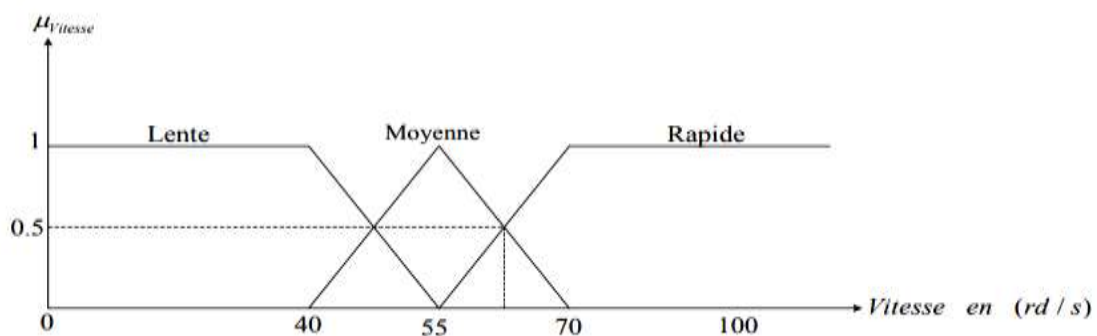


Figure III.10 - Représentation des trois ensembles flous

### III.6.5 Opérateurs de la logique floue

La combinaison entre les ensembles et les sous-ensembles flous nécessite l'utilisation des opérateurs mathématiques ressemblants aux opérateurs de la logique classique.

Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduits par les opérateurs "ET, OU, NON et Alors" respectivement [38]. Soit  $A$  et  $B$  deux ensembles flous (ou deux sous-ensembles flous), dont les fonctions d'appartenance sont  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  respectivement avec  $x$  est un élément de l'univers de discours  $U$  de deux fonction.

Le tableau III.1 représente quelques opérateurs flous utilisés le plus couramment :

<p><b>L'intersection ET</b></p> <p>L'intersection de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou dont les éléments <math>x</math> appartiennent à A et B en même temps.</p>	$\forall x \in U;$ $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
<p><b>L'union OU</b></p> <p>L'union de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou contenant les éléments <math>x</math> qui appartiennent à A ou appartiennent à B.</p>	$\forall x \in U;$ $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
<p><b>La complémentation NON</b></p> <p>Le complément de l'ensemble flou A est l'ensemble <math>\bar{A}</math> incluant les éléments <math>x</math> qui n'appartiennent pas à A</p>	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$

Tableau III.1 - Les opérateurs flous les plus utilisés

La figure III.11 représente l'application de l'opérateur 'ET' et 'OU' sur deux sous-ensembles flous.

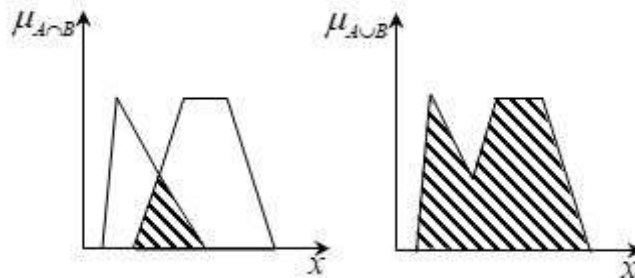


Figure. III.11 - Union et intersection de deux sous ensemble flous

Pour l'implication, elle se construit à partir des propositions floues élémentaires. Pour cette opération, il existe encore plusieurs méthodes. Les plus souvent utilisées sont données par le tableau suivant [29] :

Appellation	Implication floue
Zadeh	$\max \{ \min [\mu_A(x), \mu_B(y)], 1-\mu_A(x) \}$
Mamdani	$\min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$
Reichenbach	$1-\mu_A(x) + \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
Larsen	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$

Tableau III.2 - Implication floue

### III.7 Commande par logique floue

La commande par logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Par inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique [29].

La figure III.12 représente les étapes nécessaires pour la conception d'un régulateur flou.

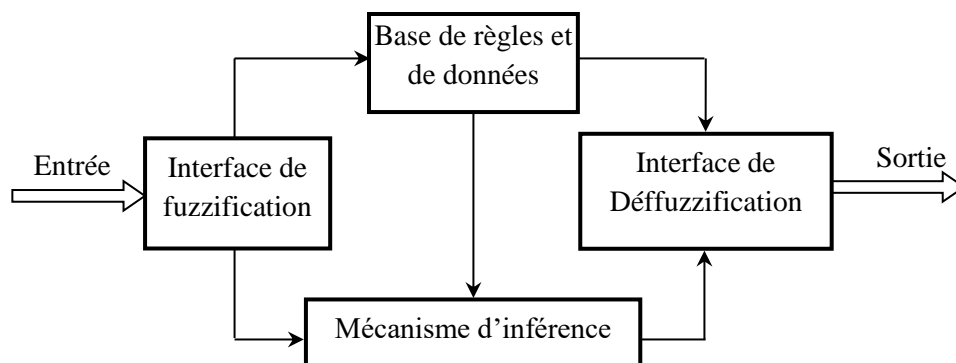


Figure III.12 - Structure d'un système de contrôle flou

#### III.7.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est la première étape dans la conception d'un régulateur flou, cette étape est consacrée à la conversion des grandeurs physiques en grandeurs linguistiques car les

mesures ou bien l'erreur et sa variation dans un système sont de nature numérique et aussi attribuées un degré d'appartenance aux variables linguistiques pour définir les fonctions d'appartenance.

Il n'y a pas de règle précise pour la définition de ces fonctions c'est pour cela que cette opération est introduite par des experts ou des opérateurs qualifiés, on peut introduire pour une variable linguistique trois, cinq ou sept valeurs linguistiques suivant la résolution qu'on souhaite (généralement, il ne faut pas dépasser sept valeurs linguistiques, car ceci compliquerait la formulation des règles d'inférence sans apporter une amélioration significative) [37].

