

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Énergies Renouvelables**  
*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

# COMMANDE INTELLIGENTE D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

---

**Présenté par :**

- ALIOUA Ikram
- LAGRAA Zineb
- AMRANI Ilham Aya

*Soutenu le : 22/06/2023 devant le Jury :*

|                        |               |                                   |                     |
|------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|
| <i>Mme. SOFLN</i>      | <i>MCB</i>    | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Président(e)</i> |
| <i>Mme. MEDJAJLN</i>   | <i>MCB</i>    | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Encadreur</i>    |
| <i>Mlle. BEHLOUL.R</i> | <i>Master</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Co-Encadreur</i> |
| <i>M. BRAHIMLM</i>     | <i>MCA</i>    | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Examineur</i>    |

## **Remerciement**

*Je commence par remercier **ALLAH le tout PUISSANT** qui nous donne la capacité d'achever ce travail et qui m'a aidé dépasser toutes les difficultés que nous rencontrons. Nous lui demandons de guider nos pas dans le chemin qui méritera son approbation.*

*Au terme de ce travail, nous voudrions adresser nos vifs remerciements à tous nos professeurs de centre universitaire SALHI AHMED DE NAAMA qui ont contribué à notre formation.*

*Nous exprimons notre reconnaissance et nos plus vifs remerciements à notre encadreur Mme. MEDJANI N et Mlle. BEHLOUL R qui nous a honorés en acceptant de nous encadrer, pour ses conseils et son aide. Nous le remercions pour nous avoir guidés pour l'élaboration de ce travail et pour le choix judicieux du thème*

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail à :

A ma mère, qui m'a donné tout le courage et la patience.

A mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous.

À toute mes sœurs et mes frères.

A mon amie intime **Ikram** et mon binôme **Zineb** .

A ma nièce **Zoubida** qui ne cesse pas de m'encourager.

**Ilham Aya Amrani**

je dédie ce modeste travail a :

A mes **chers parents**... que Dieu leur fasse miséricorde

A mea sœur *Hamida Soundoss*

A mon très cher frère **Med. Abd el koudous**

A mon amie intime **Aya Ilham** et mon binôme **Zineb**

A tout ma famille

Et à vous cher lecteur.

**Ikram Alioua**

Je dédie ce mémoire :

À Mon grand-père **EL\_MADANI LAGRAA** qui était toujours avec moi, grâce à lui que j'ai pu atteindre cette réussite.

À Mon cher père **MOHAMMED**

À Mes chers frères et sœur

À Mon oncle **MILOUD** et sa fille **BOUCHRA**

À Mon oncle **ABD\_ERRAHMANE**

À Mon professeur **RABIAA BEHLOUL**

À Ma chère amie **AMANI KEBIR**

À Mon trinôme **AYA** et **ikram**

À Toute ma famille **LAGRAÀ** et mes amis

**Zineb Lagraà**

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Symboles et nomenclature

## Introduction générale .....2

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

|   |    |
|---|----|
| I.1 Introduction.....   | 5  |
| I.2 Historique de l'énergie éolienne .....                            | 5  |
| I.3 Développement des énergies renouvelables en Algérie.....          | 6  |
| I.4 Définition de l'énergie éolienne.....                             | 6  |
| I.5 principaux composants d'une éolienne .....                        | 7  |
| I.6 Les différents types d'éoliennes .....                            | 7  |
| I.6.1 Eoliennes à axe vertical.....                                   | 7  |
| I.6.2 Eoliennes à axe horizontal.....                                 | 8  |
| I.7 Principe de fonctionnement .....                                  | 9  |
| I.8 Les applications des éoliennes .....                              | 9  |
| I.9 Classement des éoliennes .....                                    | 10 |
| I.9.1 Les éoliennes à vitesse fixe .....                              | 10 |
| I.9.2 Les éoliennes à vitesse variable .....                          | 11 |
| I.10 Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne.....            | 11 |
| I.10.1 Avantages .....  | 11 |
| I.10.2 Inconvénients.....   | 11 |
| I.11 Machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes ..... | 21 |
| I.11.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif .....                | 12 |
| I.11.2 Systèmes couplés au réseau alternatif .....                    | 12 |
| I.11.3 Machine synchrone .....  | 12 |
| I.11.4 Machine asynchrone.....  | 12 |
| I.11.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....                    | 13 |
| I.11.4.2 Machine asynchrone à double stator .....                     | 13 |
| I.11.4.3 Machine asynchrone à double alimentation.....                | 14 |
| I.12 Conclusion.....  | 15 |

### Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

|  |    |
|--|----|
| II.1 Introduction .....                        | 18 |
| II.2 Modélisation de la partie mécanique ..... | 18 |
| II.2.1 le vent : source aérodynamique .....    | 18 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| II.2.2   | modélisation de la turbine éolienne .....                           | 18 |
| II.2.3   | multiplicateur.....   | 19 |
| II.2.4   | l'arbre de transmission .....                                       | 20 |
| II.2.5   | point de fonctionnement à puissance maximale .....                  | 21 |
| II.3     | Modélisation de la partie électrique .....                          | 22 |
| II.3.1   | structure de la MADA.....   | 22 |
| II.3.2   | mode de fonctionnement de MADA.....                                 | 23 |
| II.3.2.1 | fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....                   | 24 |
| II.3.2.2 | fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....                  | 24 |
| II.3.2.3 | fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone .....              | 25 |
| II.3.2.4 | fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone .....             | 25 |
| II.3.3   | hypothèse simplificatrice .....                                     | 26 |
| II.3.4   | modélisation de la GADA .....                                       | 26 |
| II.3.5   | transformation de Park .....  | 28 |
| II.3.5.1 | matrice de Park direct.....   | 29 |
| II.3.5.2 | matrice de Park inverse .....                                       | 29 |
| II.3.6   | représentation des équations de la MADA dans le repère de Park..... | 30 |
| II.3.7   | expression du couple électromagnétique.....                         | 30 |
| II.3.8   | modélisation de l'onduleur de tension .....                         | 31 |
| II.4     | Conclusion.....   | 32 |

### **Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| III.1     | Introduction .....  | 34 |
| III.2     | La commande vectorielle de la GADA.....                               | 34 |
| III.3     | Le principe de la commande vectorielle de la GADA .....               | 34 |
| III.4     | Modèle de la MADA à flux statorique orienté.....                      | 35 |
| III.4.1   | Expressions des puissances active et réactive statorique .....        | 36 |
| III.4.2   | Expressions des tensions rotoriques .....                             | 36 |
| III.5     | Types de la commande vectorielle.....                                 | 38 |
| III.5.1   | Commande vectorielle directe.....                                     | 38 |
| III.5.2   | Commande vectorielle indirecte.....                                   | 39 |
| III.5.2.1 | Commande en boucle ouvert .....                                       | 39 |
| III.5.2.2 | Commande en boucle fermée .....                                       | 39 |
| III.6     | Les résultats de simulation de la commande directe et indirecte ..... | 40 |
| III.7     | Interprétation des résultats .....                                    | 42 |

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| III.8 | Conclusion..... | 42 |
|-------|-----------------|----|

## **Chapitre IV : Commande par logique floue**

|          |  |    |
|----------|--|----|
| IV.1     | Introduction.....  | 45 |
| IV.2     | Historique de la logique floue .....                           | 45 |
| IV.3     | Pourquoi utiliser la logique floue ?.....                      | 46 |
| IV.4     | Les avantages et les inconvénients de la logique floue.....    | 46 |
| IV.4.1   | Les avantages 3.....   | 46 |
| IV.4.2   | Les inconvénients de la logique floue.....                     | 46 |
| IV.5     | Domaines d'applications.....                                   | 46 |
| IV.6     | Principe de la Logique Floue .....                             | 47 |
| IV.7     | Réglage par la logique floue .....                             | 47 |
| IV.7.1   | Notions fondamentales de la logique floue .....                | 47 |
| IV.7.1.1 | Ensembles flous .....  | 48 |
| IV.7.1.2 | Opérateurs logique flous .....                                 | 49 |
| IV.8     | Structure de la commande par logique floue.....                | 49 |
| IV.8.1   | Fuzzification .....  | 50 |
| IV.8.2   | Mécanisme d'inférence floue .....                              | 50 |
| IV.8.3   | Base de règles .....   | 51 |
| IV.8.4   | Défuzzification .....  | 51 |
| IV.9     | Application de la commande par la logique floue à la MADA..... | 51 |
| IV.9.1   | Résultats de simulation .....                                  | 52 |
| IV.9.2   | Interprétation des résultats .....                             | 53 |
| IV.10    | Conclusion .....   | 53 |
|          | Conclusion générale .....                                      | 58 |
|          | Références bibliographiques .....                              | 59 |
|          | Annexe   |    |

## Liste des figures

### Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1: Conversion d'énergie cinétique de vent .....                       | 7  |
| Figure I.2: Les principaux composants d'une éolienne .....                     | 7  |
| Figure I.3: éolienne axe vertical .....  | 8  |
| Figure I.4: éolienne axe horizontal .....                                      | 9  |
| Figure I.5 : éolienne à vitesse fixe .....                                     | 10 |
| Figure I.6 : Système éolien basé sur la machine synchrone .....                | 13 |
| Figure I.7: Caractéristique d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles ..... | 14 |
| Figure I.9: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA .....               | 15 |

### Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| Figure II. 1: Système éolien à vitesse variable à base de MADA .....  | 1  |
| Figure II. 2: Les différents constituants de la chaîne de conversion éolienne .....                           | 2  |
| Figure II.3: Schéma de la turbine éolienne .....  | 3  |
| Figure II.4: Le couplage mécanique entre la turbine et la machine électrique .....                            | 4  |
| Figure II.5: Schéma bloc d'une turbine éolienne .....   | 5  |
| Figure II.6: Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent ..... | 6  |
| Figure II.7: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....                                  | 7  |
| Figure II.8: fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone .....   | 8  |
| Figure II.9: fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone .....  | 9  |
| Figure II.10: génératrice hypo-synchrone .....  | 9  |
| Figure II.11: génératrice hyper-synchrone .....   | 10 |
| Figure II.12: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation .....                             | 11 |
| Figure II.13: Représentation de la transformation ABC vers dq .....   | 14 |
| Figure II. 14: schéma représentatif de l'association onduleur-machine à courant alternatif .....              | 17 |

### Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| figure III 1/Principe de la commande vectorielle .....                                 | 36 |
| figure III 2: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances .....                  | 39 |
| figure III 3: Schéma de principe de la commande vectorielle directe .....              | 40 |
| figure III 4: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert .....              | 41 |
| figure III 5: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé .....               | 42 |
| figure III 6: Puissance active et réactive statorique avec la commande directe .....   | 43 |
| figure III 7: courant statorique .....   | 43 |
| figure III 8: Puissance active et réactive statorique avec la commande indirecte ..... | 44 |
| figure III 9: courant rotorique .....  | 44 |

### Chapitre IV

|   |    |
|---|----|
| figure IV 1: Classification des ensembles flous .....   | 51 |
| figure IV 2 .....   | 52 |
| figure IV 3 : Fuzzification avec cinq fonctions d'appartenance symétriques et non équidistantes ..... | 53 |
| figure IV 4: Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive .....           | 55 |

|   |    |
|---|----|
| figure IV 5: puissance active .....               | 56 |
| figure IV 6:Puissance active avec zoom.....       | 56 |
| figure IV 7:Puissance réactive .....              | 57 |
| figure IV 8 :Puissance réactive avec zoom.....    | 57 |
| figure IV 9 : courants rotoriques .....           | 58 |
| figure IV 10: courants statoriques .....          | 58 |
| figure IV 11: Courants statoriques avec zoom..... | 58 |

### **Liste de tableaux**

|  |    |
|--|----|
| Tableau IV.1: Opérateur logique.....   | 51 |
| Tableau IV.2 : Matrice d'inférence du régulateur flou pour 5 sous-ensembles-flous..... | 53 |

## Liste de symboles

$\rho$  : La masse volumique de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_v$  : La vitesse du vent (m/s)

$\Omega_t$  : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine [ $\text{rad}/\text{s}$ ]

$S$  : La surface balayée par le rotor (balayée par les pales) [ $\text{m}^2$ ]

$R$  : Le rayon du rotor de la turbine à vent [ $\text{m}$ ]

$G$  : est le gain du multiplicateur ;

$T_{em}$  : est le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone ;

$T_t$  : est le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;

$\Omega$  : est la vitesse mécanique de la génératrice ;

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine ;

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ;

$f$  : Coefficient de frottement dynamique ;

$[V_s]$  : Tensions aux bornes des enroulements statoriques.

$[I_s]$  : Courants de phases des enroulements statoriques

$[V_r]$  : Tensions aux bornes des enroulements rotoriques.

$[I_r]$  : Courants de phases des enroulements rotoriques.

,  $L_r$  : Inductances propres statoriques et rotorique .

$M_{ss}$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_{rr}$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

$M_0$  : maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ( cas ou leurs axes ma génétiques

$C_m$ : Couple moteur appliqué sur la GADA [ $N. m$ ].

$J_g$  : Moment d'inertie total de la GADA [ $Kg. M^2$ ].

$f$  : Coefficient de frottement visqueux de la GADA [ $N. m/rad/s$ ].

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation du rotor de la GADA.

$S_j= 1$  si l'intrepteur du haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_j= 0$  si l'intrepteur du haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

### **Nomenclature :**

**MADA**            Machine Asynchrone à Double Alimentation.

**GADA**            Générateur Asynchrone à Double Alimentation.

**RLF**             Régulateur à logique floue.

**MPPT**            Maximum Power Point Tracking

# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

Actuellement, deux grandes catégories de sources d'énergie sont utilisées pour produire de l'énergie électrique : les énergies fossiles et les énergies renouvelables. Cependant, La première catégorie comprend les sources primaires épuisables qui causent des problèmes environnementaux, comme la pollution et l'effet de serre du charbon et des hydrocarbures, ainsi que les déchets radioactifs de l'énergie nucléaire. Cela explique pourquoi l'intérêt pour les énergies renouvelables a augmenté ces dernières années.

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable avec le potentiel le plus important. Elle n'est pas proposée pour remplacer les sources traditionnelles, mais plutôt comme source d'appoint. Cette source d'énergie présente deux avantages majeurs : elle est complètement propre et renouvelable.

À l'échelle mondiale, l'utilisation de l'énergie éolienne a connu une augmentation significative. En conséquence, les chercheurs de Génie Electrique ont mené des recherches pour augmenter l'efficacité de la conversion électromécanique d'une part et améliorer la qualité de l'énergie fournie d'autre part. Les éoliennes à vitesse variable sont les plus économiques par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, car elles réduisent le coût de production d'électricité et améliorent la qualité de la puissance électrique produite, tout en augmentant le rendement de la production d'électricité.

Il y a un intérêt grandissant pour la machine à double alimentation asynchrone. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. Certaines études en font un concurrent sérieux pour plusieurs machines électriques, notamment la cage asynchrone classique. Cependant, à première vue, la balance semble basculer tout de suite vers la cage de l'écureuil. La machine asynchrone à rotor bobiné est plus volumineuse, utilise des balais et nécessite plus de convertisseurs pour un fonctionnement moteur.

Le GADA utilisé pour la production d'électricité dans un site isolé est considéré comme une solution écologique intéressante. Le générateur à double induction "GADA" convient davantage à cette application. Par le fait qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constante coté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, étant donné que la tension et la fréquence du côté du stator doivent aussi être contrôlées.

Dans le domaine du contrôle des machines électriques, la recherche est de plus en plus axée sur l'application de techniques de contrôle modernes. Ces techniques évoluent vertigineusement avec l'évolution des ordinateurs numériques et de l'électronique de

## **Introduction générale**

---

puissance ; la commande adaptative, la logique floue,...etc. l'intérêt récent pour ce dernier s'explique principalement par la disponibilité de commutateurs à haute fréquence et de microprocesseurs de plus en plus efficaces[1],[2].

À la lumière de ces constats, le travail de ce mémoire sera devisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre nous commençons par un état de l'art sur l'énergie éolienne, les différents types des éoliennes et les composants qui la constituent. Ensuite, Nous décrirons les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, Dans la première partie on modélisera la partie mécanique (la turbine, le multiplicateur, et l'arbre mécanique) puis dans la seconde partie on modélisera la partie électrique (la GADA et l'onduleur).

Dans le troisième chapitre on a présenté la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le dernier chapitre nous présenterons la théorie de la commande par logique floue, et son application sur la GADA où des résultats de simulations seront présentés. Ce travail sera terminé par une conclusion générale.

# **CHAPITRE 1 :**

# **Généralités sur les**

# **éoliennes**

## I.1 Introduction

Par rapport à l'autre forme d'énergie, l'électricité est l'énergie la plus utilisée dans tout le domaine.

Par conséquent, et car l'être humain concerné par l'environnement il est indispensable de trouver des moyens propres pour la produire il est recherché à des nouvelles sources d'énergie parmi ces énergies on se trouve l'énergie solaire, l'hydraulique et l'énergie éolienne ...

Dans ce chapitre, on parle sur généralités et l'histoire de l'énergie éolienne, les principales structures utilisées ainsi que les plusieurs chaînes de conversions base de différences génératrices, les différentes composantes de système éolien et les applications des éoliennes.

## I.2 Historique de l'énergie éolienne

La première utilisation d'énergie éolienne, c'est bien les bateaux en 3500 avant notre ère, les Sumériens naviguaient déjà à l'aide de voiles.

Au VII<sup>e</sup> siècle, les Perses ont utilisé la force du vent qui, en s'engouffrant dans des roues à aubes, pouvait actionner des pompes. Les Égyptiens ont eu recours à la même stratégie, mais afin d'irriguer la terre en faisant monter l'eau grâce à un système de pompage qui l'entraînait dans de petits réservoirs.

Après, les Perses ont perfectionné leurs machines en fixant des voiles sur un axe vertical. Ce stratagème a permis de mieux utiliser l'énergie du vent et de tendre à maximiser le rendement de cette nouvelle machine, appelée aujourd'hui « moulin ». Les multiples invasions arabes et surtout les croisades ont pu permettre au monde occidental de jouir de cette magnifique invention persique et de cette avancée technologique.

Dès le début du XVI<sup>e</sup>, les artisans européens ont amélioré les ailes du moulin et les ont nettement complexifiées. Les Néerlandais sont sûrement le peuple européen à avoir le mieux et le plus utilisé le moulin, qui leur a permis d'assécher la terre afin de créer les célèbres polders.[3]

En 1839, un nouveau système inventé par le français P. Berton d'ailes de moulin afin d'éviter aux meuniers de devoir sans cesse monter dans les ailes pour installer et enlever les toiles en fonction des vents.[4]

En 1841, une idée qui a été inspirée par les trois chercheurs C. Brush, J. Blyth et V. sur la production électrique à base de vent apparaît de belge Nollet [4].

Les premiers aérogénérateurs ont été créés en 1880. Sept ans plus tard, C. de Goyon a inventé une éolienne ayant deux dynamos. En 1956, J. Juul a fait construire une éolienne ayant une puissance de 200 kW[3].

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 [3].

### **I.3 Développement des énergies renouvelables en Algérie**

L'Algérie a opté, dès son indépendance, pour le développement des infrastructures électriques et gazières, et l'accès de la population à l'électricité et au gaz naturel ; ces deux vecteurs constituant une priorité qui vise l'amélioration de la qualité de vie du citoyen d'une part, et de la situation économique du pays, d'autre part.

Pour cela le gouvernement Algérien s'engage dans un programme de développement énergétique qui vise une production électrique propre d'une puissance de 22 000MW à l'horizon 2023 avec une possibilité d'exportation[4] [5]

**Première phase 2015 - 2020 :** Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

**Deuxième phase 2021 - 2030 :** Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable. Les centres de recherche Algérienne ont leur part de ce développement et la contribution au progrès de la technologie éolienne. Parmi leur réalisation on cite : l'Atlas éolien [4].