La désignation standard des ensembles flous est montrée dans le tableau III.3.

NG	Négatif Grand
NM	Négatif Moyen
NP	Négatif Petit
EZ	Environ Zéro
PP	Positif Petit
PM	Positif Moyen
PG	Positif Grand

Tableau III.3 - Désignation standard des ensembles flous

### III.7.2 Interface d'inférence floue

Cette étape est composée en deux blocs : la base de règles et mécanisme d'inférence

➤ La base de règles, composé d'un ensemble de relations liant les variables d'entrées aux variables de sortie de ce système. Chaque relation est composée d'une condition précédée du symbole **Si** appelée prémisse, et d'une conclusion (action, décision, opération ou commande) précédée du symbole **Alors** [39].

➤ Mécanisme d'inférence, c'est la partie de traitement et interprétation de la base de règle pour obtenir la sortie floue du correcteur.

Les méthodes d'inférences se différencient selon la combinaison et l'utilisation des opérateurs flous (ET, OU) dans les règles d'inférence. Parmi ces méthodes on trouve :

- La méthode d'inférence Max-Min.
- La méthode d'inférence Max-Produit.

– La méthode d'inférence Somme-Produit.

Le tableau suivant illustre la façon d'utiliser ces méthodes :

Opérateurs flous Méthodes d'inférence	Opérateurs		
	ET	OU	Alors
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme -Produit	Produit	Moyenne	Produit

Tableau III.4 - Méthodes usuelles de l'inférence floue

La figure III.13 représente une inférence floue par deux méthodes :

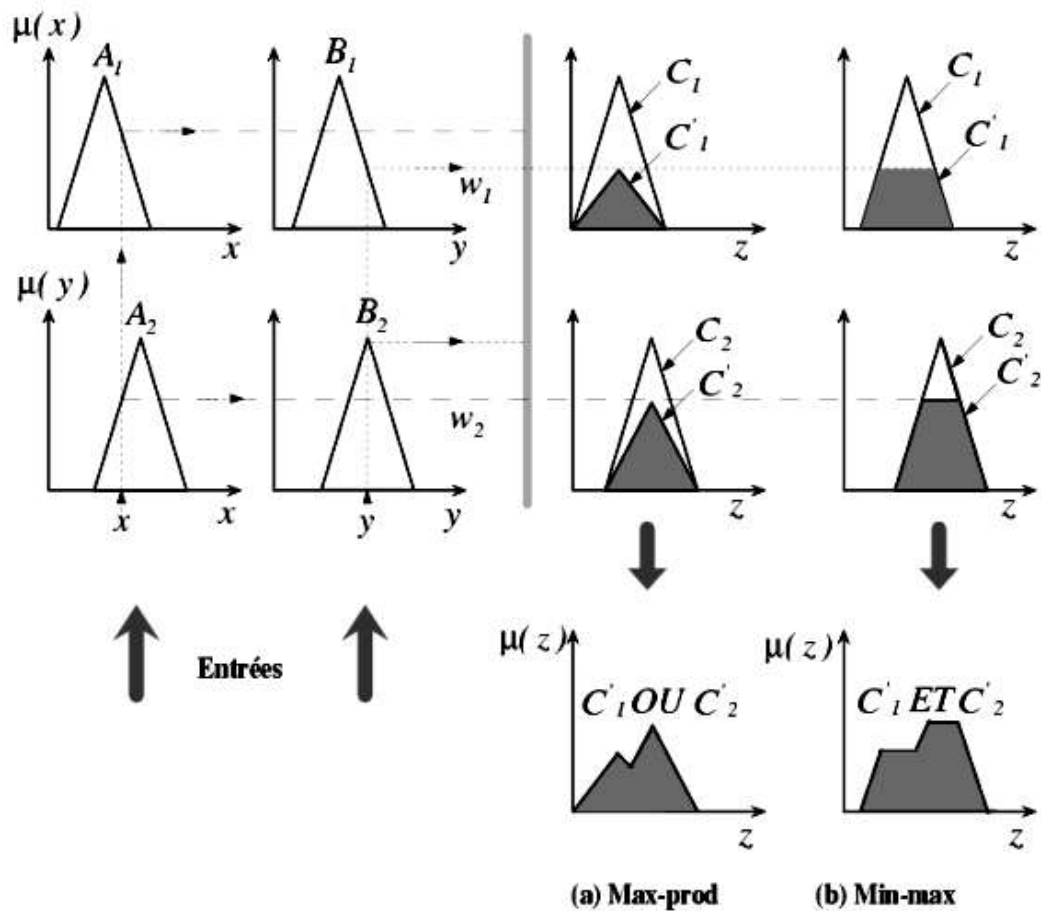


Figure III.13 - Inférence floue : a) Max-prod méthode b)Min-max méthode[37]

### III.7.3 Interface de défuzzification

La dernière étape dans la conception d'un contrôleur flou est la défuzzification. Elle consiste à transformer les fonctions d'appartenance de nature floue en une grandeur physique réelle qui est le signal de commande à appliquer au système. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, on cite :

- La méthode du centre de gravité (COG).
- La moyenne de maximum (MOM).
- La méthode des hauteurs pondérées.
- Le centre des aires.

La méthode du centre de gravité est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision malgré sa complexité puisqu'elle demande des calculs importants [29].

### III.8 Structure de base du contrôleur flou

Gains Sheduling est une technique qui agit sur les paramètres du régulateurs PI ( $K_p, K_i$ ) pour les faire varier lors du contrôle du système. Celle-ci rend le contrôleur PI adaptable aux systèmes non linéaires. Le schéma de principe de cette technique est illustré dans la figure III.14. Le contrôleur floue règle les paramètres du PI et lui génère de nouveaux paramètres afin qu'il s'adapte à toutes les conditions de fonctionnements, en se basant sur l'erreur et sa dérivée [40]. L'objectif de la loi d'adaptation est d'améliorer les performances de la commande des systèmes complexes et non-linéaires en exploitant les avantages des contrôleurs PI et ceux de la logique floue [41], [42].