### **I.4 Définition de l'énergie éolienne**

L'éolienne est une diapositive destinée à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie d'énergie des énergies renouvelables

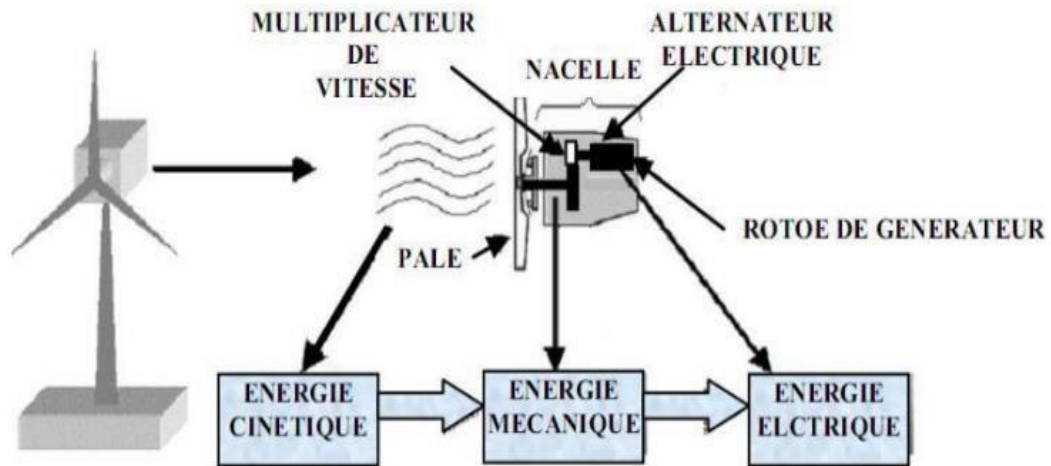


Figure I.1: Convesion d'énergie cinétique de vent [6].

### I.5 principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : le mat, la nacelle et le rotor.

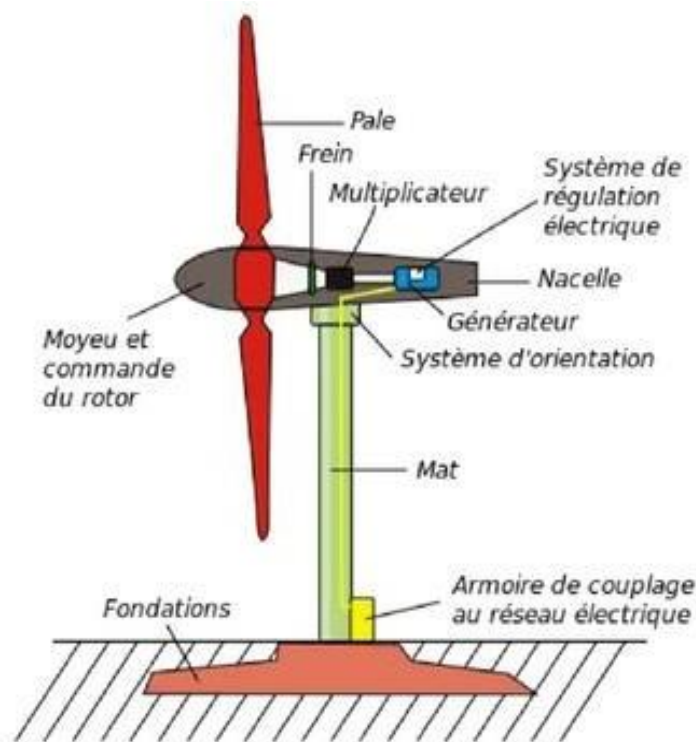


Figure I.2: Les principaux composants d'une éolienne [6].

### I.6 Les différentes types d'éoliennes

#### I.6.1 Eoliennes à axe vertical

Elles sont appelées éoliennes à axe vertical car l'axe de rotation du rotor est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Elles sont 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 [6].

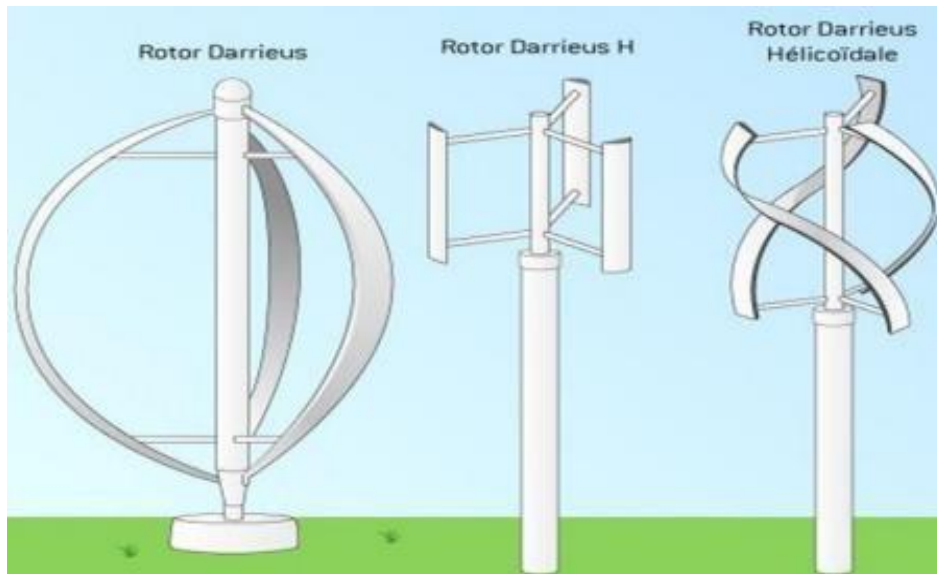


Figure I.3: éolienne axe vertical

### I.6.1.1 Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien .[6]

### I.6.1.2 Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [6]

### I.6.2 Eoliennes à axe horizontal

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles sont de conception simple, comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau. Il existe des éoliennes à axe horizontal à marche lente et à marche rapide [6].



Figure I.4: éolienne axe horizontal

### I.6.2.1 Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.
- Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage [6].

### I.6.2.2 Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [6].

## I.7 Principe de fonctionnement

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie [7].

## I.8 Les applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières[8] :

1. soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau ;
2. soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
  - l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ;
  - l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

### I.9 Classement des éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration[9]:

#### I.9.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique(figure 1.4). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control) [10].

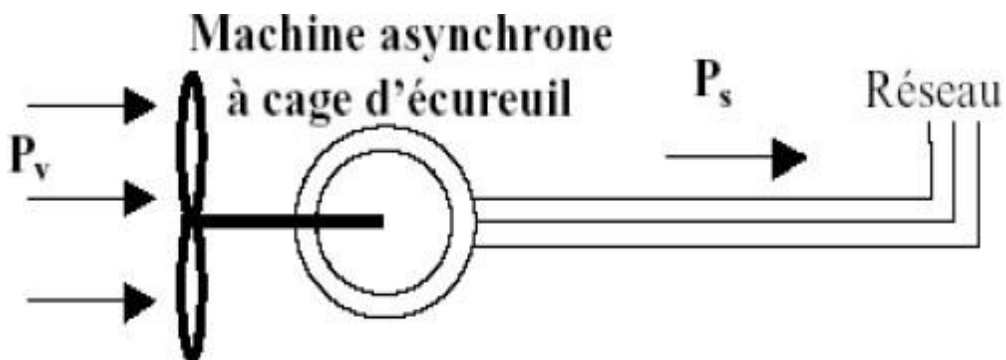


Figure I.5 : éolienne à vitesse fixe [9].

Le fonctionnement à vitesse fixe possède les caractéristiques suivantes [11] :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher

### I.9.2 Les éoliennes à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique **synchrone** ou **asynchrone** [12]

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par [6]:

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité

### I.10 Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne

#### I.10.1 Avantages

L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub> [8] :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.

#### I.10.2 Inconvénients

- L'énergie change suivant la météo; la nature du vent stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.[13]
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe .[13]
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés .[13]

- Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût [8] :
- Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage. Les oiseaux: les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci [8].

### **I.11 Machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes**

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir[6] :

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

#### **I.11.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif**

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

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

#### **I.11.2 Systèmes couplés au réseau alternatif**

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

#### **I.11.3 Machine synchrone**

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux à très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéro turbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [14].

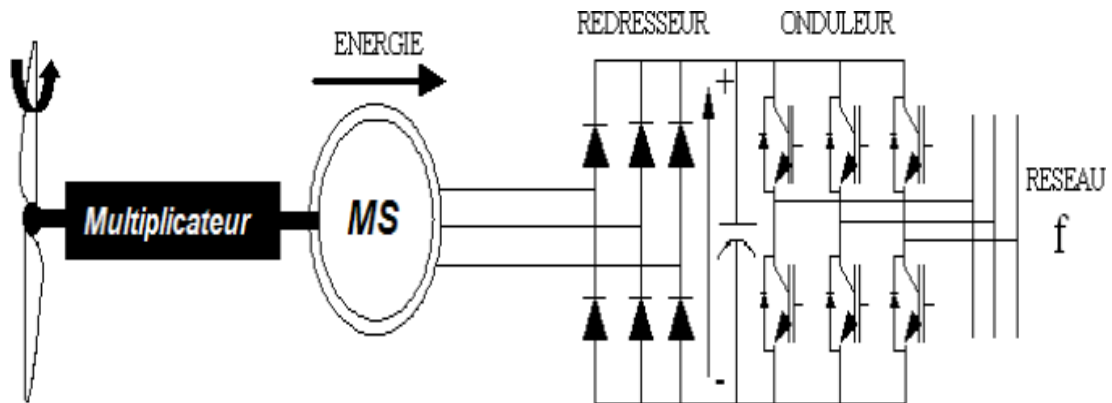


Figure I.6 :Système éolien basé sur la machine synchrone.

### I.11.4 Machine asynchrone

Nous dresserons une liste non exhaustive de système de conversion de l'énergie éolienne utile

issant la machine asynchrone. Nous avons subdivisé ces systèmes en deux grandes familles, il s'agit des éoliennes connectées aux réseaux et celle fonctionnant au site isolé.

#### I.11.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. la plupart des application utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible cout ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure [15]

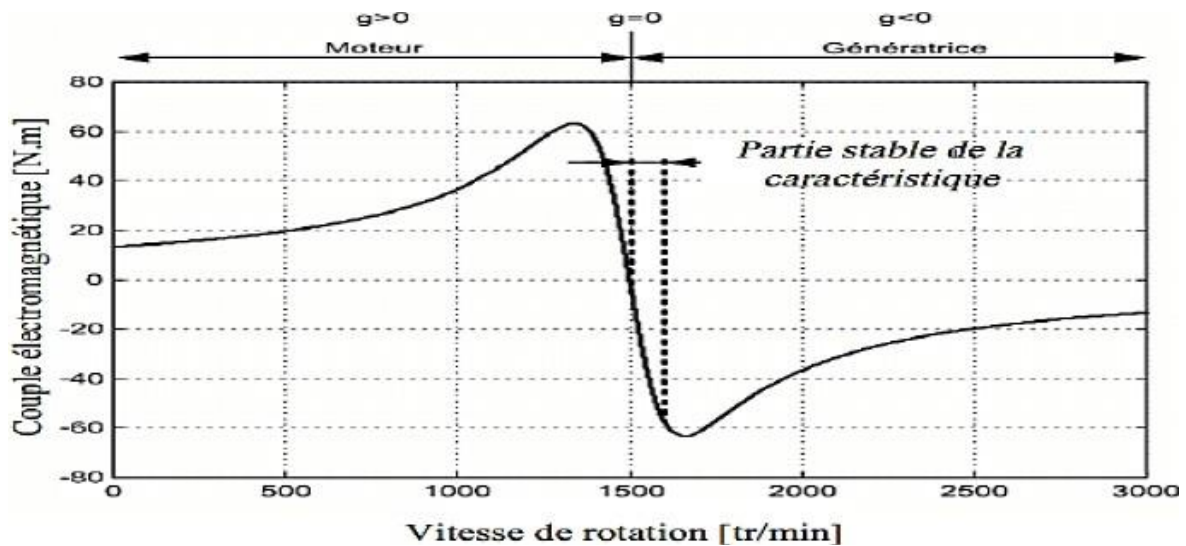


Figure I.7:Caractéristique d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

### I.11.4.2 Machine asynchrone 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 [4].

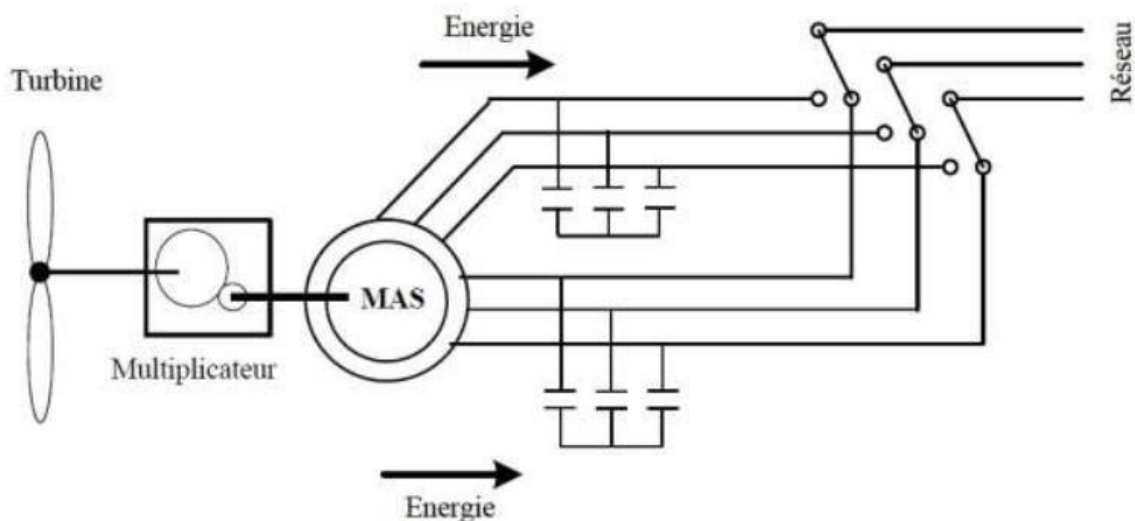


Figure I.8:Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage à double stator

### I.11.4.3 Machine asynchrone à double alimentation

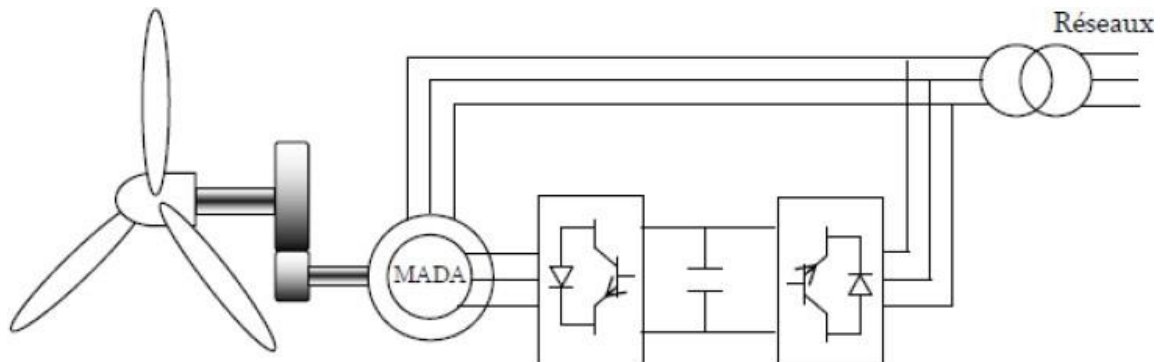
La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone:

## Chapitre 1 : Généralités sur les éoliennes

---

le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré).

Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit[16].



**Figure I.8:** Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

### I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne.

Dans ce contexte, on a rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique; on a cité les différents types d'éolienne avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amenés à choisir un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

**CHAPITRE 2 :**  
**Modélisation de la chaîne de  
conversion éolienne**

### II. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale [17].

Dans une éolienne, la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique nécessite une chaîne de conversion adéquate composée d'éléments de différentes natures.

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation d'une chaîne de conversion utilisant une GADA. Cette chaîne est composée d'une série d'éléments : Turbine (3pales), arbre, multiplicateur, GADA et convertisseur de puissance (back to back) [18]

### II.2 Modélisation de la partie mécanique

#### II.2.1 le vent : source aérodynamique

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. C'est donc une variable importante à modéliser, la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle [19]. Elle est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [20].

$$V_v = (t) \quad (\text{II.1})$$

#### II.2.2 modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Toutefois, c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique [21]. La turbine éolienne est représentée par une partie mécanique et une partie aérodynamique. Il existe plusieurs types de turbines éoliennes dont les caractéristiques et le coefficient de puissance sont illustrés [22].

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par [23].

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3, \quad S = \pi R_T^2 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$\rho$  : la masse volumique de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_v$  : la vitesse du vent (m/s)

$\Omega_t$  : la vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine [ $rad/s$ ]

$S$  : la surface balayée par le rotor (balayée par les pales ) [ $m^3$ ]

$R$  : le rayon du rotor de la turbine à vent [ $m$ ]

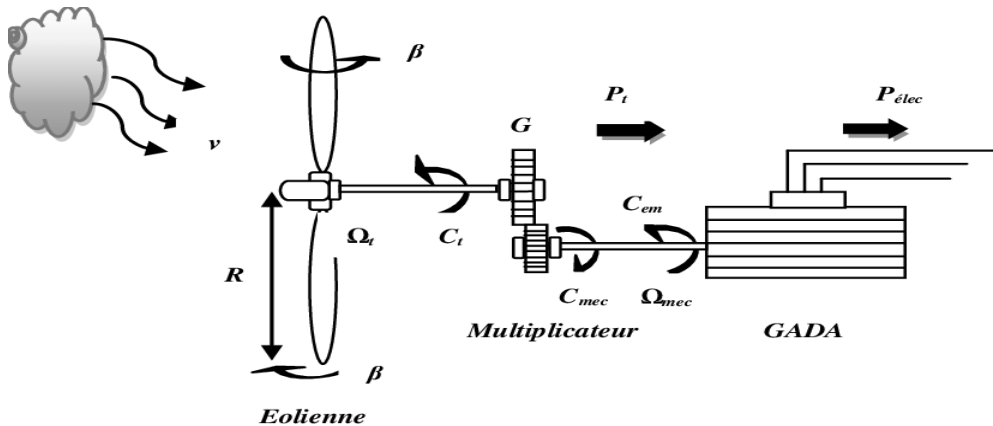


figure II 1: Schéma de la turbine éolienne [24].

### II.2.3 multiplicateur

Le rôle principal du multiplicateur est d'augmenter ou diminuer la vitesse dont leur fonctionnement est adapté selon leur utilisation.

S'il est un élévateur de vitesse implique que c'est un réducteur du couple.

S'il est un réducteur de la vitesse implique que c'est un élévateur du couple.

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.3})$$

$$\Omega = \frac{\Omega_t}{G} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$G$  : est le gain du multiplicateur ;

$T_{em}$  : est le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone ;

$T_t$  : est le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;

## Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

---

$\Omega$  : est la vitesse mécanique de la génératrice ;

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine ;

### II.2.4 l'arbre de transmission

Le modèle mécanique utilisé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [25], telle que :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = T_{em} - T_t \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$J$  : inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ;

$f$  : coefficient de frottement dynamique ;

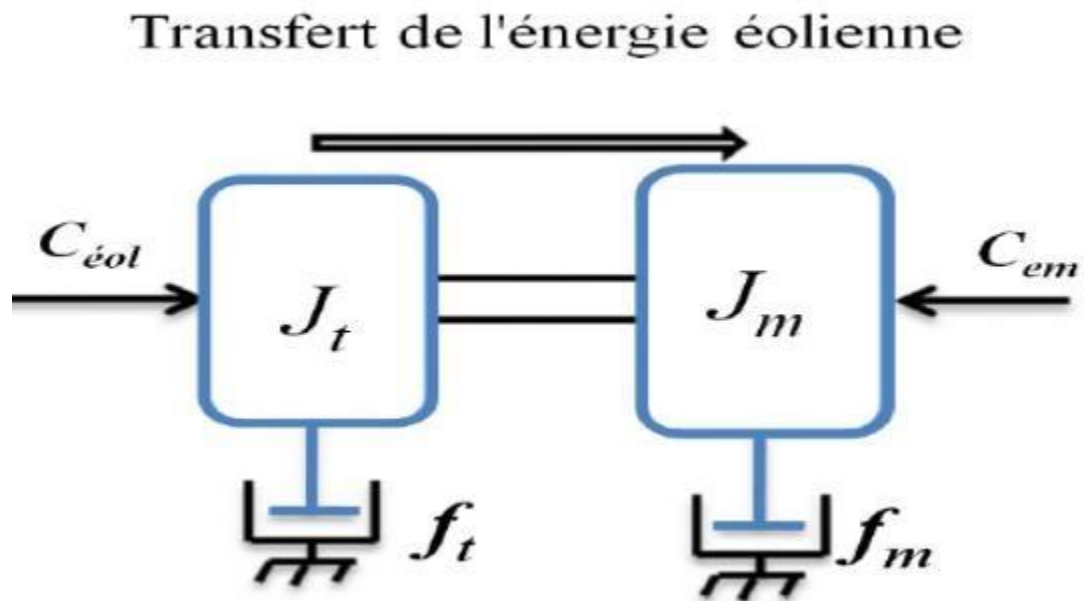


figure II 2 : Le couplage mécanique entre la turbine et la machine électrique

Le schéma bloc de la turbine sous matlab simulink est représenté sur la figure (II.3) suivante :