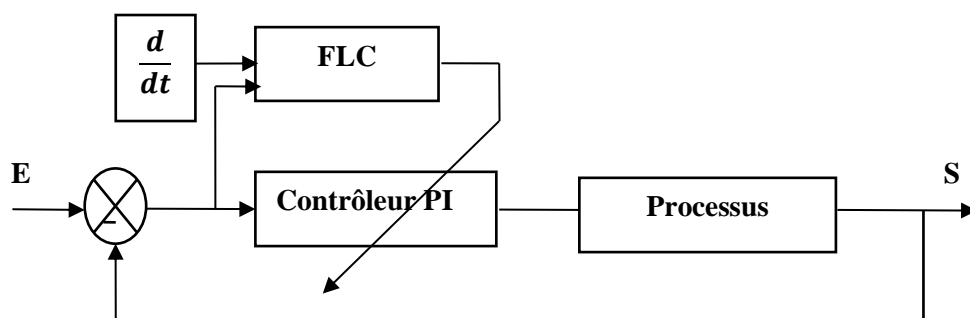


Figure III.14 - Principe d'adaptation du PI par la logique floue

La réalisation de ce contrôleur est faite en suivant les étapes qu'on a mentionnées précédemment [40] :

**1<sup>ère</sup> étape : Fuzzification**

- Les entrées du contrôleur flou FLC sont : l'erreur et la variation de l'erreur, les sorties sont la valeur normalisée de l'action intégrale  $K'_i$  et la valeur normalisée de l'action proportionnelle  $K'_p$ .
- Les deux entrées sont définies par le sous-ensemble flou suivant : GN, MN, PN, Z, PP, MP, GP, et les sorties par le sous-ensemble : P (Petit), G (Grand) sur l'intervalle.
- Les fonctions d'appartenances de ces variables sont définies sur l'intervalle [-1 1] pour les entrées (Figure III.15) et l'intervalle [0 1] pour les sorties (Figure III.16).

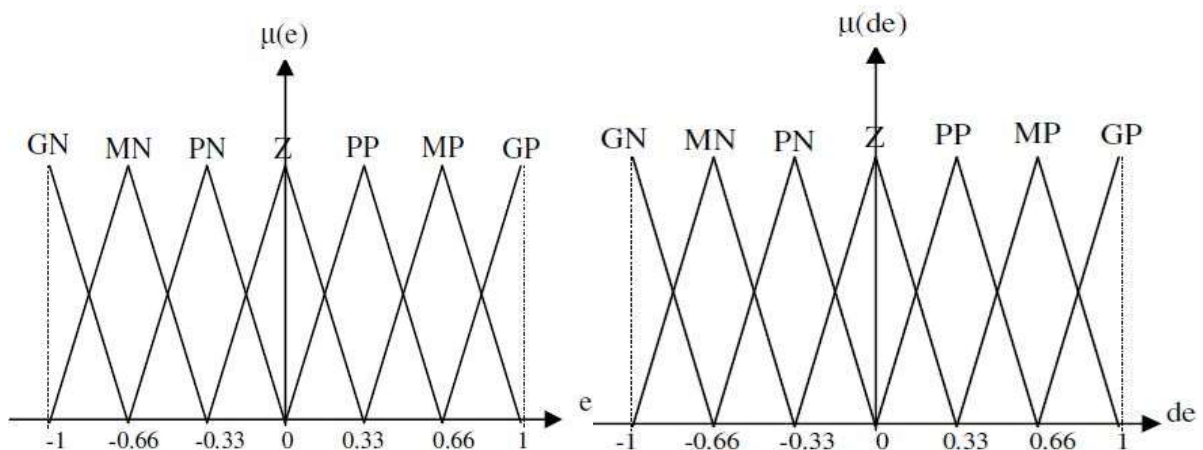


Figure III.15 – Fonction d'appartenance de l'erreur et sa dérivée

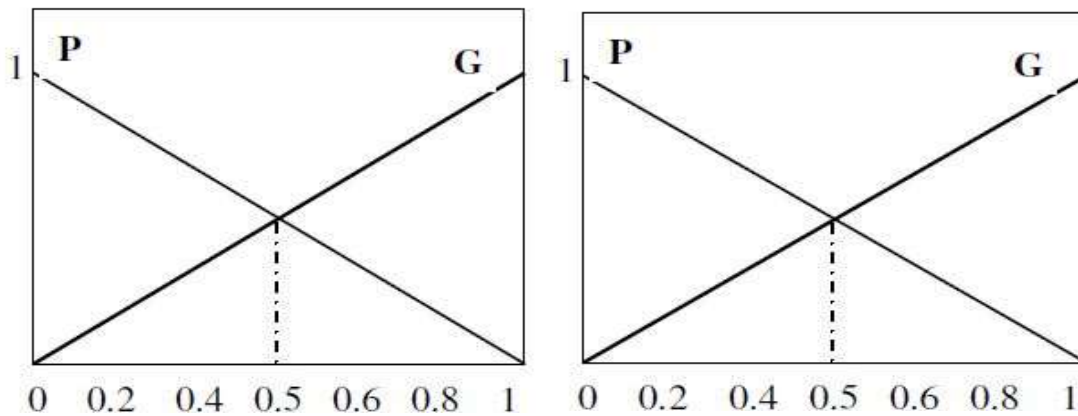


Figure III.16 – Fonction d'appartenance de  $K'_p$  et  $K'_i$

**2<sup>ème</sup> étape : Interface d'inférence floue**

- Les bases de règles utilisées pour le calcul de deux paramètres  $K'_i$  et  $K'_p$  sont présentées dans les deux tableaux ci-dessous.
- La méthode d'inférence utilisée est la méthode Max-Min.



<b>de</b> <b>e</b>	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
GN	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
MN	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
PN	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>P</b>
Z	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>
PP	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>P</b>
MP	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>
GP	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>

Tableau III.5 - Base de règle pour  $k_p'$

<b>de</b> <b>e</b>	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
GN	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
MN	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
PN	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
Z	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
PP	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
MP	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
GP	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>

Tableau III.6 - Base de règle pour  $k_i'$

### 3<sup>ème</sup> étape : Défuzzification

Pour la défuzzification, nous avons utilisé la méthode du centre de gravité car elle est la plus convenable à notre application.

Une fois, les deux paramètres de notre contrôleur PI flou sont calculés, nous passerons à l'étape d'adaptation. Les nouveaux  $K_i$  et  $K_p$  sont obtenus par les équations suivantes :

$$\begin{cases} k_p = (k_{pmax} - k_{pmin})k_p' + k_{pmin} \\ k_i = (k_{imax} - k_{imin})k_i' + k_{imin} \end{cases} \quad (III.25)$$

### III.9 Résultats de simulation

La simulation numérique de notre modèle a été effectuée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK dont les paramètres de la MADA sont mentionnés dans l'annexe A. afin de tester la régulation des puissances active et réactive, Nous avons appliqué une commande adaptative en remplaçant les PI classiques des schémas blocs de la commande directe et indirecte montrés dans les figures III.3, III.4 et III.5 par des régulateurs PI-floue. Le système a été soumis à des échelons de références.

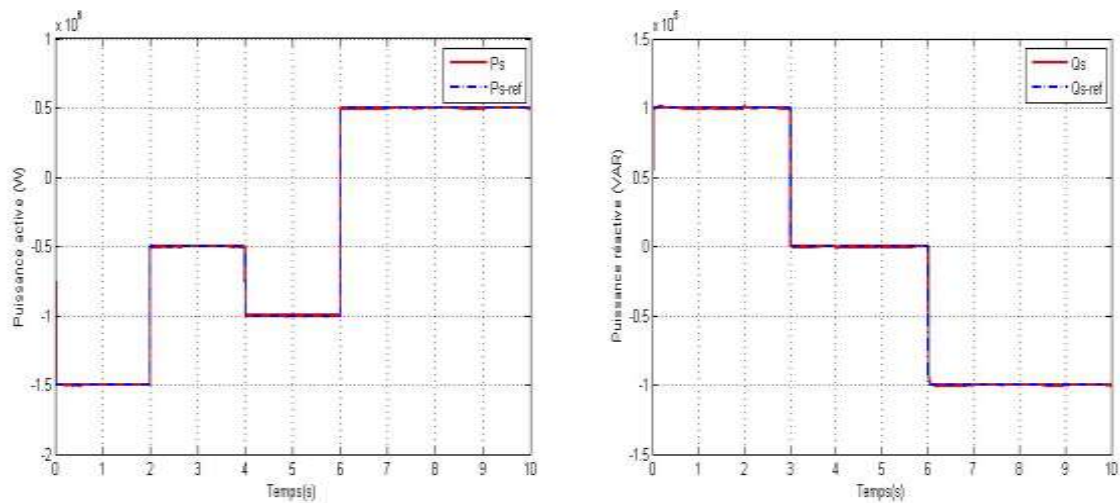


Figure III.17 - Puissances active et réactive obtenues par la méthode directe

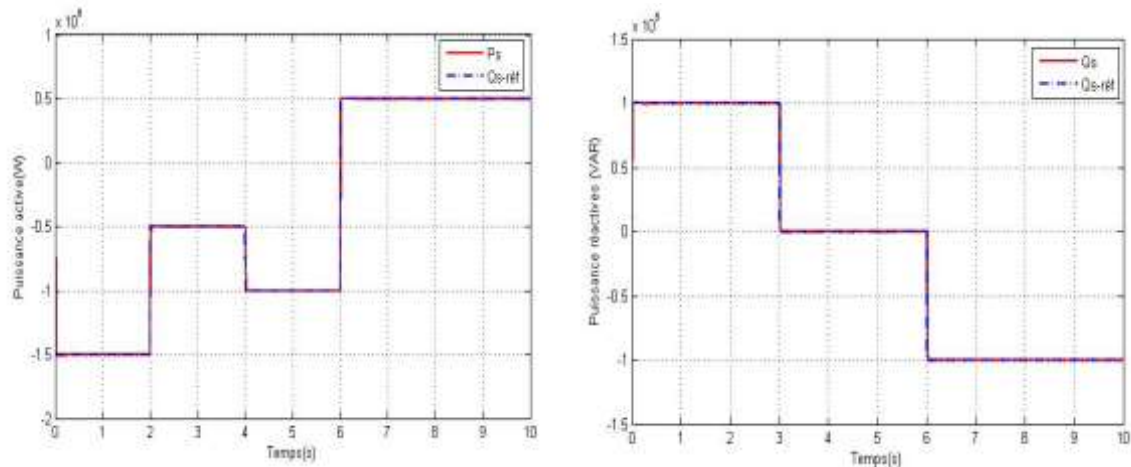


Figure III.18 - Puissances active et réactive obtenues par la méthode indirecte sans boucle de puissance