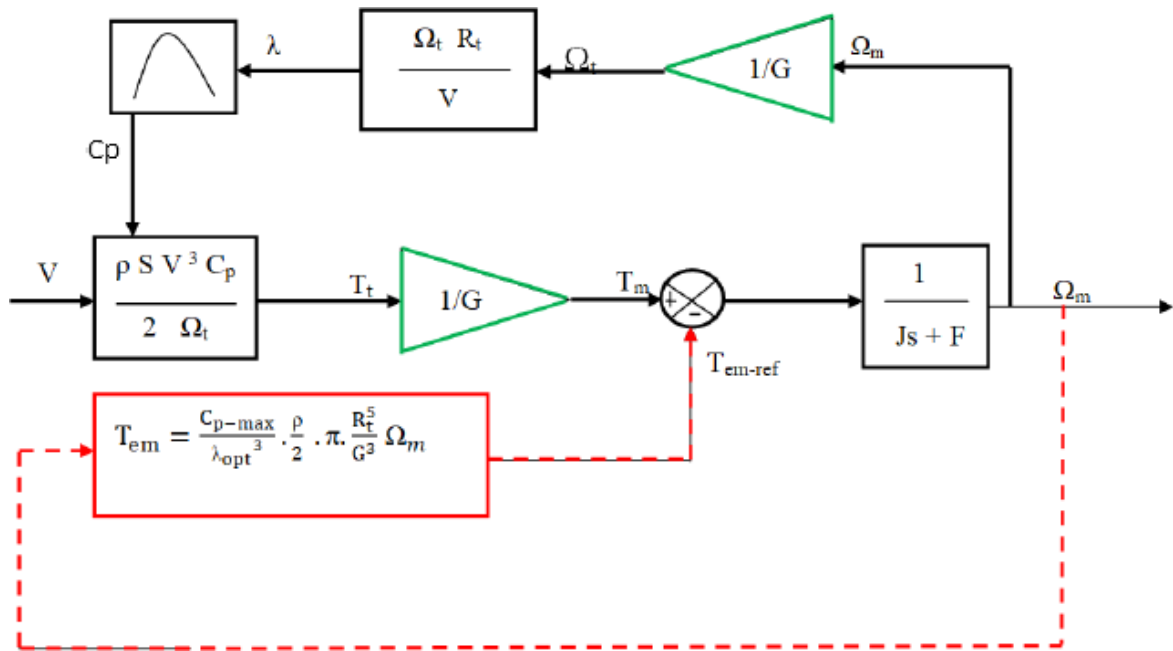


figure II 3: Schéma bloc d'une turbine éolienne.

### II.2.5 point de fonctionnement à puissance maximale

Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale d'une éolienne.

Le schéma de la figure (II.3) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne : Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent  $V_v$  donnée.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation [26] :

$$T_{em} = k * \Omega^2 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$K = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} * \frac{\rho}{2} * \pi * \frac{R^5}{G^3} \quad (\text{II.7})$$

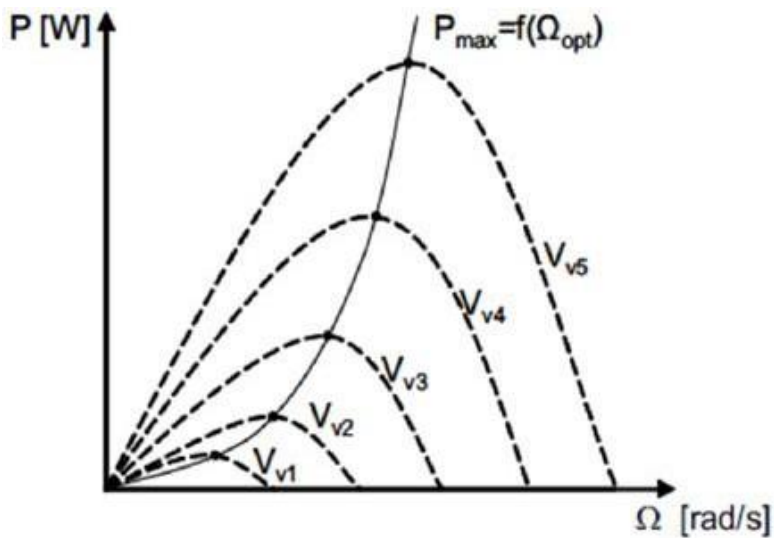


figure II 4: Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent

### II.3 Modélisation de la partie électrique

C'est la partie de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique à l'aide d'une GADA et un convertisseur back to back.

#### II.3.1 structure de la MADA

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. Son rotor comporte un enroulement triphasé de la même manière que les enroulements du stator, mais connecté toujours en étoile. Ces enroulements sont reliés à un système de contacts balais-bagues permettant d'avoir accès aux bobines du rotor [20 , 27].

La figure II.6 montre que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

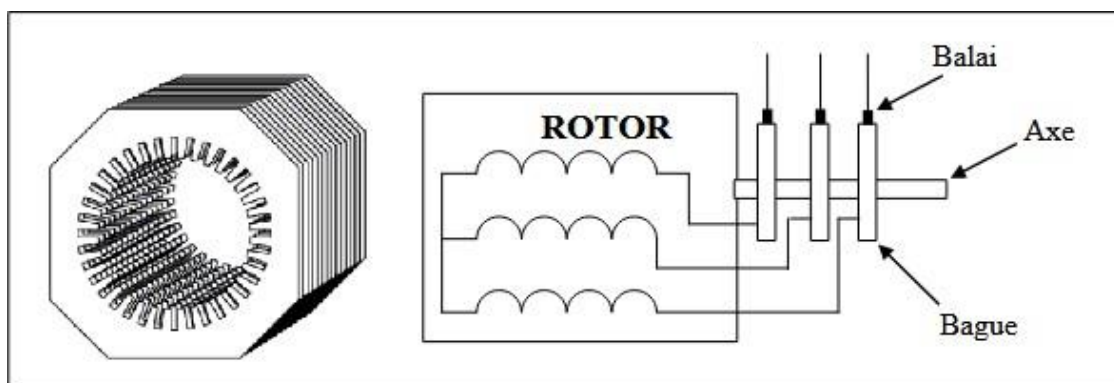


figure II 5: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [28]

### II.3.2 mode de fonctionnement de MADA

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe de contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants

rotoriques  $f_r$  est égale à  $g$  fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs

une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée [29].

Les différents modes de fonctionnement de la MADA [30]:

#### II.3.2.1 fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

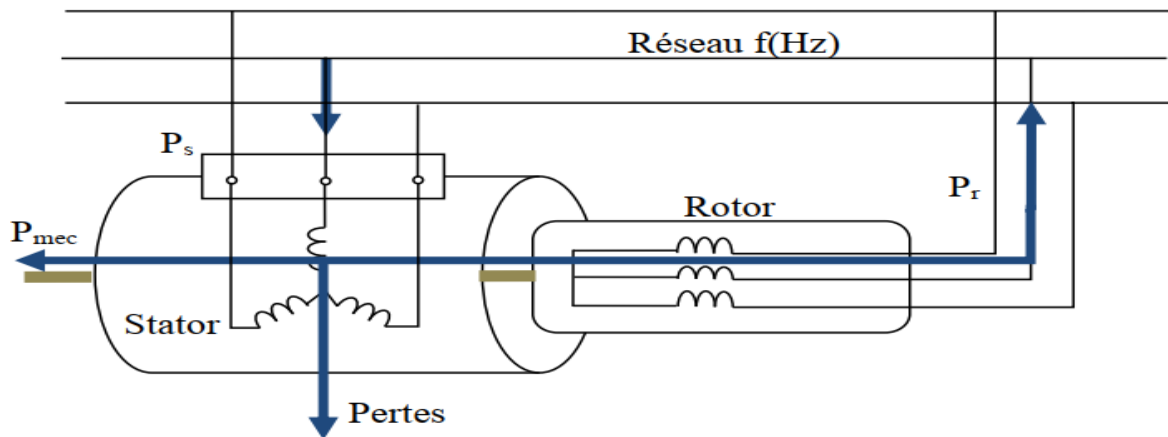


figure II 6: fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La figure (II.6) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecter au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. Ce mode connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor .

### II.3.2.2 fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

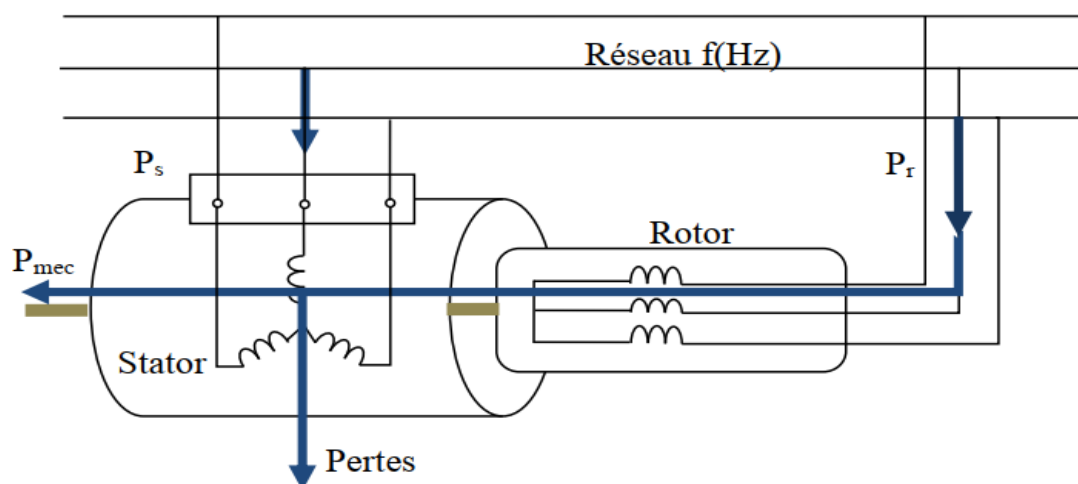


figure II 7: fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

## Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La figure (II.7) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

### II.3.2.3 fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone

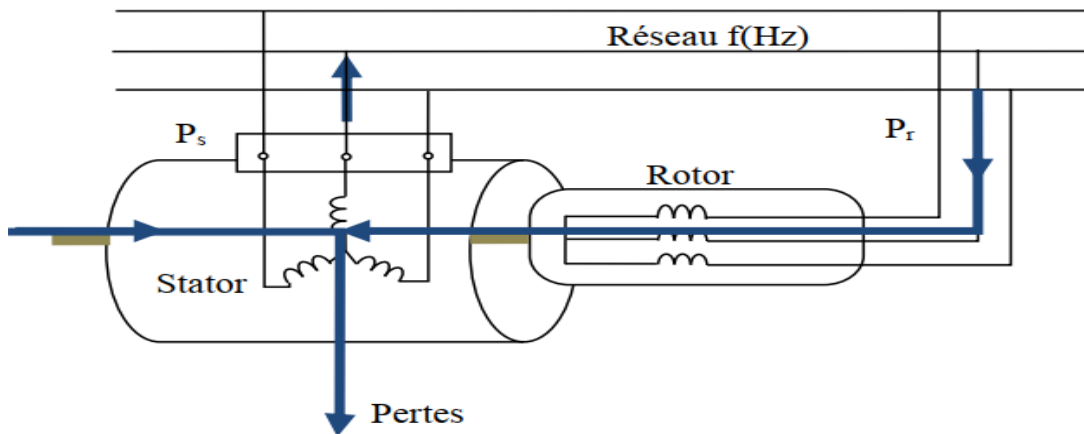


figure II 8: génératrice hypo-synchrone.

La figure (II.8) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement .

### II.3.2.4 fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone

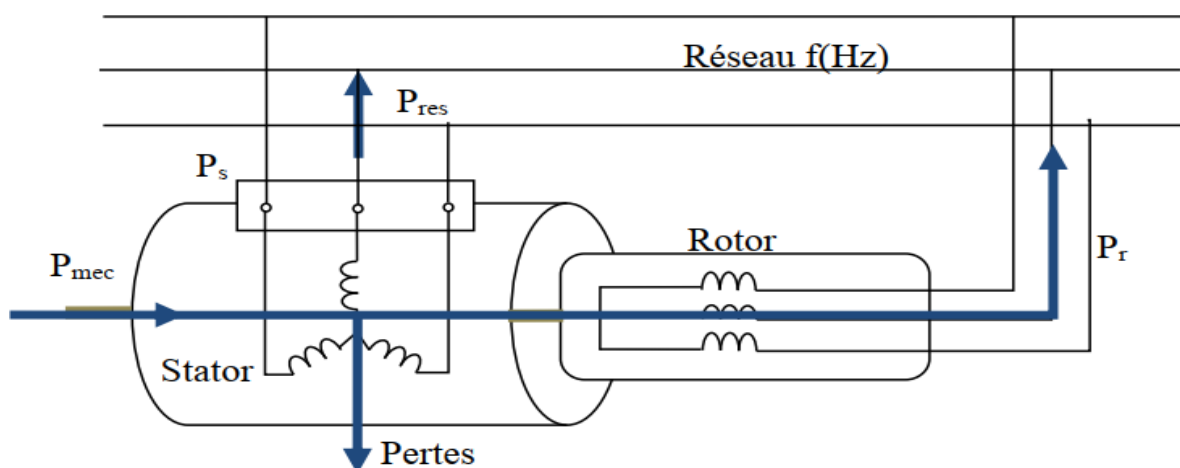


figure II 9: génératrice hyper-synchrone.

La figure (II.9) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un

## Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

### II.3.3 hypothèse simplificatrice

La modélisation des machines électriques par des équations électriques dédiées pour l'étude de la commande est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices classiques, [2]. Ces hypothèses sont :

- La machine a une structure symétrique au stator et au rotor.
- Pertes fer et effet de peau négligés (seuls les enroulements du stator et du rotor sont parcourus par des courants).
- La saturation des tôles ferromagnétiques et l'effet de la température sont négligés.
- Les inductions magnétiques sont supposées sinusoïdales.
- Effet d'encoches négligé (entrefer constant).

### II.3.4 modélisation de la GADA

Les hypothèses précédentes permettent de représenter la machine asynchrone à rotor bobiné par la figure (II.10). Elle a six enroulements (trois au stator et trois au rotor) dont l'angle électrique  $\theta$  représente le décalage entre l'axe de la phase A du stator et celui de la phase a du rotor.

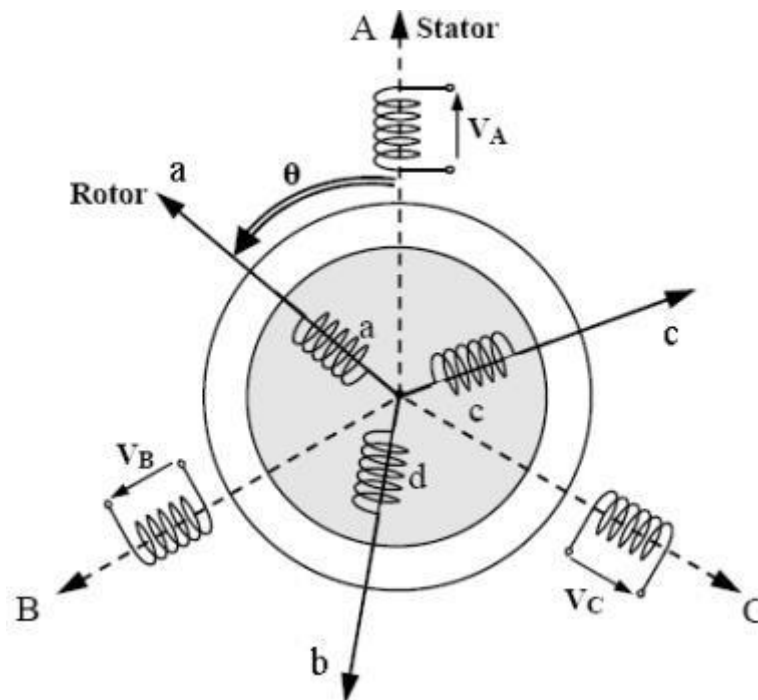


figure II 10: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

➤ Pour les enroulements du stator :

$$V_{AS} = R_s I_s + \frac{d\Phi_{AS}}{dt} \quad (\text{II.8})$$

$$V_{BS} = R_s I_{BS} + \frac{d\Phi_{BS}}{dt} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{CS} = R_s I_{CS} + \frac{d\Phi_{CS}}{dt} \quad (\text{II.10})$$

➤ Pour les enroulements rotoriques :

$$V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\Phi_{ar}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\Phi_{br}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\Phi_{cr}}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Sous la forme matricielle condensée, on trouve :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$[V_s]$  : Tensions aux bornes des enroulements statoriques.

$[I_s]$  : Courants de phases des enroulements statoriques

$[V_r]$  : Tensions aux bornes des enroulements rotoriques.

$[I_r]$  : Courants de phases des enroulements rotoriques.

Tel que :

$$[V_s] = [V_{As} \ V_{Bs} \ V_{Cs}]^T \quad (\text{II.16})$$

$$[I_s] = [I_{As} \ I_{Bs} \ I_{Cs}]^T \quad (\text{II.17})$$

$$[V_r] = [V_{Ar} \ V_{Br} \ V_{Cr}]^T \quad (\text{II.18})$$

$$[I_r] = [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T \quad (\text{II.19})$$

$$[\Phi_s] = [\Phi_{As} \ \Phi_{Bs} \ \Phi_{Cs}]^T \quad (\text{II.20})$$

$$[\Phi_r] = [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T \quad (\text{II.21})$$

Les relations entre les flux du stator et du rotor en fonction des courants et des inductances

propres et mutuelles sont données par les équations matricielles suivantes :

$$[\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \quad (\text{II.22})$$

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.23})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$[M_{rr}] = \begin{bmatrix} 0 & M_r & M_r \\ M_r & 0 & M_r \\ M_r & M_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$[M_{ss}] = \begin{bmatrix} 0 & M_s & M_s \\ M_s & 0 & M_s \\ M_s & M_s & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Tel que :

,  $L_r$  : inductances propres statoriques et rotorique .

$M_{ss}$  : inductance mutuelle entre phases statoriques .

$M_{rr}$  : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Les inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépendent de la position

angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$M_{sr}$  : inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques .

$M_0$  : maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ( cas où leurs axes magnétiques est modifiée par :

$$C_{em} - C_m = f \Omega_{mec} + J_g \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$C_m$ : Couple moteur appliqué sur la GADA [ $N.m$ ].

$J_g$  : Moment d'inertie total de la GADA [ $Kg.M^2$ ].

$f$  : coefficient de frottement visqueux de la GADA [ $N.m/rad/s$ ].

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation du rotor de la GADA.

## Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Toutefois, malgré la simplicité de construction de la GADA, son modèle mathématique est complexe, en effet les phénomènes mis en jeu sont de natures électriques, magnétiques et mécaniques, avec une structure multi variable fortement non-linéaire. Dans le repère triphasé fixe et lié au stator, le modèle de la machine asynchrone auquel on aboutit présente alors l'inconvénient d'aboutir à des équations différentielles à coefficients variables en fonction de la position du rotor, et donc du temps.