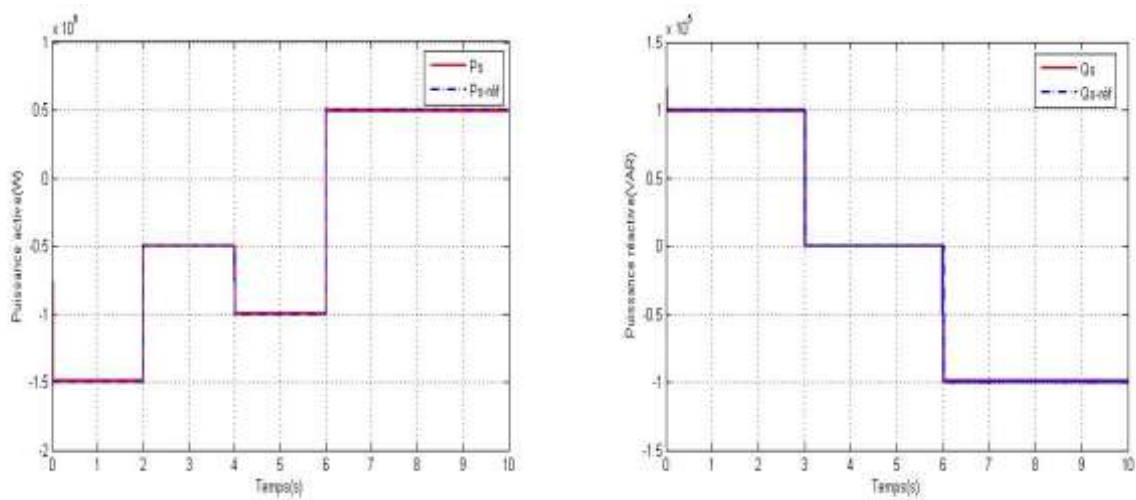


Figure III.19 - Puissances active et réactive obtenues par la méthode indirecte avec boucle de puissance

**– Interprétation**

Les figures ci- dessus présentent les réponses du système en appliquant une commande adaptative à base des concepts de la logique floue.

Les résultats obtenus nous montrent bien que les puissances active et réactive suivent les échelons de références avec une faible erreur au niveau de la commande directe.

On constate une amélioration de comportement du système au point de vue dépassement, temps de réponse et erreur statique. Donc, le réglage par une commande adaptative donne de très bonnes performances.

**– Comparaisons entre la commande avec un PI classique et un PI adaptatif flou**

La comparaison des performances entre les régulateurs (PI classique qu’est déjà appliqué au système dans le mémoire d’ingénieur et PI -floue) dans les deux régimes transitoire et permanent est basée sur les critères suivants :

- Le temps de réponse.
- Le dépassement.
- L’erreur statique.

Performance	Régulateur PI classique	Régulateur PI adaptatif flou
Temps de réponse (s)	0.033	0.02
Dépassement %	1.13	0.25
Erreur statique %	1.9	1.27

Tableau III.7 – Comparaison des performances des deux régulateurs

Une simulation, dont les résultats sont illustrés dans les figures en dessous nous montre une différence claire entre les deux régulateurs, cette différence apparait au niveau du temps de réponse, de dépassement et au niveau de l'erreur statique ce qui rend la régulation par un PI adaptatif plus rapide et stable par rapport à celle d'un PI classique.

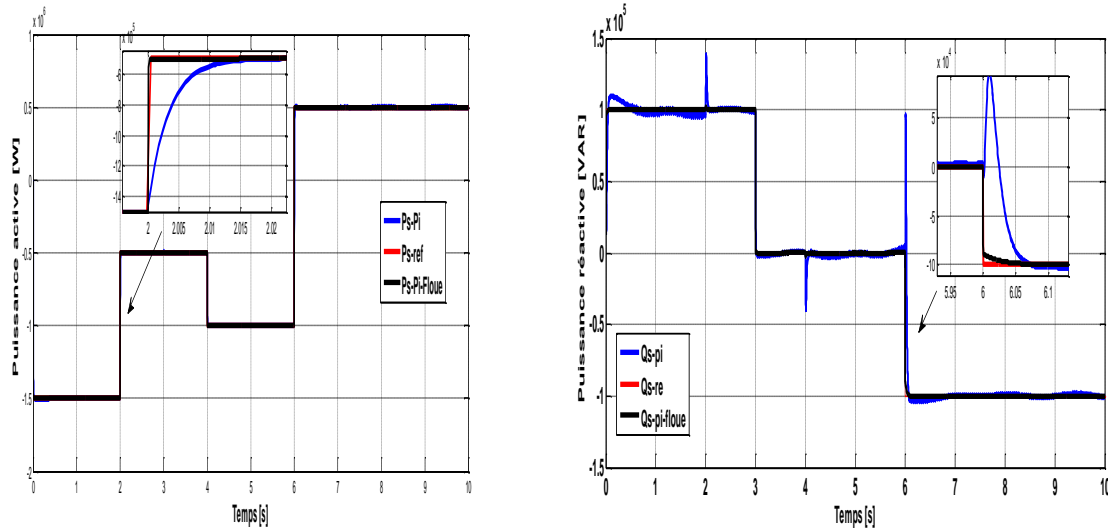


Figure III.20 – Réponse du système par la méthode directe en appliquant un PI et PI-flou

### III.10 Conclusion

Ce chapitre est réparti en deux parties. Dans la première, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a été exposée avec la commande vectorielle directe et indirecte. La théorie de la logique floue était la deuxième partie du chapitre où nous avons présenté l'historique, le principe de cette logique, ainsi que ses bases. Puis, nous avons passé à la commande adaptative à base de la logique floue et la conception d'un contrôleur flou pour réaliser une régulation de puissances actives et réactive. A la fin de ce chapitre, une interprétation des résultats et une comparaison entre la commande vectorielle classique et la commande adaptative nous permet de déduire qu'un système introduisant la logique floue est plus performant qu'un système classique mais il peut présenter une certaine difficulté dans son réglage.

---

# Conclusion générale

---

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et réaliser par la simulation numérique une commande adaptative pour la régulation des puissances active et réactive du générateur asynchrone à double alimentation (GADA), ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Cette commande robuste susceptible d'optimiser la production d'une éolienne, par conséquent, une amélioration de la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique.

Pour atteindre cet objectif, nous avons d'abord fait un rappel sur les systèmes éoliens et une présentation de l'unique centrale éolienne en Algérie. Ensuite, les différents types des générateurs ont été présentés où la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur choix pour la production éolienne de moyenne et grande puissance en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques. De plus, on a décrit brièvement la MADA et son principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré aux contraintes de raccordement des éoliennes avec le réseau électrique. Nous avons également cité quelques notions sur la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations pouvant affecter le réseau. Ensuite, nous avons traité les contraintes prises en compte pour raccorder une ferme éolienne au réseau de transport ainsi les problèmes rencontrés. A la fin de ce chapitre, les réglementations techniques imposées par le gestionnaire de réseau ont été présentées.

Dans le troisième chapitre nous avons abordé une commande adaptative au sein de la commande vectorielle directe et indirecte d'un générateur asynchrone à double alimentation. La modélisation de la MADA, son principe de fonctionnement et un rappel sur la commande vectorielle ont fait l'objet de la première partie de ce chapitre. Ensuite, un bref historique et la théorie de la logique floue ont été présentés. Afin, d'appliquer cette technique de commande proposée en utilisant la logique floue pour la conception du mécanisme d'adaptation et du régulateur de la boucle interne et externe.

Dans ce contexte, nous avons utilisé une MADA de puissance nominale 1.5 MW qui a été modélisée. Les performances du régulateur adaptatif par logique floue ont été testées. Les résultats obtenus par simulation montrent que la réponse en puissance poursuit correctement le modèle de référence choisi malgré les perturbations.

Ces résultats obtenus nous permettent à compléter les travaux de recherche faits par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de fonctionnement de système éolien étudié. Parmi ces perspectives :

- ✓ Utiliser d'autres types de convertisseurs tels que le convertisseur matriciel adapté aux grandes puissances.

## Conclusion générale

---

- ✓ Tester la robustesse de la commande face aux variations des paramètres de la machine.
- ✓ Appliquer d'autres techniques de commande pour améliorer les performances du système tels que : le mode glissant, le réseau de neurones...
- ✓ Validation du modèle développé et les stratégies de commande utilisées sur un banc expérimental.

---

# Références bibliographiques

---



- [1] <https://gwec.net/> , site internet de GWEC consulté le 18/08/2020.
- [2] A.TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra Algérie, 08 /12/2015.
- [3] A. TAMAARAT, A. BENAKCHA, « Performance de la commande des puissances active et réactive dans une éolienne basée sur une MADA », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 20 N°4, pp 635 – 647,2017.
- [4] <https://www.eia.gov/> , Site internet US-Energy Information Administration, Consulté le 15/02/2020 à 16 :00.
- [5] V.TRACHSEL, « L'énergie éolienne et solaire : alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain », Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, n° 31, Juillet 2007, Physique.
- [6] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, France, 2003.
- [7] A. CHEMIDI, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2015.
- [8] M. LOUCIF, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système d'aérogénérateur », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 12/05/2016.
- [9] F.Z .TRIA, « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA par différentes techniques », Mémoire de Magister, Université d'El-oued-Faculté de technologie, 2013.
- [10] M.RAPIN, M.N JEAN, « L'énergie éolienne », Dunod 2015.
- [11] F.BOUKLI HASSANE, « Gisement éolien », cours pédagogique, Ecole supérieure en sciences appliquées, Tlemcen, Algérie, 2019.
- [12] B. ROBYNS, A. DAVIGNY, B. FRANCOIS, A. HENNETON, J. SPROOTEN, « Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables », LAVOISIER 2012.
- [13] N.LACHGUER, « Gestion optimale des flux de puissance et amélioration de la qualité d'énergie des systèmes éoliens à base des machines : Asynchrone à double alimentation - Synchrone à aimants permanents », Thèse de doctorat, Université Kadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 2013.
- [14] A. KERBOUA, « Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique », thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 05/12/2013.

- [15] T.GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [16] I.OSMANI, O.MALTI, « Modélisation et commande indirect des puissances de la génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à un système éolien », Mémoire de Master, Université de Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [17] B. BOUKHEZZAR, « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse de doctorat, Université Paris XI, France, 2006.
- [18] A. MAMADIE SYLLA, « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation », Mémoire présenté à l'Université du Québec à Trois-Rivières, 2013.
- [19] O. DJAAFRI, A.HARIZI, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne », Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme Master Académique, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, Algérie, 2017.
- [20] A.DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies, Lille, France, 11/12/ 2007.
- [21] A DJOUDI, « Contribution à la conduite robuste d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat en science, Energie électrique. Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), 11/05/2016.
- [22] P.FERRACCI, « La qualité de l'énergie électrique », Cahier technique n°199, Schneider Electric, 2001.
- [23] F.KOUADRA, « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Mentouri-Faculté des Sciences de l'ingénieur, Constantine, Algérie, 2012.
- [24] K RAMZI, « Suivi De La Fréquence Du Réseau Électrique À L'aide D'une Carte Arduino », Mémoire de Master, Université des frères Mentouri - faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique, Constantine, Algérie, 2015.
- [25] B. ROBYNS, A. DAVIGNY, C. SAUDEMONT, A. ANSEL, V. COURTEECUISSE, B. FRANCOIS, S. PLUMEL, J. DEUSE, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », Journées du Club EEA, Supélec, 2006.
- [26] A. AHMIDI, « Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques », Thèse présentée en vue d'obtenir le grade de docteur en génie électrique, Ecole Centrale de Lille, 2010.