Parmi les approches utilisées pour la modélisation des machines tournantes triphasées, l'approche basée sur la théorie des deux axes de R.H park qui consiste en la transformation d'un système biphasé équivalent, en passant du référentiel fixe (A,B,C) vers un second référentiel mobile (d,q) [2].

### II.3.5 transformation de Park

Afin de simplifier les modèles des machines à courant alternatif et de faciliter la recherche des lois de contrôle, la transformation de Park est généralement utilisée. Elle permet le passage d'un système triphasé (A,B,C) vers un système biphasé (d,q) ou inversement, figure(II.11).

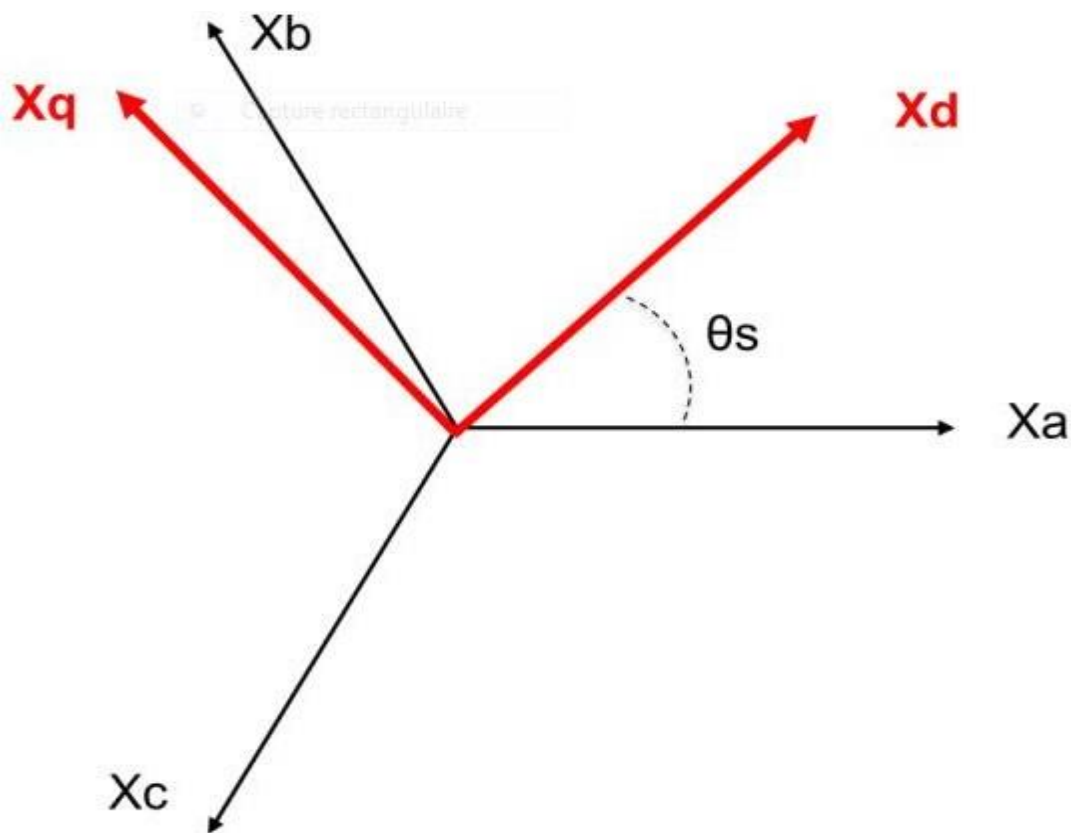


figure II 11: Représentation de la transformation ABC vers dq.

### II.3.5.1 matrice de Park direct

Elle permet le passage de repère ABC vers le repère  $(d, q)$  :

$$[P(\theta_s)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \quad (\text{II.30})$$

Le changement des variables courants, tensions et flux s'effectue par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

### II.3.5.2 matrice de Park inverse

La transformation de Park inverse permet le passage du repère  $d, q$  vers le repère (ABC) .

$$[P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \quad (\text{II.32})$$

Le changement des variables courants, tensions et flux s'effectue par :

$$\begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

### II.3.6 représentation des équations de la MADA dans le repère de Park

L'application de la transformation de Park (basée sur l'égalité des puissances) sur les équations de la GADA écrites dans les repères ABC donne après simplification le modèle suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_d &= \mathbf{R}_{ds} \mathbf{i}_d(t) + \frac{d\Phi_{ds}(t)}{dt} - \omega_s \Phi_{qs}(t) \\ \mathbf{V}_{qs} &= \mathbf{R}_{qs} \mathbf{i}_{qs}(t) + \frac{d\Phi_{qs}(t)}{dt} + \omega_s \Phi_{ds}(t) \\ \mathbf{V}_{dr} &= \mathbf{R}_{dr} \mathbf{i}_{dr}(t) + \frac{d\Phi_{dr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr}(t) \\ \mathbf{V}_{qr} &= \mathbf{R}_{qr} \mathbf{i}_{qr}(t) + \frac{d\Phi_{qr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr}(t) \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \\ \theta_s = \rho \cdot \Omega_{mec} + \theta_r \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q) :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr}$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad (\text{II.36})$$

$$\Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds}$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs}$$

Tel que :

$$\mathbf{M} = \frac{3}{2} \mathbf{M}_{sr} = \frac{3}{2} \mathbf{M}_{rs} : \text{Mutuelle cyclique entre rotor et stator.}$$

### II.3.7 expression du couple électromagnétique

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques est donnée par :

$$P_e = V_{As} i_{As} + V_{Bs} i_{Bs} + V_{Cs} i_{Cs} + V_{ar} i_{ar} + V_{br} i_{br} + V_{cr} i_{cr} \quad (\text{II.37})$$

Et dans le repère de Park, par l'expression suivante :

$$P_e = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \quad (\text{II.38})$$

En développant cette expression, nous trouvons que  $P_s$  se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique.

$$P_e = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) + I_{ds} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + m_r (\Phi_{dr} I_{qr} - \Phi_{qr} I_{dr}) \quad (\text{II.39})$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par :

$$P_{mec} = C_m \Omega_{mec} \quad (\text{II.40})$$

Tel que :

$$C_m \frac{m_r}{p} = m_r (\Phi_{dr} I_{qr} - \Phi_{qr} I_{dr}) \quad (\text{II.41})$$

Donc le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = (\Phi_{dr} I_{qr} - \Phi_{qr} I_{dr}) \quad (\text{II.42})$$

On peut aussi établir d'autres expressions pour le couple :

$$C_{em} = P.M(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qs}) \quad (II.43)$$

$$C_{em} = P.M(\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) \quad (II.44)$$

$$C_{em} = P.M(\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{qs}) \quad (II.45)$$

D'autre part les puissances active et réactive statorique sont données par

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_{qs} \cdot I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (II.46)$$

### II.3.8 modélisation de l'onduleur de tension

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteur commandés à l'ouverture éta la fermeture .Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sous parfaits [5] .

Le schéma représentatif d'une association onduleur machine peut être donné par la figure (II.12).

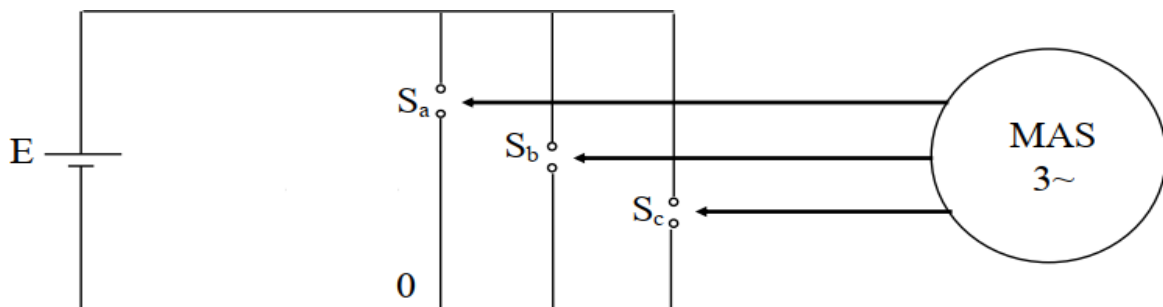


figure II 12: schéma représentatif de l'association onduleur-machine à courant alternatif.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande  $S_j$  ( $j = a, b, c$ ) telles que :

$S_j = 1$  si l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_j = 0$  si l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

D'après le schéma simplifié de l'onduleur, on peut écrire :

## Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

---

$$U_{ab} = U_{a0} - U_{b0} = (S_a - S_b); U_{ac} = (S_a - S_c); U_{bc} = (S_b - S_c)$$

Aussi :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0$$

Donc :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{an} + U_{ca} + U_{an} = 0 \rightarrow 3U_{an} = U_{ab} + U_{ac} = (2 * S_a - S_b - S_c)$$

Au final, on aura

$$\begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

Cette équation matricielle donne les tensions triphasées simples en fonction des signaux de commande des bras de l'onduleur [5].

### II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique des éléments d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une GADA. Ces éléments sont : la turbine, l'arbre et le multiplicateur, la GADA et l'onduleur de tension.

Cependant, à cause de la complexité du modèle de la GADA, nous avons utilisé la transformation de Park pour simplifier le modèle final. Ces modèles seront exploités dans le troisième chapitre pour commander les puissances active et réactive de GADA avec logiciel MATLAB/SIMULINK.

**Chapitre 3 :**  
**Commande vectorielle de la**  
**GADA.**

### III.1 Introduction

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants [31]. Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant, le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active dépendent uniquement du courant rotorique d'axe  $q$ .

À travers ce chapitre, nous allons présenter la stratégie de la commande vectorielle à flux orienté appliquée à une MADA [32].

### III.2 La commande vectorielle de la GADA

Dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine asynchrone, Blaschke et Hasse ont proposé une méthode de contrôle vectoriel de la machine asynchrone. La commande vectorielle dite aussi « commande à flux orienté » est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine [33].

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment.

La plus part des travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par Blaschke.
- Méthode indirecte développée par Hasse.

Dans notre cas, nous nous intéressons à une commande en puissance avec orientation du repère  $(d, q)$ .

### III.3 Le principe de la commande vectorielle de la GADA

La commande par orientation de flux proposée par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu.