- [27] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005.
- [28] L.A. GACOGNE, « Logique Floue et Applications », Institut d'Informatique d'Entreprise d'Evry, Conservatoire National des Arts et Métiers, Ministère de l'Education Nationale Française, France, Novembre 2003.
- [29] Y.ELBIA, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté », Mémoire de Magister en Génie Electrique, Université de Batna, 2009.
- [30] A. MESAI, N.KAIS, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation- Apport des techniques de l'intelligence», Projet de fin d'étude pour l'obtention de diplôme Master en électrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 06/2017.
- [31] W. BENDEMMAGH, « Commande de la machine asynchrone par la cascade hypo synchrone à base des logiciels SIPLORER et MATLAB », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme Magister en électrotechnique, Université de Sétif 1, Algérie, 30/ 10/2013.
- [32] B. BENYACHOU, F.AIT OUHROUCH, K.GUERAOUI, B.BAHRAR, «Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation»,13<sup>ème</sup> Congrès de mécanique, Mecnès, Maroc, 11-14/04/2017.
- [33] N.HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en électrotechnique, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 24/01/2008.
- [34] S. ARDJOUN, « Commande d'un système d'énergies renouvelables multi-sources relié au réseau électrique », Thèse de doctorat en science, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 18/04/ 2016.
- [35] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, France, 2006.
- [36] I. GHADBANE, «Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider- Biskra, Algérie, 24 /02/2011.
- [37] F. HAMOUDI, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt `à Quatre Fils », Mémoire de Magister, Université EL Hadj Lakhder, Batna, Algérie, 01 /07/ 2008.
- [38] F.N. BENCHERIF, « Evaluation du risque d'accident vasculaire cérébral à l'aide de la logique floue », Mémoire de Master en informatique, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2014.
- [39] A.BENMOUSSA, A.ABADA, « Commande adaptative floue décentralisée pour une classe des systèmes non linéaires incertains », Mémoire Master Académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 18 /09/ 2019.

[40] M.CHEBRE, M.ZERIKAT, Y.BENDAHA, « Adaptation des Paramètres d'un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing- CIP'2007, Oran, 03-04/11/2007.

[41] A. TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra ,08/12/2015.

[42] M.DOUMI, A.AISSAOUI, A.TAHOOR, M.ABID, « Commande adaptative d'un système éolien», Rev.Roum.Sci.Techn. Electrotechn. Et Energ., 60, 1, p 99-110, Bucarest, 2015.

---

# Annexes

---

**Paramètres de la MADA****Tableau 1-** Les paramètres de la MADA

Nom	Valeur	Unité
Tension nominale	230/400	V
Puissance nominale	1.5	MW
Fréquence nominale	50	Hz
Nombre de paires de pôles	2	
Vitesse nominale	1500	tr/mn
Résistance statorique	0.012	$\Omega$
Résistance rotorique	0.021	$\Omega$
Coefficient d'inductance statorique	0.0137	H
Coefficient d'inductance rotorique	0.0136	H
Coefficient d'inductance mutuelle	0.0135	H
Moment d'inertie	0.3125	Kg.m <sup>2</sup>

## Application de la transformation de PARK à la MADA

Rappelons d'abord le modèle mathématique de la MADA dans le plan triphasé (abc), après on passe à la modélisation dans le plan diphasé (d-q) à travers la transformée de PARK.

### A. Mise en équation dans le plan (abc)

La représentation schématique de la machine à rotor bobiné dans le repère triphasé est donnée par la figure 1, notant que les trois enroulements statoriques (rotoriques) sont décalés entre eux par un angle de  $\frac{2\pi}{3}$  et  $\theta$  présente l'angle électrique de position d'une phase de stator par rapport à celle de rotor.

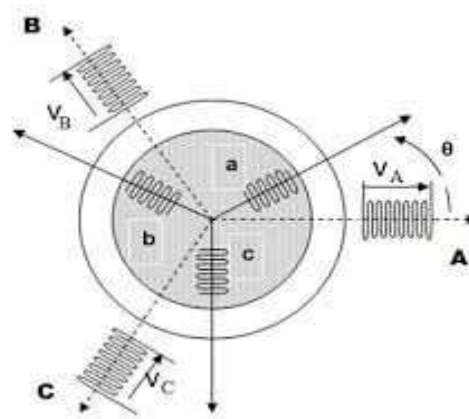


Figure 1 - Représentation des enroulements statorique et rotorique de la MADA [31]

### - Equations électriques

Les équations électriques d'une MADA dans un repère triphasé (abc) sont les suivantes [32] :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (1)$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$[V_{sabc}]$ ,  $[V_{rabc}]$  : sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$[I_{sabc}], [I_{rabc}]$  : sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\emptyset_{sabc}] = \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [\emptyset_{rabc}] = \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix}$$

$[\emptyset_{sabc}], [\emptyset_{rabc}]$  : sont respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$[R_s], [R_r]$  : sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.

### - Equations magnétiques

Les équations magnétiques dans le repère triphasé (abc) s'expriment en fonction des courants et les différentes inductances [32] :

$$\begin{cases} [\emptyset_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\emptyset_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$[L_s], [L_r]$  : sont respectivement les matrices d'inductances statoriques et rotoriques où  $l_s$  et  $l_r$  sont les inductances propres d'une phase, alors que  $m_s$  et  $m_r$  sont les inductances mutuelles entre deux phases de la même armature.

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

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  : sont respectivement les matrices d'inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

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

En remplaçant (2) dans (1), on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_{rabc}]) \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_{sabc}]) \end{cases} \quad (3)$$



### - Equation mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (4)$$

Où :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$J$  : Le moment d'inertie de la partie tournante.

$f$  : Le coefficient des frottements visqueux.

$\Omega$  : vitesse mécanique de la machine.

### B. Transformation de Park

A cause d'une certaine complexité des équations dans le plan triphasé, on s'oriente vers une approche pour simplifier la modélisation des machines tournantes triphasées, cette approche consiste à transformer le système triphasé en un système diphasé équivalent. Par conséquent, le passage d'un référentiel (abc) fixe à un autre tournant (d-q) (figure 2).

En appliquant la transformation de PARK, les enroulements réels sont remplacés par des enroulements fictifs d'axes direct 'd' et en quadrature 'q'. L'angle  $\theta$  est donc remplacé par  $\theta_s$  et  $\theta_r$  tels que :

$\theta_s$  : La position relative de l'axe direct 'd' par rapport à l'axe de référence statorique.

$\theta_r$  : La position relative de l'axe direct 'd' par rapport à l'axe de référence rotorique.

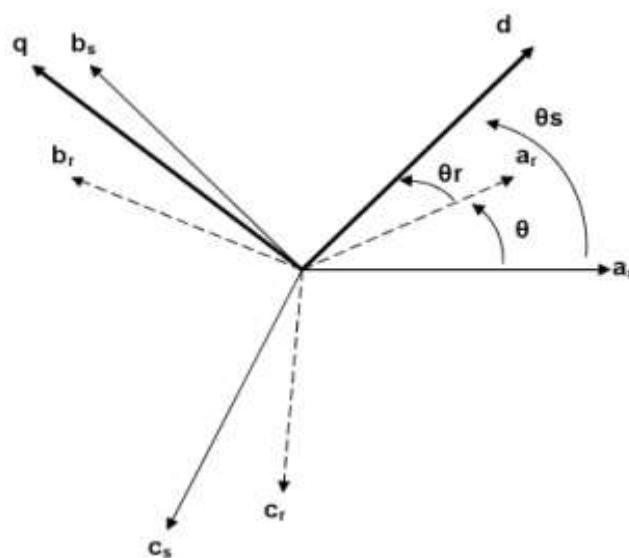


Figure 2 - Position spatiale des différents référentiels [31]

La relation qui lie ces différents angles est donnée par :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (5)$$

### C. Mise en équation dans le plan (d-q)

L'application de la transformée de PARK permet le passage des composantes du système triphasé aux composantes en diphasé.

$$\begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta_s) \cdot \begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} X_{rd} \\ X_{rq} \end{bmatrix} = P(\theta_r) \cdot \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{rb} \\ X_{rc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{rb} \\ X_{rc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$P(\theta_s), P(\theta_r)$ : Matrice de PARK.

X : grandeur qui peut être une tension, un courant ou un flux.

Revenant au système triphasé, on applique la transformée inverse de PARK :

$$\begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} = P(\theta_s)^T \cdot \begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{rb} \\ X_{rc} \end{bmatrix} = P(\theta_r)^T \cdot \begin{bmatrix} X_{rd} \\ X_{rq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$P(\theta_s)^T, P(\theta_r)^T$ : Transposée de la matrice de PARK.

Dans le plan (d-q), Le modèle mathématique est défini par les équations suivantes [7], [12], [32], [33] :

#### - Equations électriques des tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\emptyset_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \emptyset_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\emptyset_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \emptyset_{ds} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\emptyset_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \emptyset_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\emptyset_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \emptyset_{dr} \end{cases} \quad (10)$$

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$  : Les composantes directes et en quadratures des tensions statoriques et rotoriques.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$ : Les composantes directes et en quadratures des courants statoriques et rotoriques.

$\emptyset_{ds}, \emptyset_{qs}, \emptyset_{dr}, \emptyset_{qr}$ : Les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques.

**- Equations magnétiques des flux statoriques et rotoriques**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (12)$$

$L_s = l_s - m_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - m_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2}M_{max}$  : Inductance magnétisante.

**- Equation du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (13)$$

## ملخص

أصبح تطوير تكنولوجيا توربينات الرياح متغيرة السرعة مصدر اهتمام كبير بفضل المزايا المقدمة في توليد الطاقة الكهربائية. عادةً ما يتم ضمان توليد هذه الطاقة بواسطة مولد لا التزامني مزدوج التغذية من أجل استخراج أقصى كم من الطاقة وتردد ثابت. تتناول هذه المذكرة التحكم في هذا المولد بواسطة تقنية الذكاء الاصطناعي لذلك اقترحنا نموذج مرجعي لاستراتيجية التحكم التكيفي من أجل تعديل الاستطاعة الفعالة والردية لمولد لا متزامن مزدوج التغذية وهذه التقنية المقترحة للتحكم تعتمد على مفاهيم المنطق الضبابي. في هذا العمل، نحن مهتمون أيضًا بربط مزرعة رياح بشبكة الكهرباء. تم إجراء محاكاة عددية للنموذج من أجل تحليل النتائج التي تم الحصول عليها والتي توضح لنا الأداء العالي لاستراتيجية التحكم هذه.

### كلمات مفتاحية

توربينات الرياح، مولد لا التزامني مزدوج التغذية، تحكم شعاعي، منطق ضبابي، تحكم تكيفي.

## Résumé

Le développement de la technologie des éoliennes à vitesse variable est devenu un sujet de préoccupation majeur grâce aux avantages offerts dans la production électrique. La génération de cette énergie est assurée généralement par une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour garantir l'extraction maximale de puissance et une fréquence constante. Ce mémoire traite la commande de cette machine en mode génératrice par une technique de l'intelligence artificielle. En effet, nous proposons un modèle de référence de stratégie de commande adaptative afin de contrôler la puissance active et réactive d'un générateur asynchrone doublement alimenté. Cette méthode de contrôle proposée est basée sur les concepts de la logique floue. Dans ce travail, on s'intéresse aussi au raccordement d'un parc éolien au réseau électrique. Une simulation numérique du modèle a été effectuée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'analyser les résultats obtenus qui nous montrent des performances élevées de cette stratégies de commande.

### Mots clés

Eolienne, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, logique floue, commande adaptative.

## Abstract

The development of variable speed wind turbine technology has become major concern due to the advantages offered in power generation. A dual-fed asynchronous machine to ensure maximum power extraction and constant frequency usually does the generation of this energy. This paper discusses the control of this machine in generator mode by artificial intelligence technology. Indeed, we propose a reference model of adaptive control strategy to control the active and reactive power of a double fed asynchronous generator. This proposed control method is based on fuzzy logic concepts. In this work, we are also interested in the connection of a wind farm. A numerical simulation of the model has been performed in the MATLAB/SIMULINK environment in order to analyze the results obtained which show us the high performance of this control strategy.

### Keywords

Wind turbine, double-fed asynchronous machine, vector control, fuzzy logic, adaptive control.