Cette méthode base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée,  $i_{rd}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $i_{rq}$  est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  sont mutuellement découplées [34].

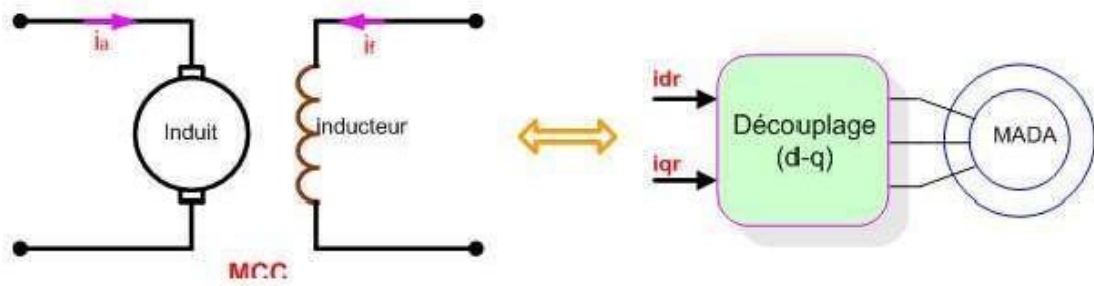


figure III 1/Principe de la commande vectorielle.

### III.4 Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant Le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine.

Rappelons le système d'équations différentielles (II.34), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{aligned}
 \text{I} \quad V_d &= R_s i_{ds}(t) + \frac{d\Phi_{ds}(t)}{dt} - \omega_s \Phi_{qs}(t) \\
 \text{I} \quad V_{qs}(t) &= R_s i_{qs}(t) + \frac{d\Phi_{qs}(t)}{dt} + \omega_s \Phi_{ds}(t) \\
 \text{I} \quad V_{dr} &= R_r i_{dr}(t) + \frac{d\Phi_{dr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr}(t) \\
 \text{I} \quad V_{qr} &= R_r i_{qr}(t) + \frac{d\Phi_{qr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr}(t)
 \end{aligned} \tag{III.1}$$

Avec un flux statorique constant et orienté ( $\Phi_s = \Phi_{ds}$  et  $\Phi_{qs} = 0$ ), ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s i_{sd} \\
 V_{sq} &= R_s i_{sq} + \Phi_{sd} \cdot \omega_s \\
 \text{I} \quad V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \Phi_{rq} (\omega_s - \omega_r) \\
 \text{I} \quad V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \Phi_{rd} (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned} \tag{III.2}$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [13] :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= 0 \\
 V_{sq} &= V_s + \Phi_s \cdot \omega_s \\
 \text{I} \quad V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \Phi_{rq} (\omega_s - \omega_r) \\
 \text{I} \quad V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \Phi_{rd} (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned} \tag{III.3}$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (III.4)$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = \frac{3p}{2} \frac{V_s}{m_s} \frac{i_{sq}}{i_{ds}} \quad (III.5)$$

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances actives et réactives aux courants et tension statoriques imposés par l'onduleur.

### III.4.1 Expressions des puissances active et réactive statorique

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

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

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme [3] :

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

Les puissances active et réactive sont donc fonction des courants statoriques  $i_{qs}$  et  $i_{ds}$  respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire [1] :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_r} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (III.8)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (III.9)$$

Il ressort de l'expression (III.4) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique

d'axe **q**, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe **d** à un constant  $\frac{s}{\omega_s L_s}$  imposé par le réseau.

### III.4.2 Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équations (III.4), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} + \frac{M \cdot V_s}{m_s \cdot L_s} \\ \Phi_{rq} = L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (III.10)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.3), on trouve:

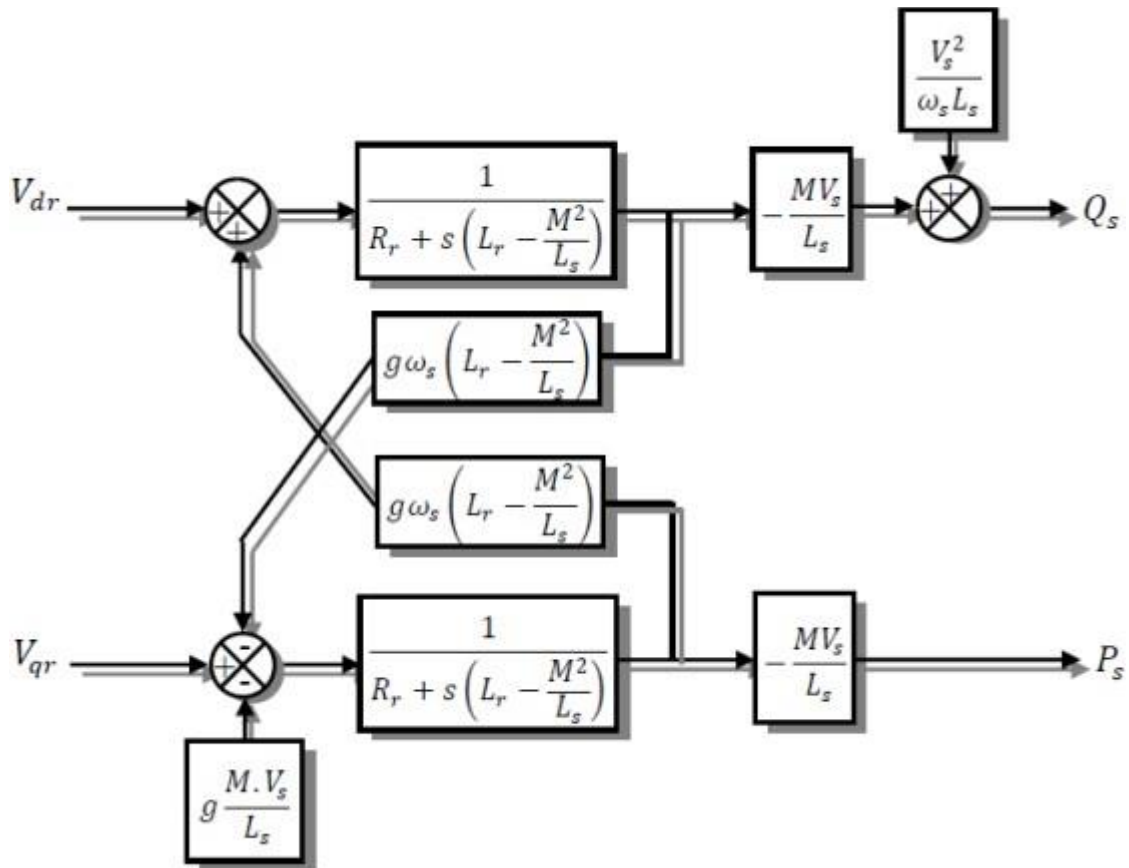
$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{dr} + \mathcal{L} - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} - g \omega_s L_s - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{qr} + \mathcal{L} - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} - g \omega_s L_s - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

A partir des systèmes d'équations (III.9) et (III.11), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

Ou :  $g$  est le glissement de la machine.

$s$  : est la variable fréquentiel ;

$\frac{M \cdot V_s}{L_s}$  : Le terme de couplage entre les deux axes ;



**figure III 2:**Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. Les consignes de puissances devront permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

L'expression  $g \omega_s L_r \frac{M^2}{L_s}$  représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé, Dans ce cas il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

### III.5 Types de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui à été développée par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par k.Hasse.

#### III.5.1 Commande vectorielle directe

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [27]. Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure tel que le problème de filtrage du signal mesuré, la mesure varie en fonction de la température, le coût de production est élevée, (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Bien que la dynamique du système éolien soit faible par rapport à celle de la génératrice, nous pouvons proposer le schéma de principe suivant (figure III.3). Dans ce schéma nous avons utilisé des régulateurs Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler[35],[36].

Pour simplifier la commande de la GADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant [37], [38].

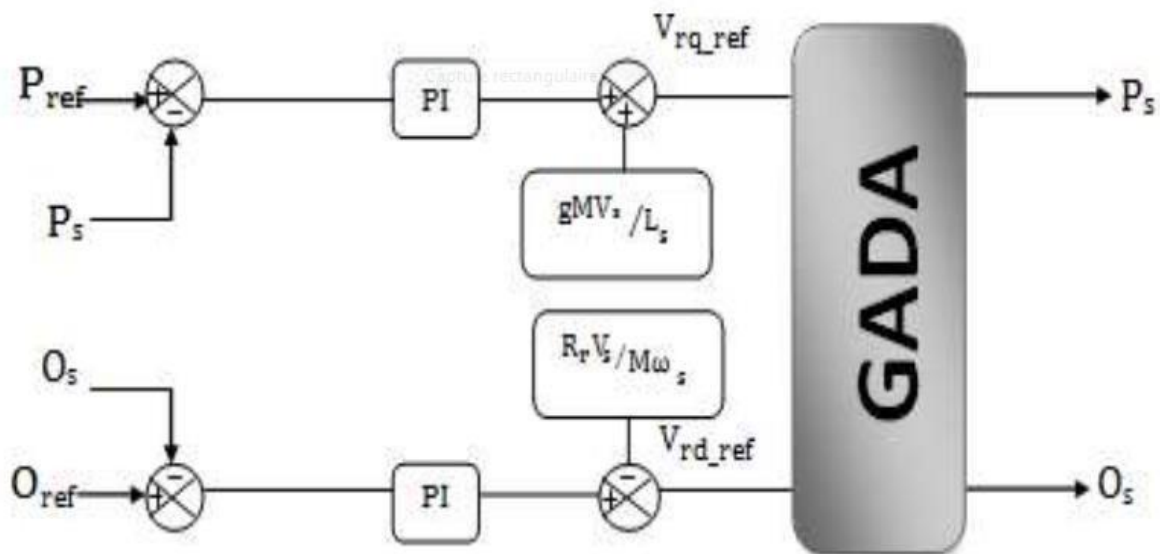


figure III 3: Schéma de principe de la commande vectorielle directe.

### III.5.2 Commande vectorielle indirecte

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte [36].

#### III.5.2.1 Commande en boucle ouvert

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe **d** et **q**.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (III.9) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} \cdot P_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} \cdot Q_{s-ref} + \frac{V_s}{m_s M} \end{cases} \quad (III.12)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

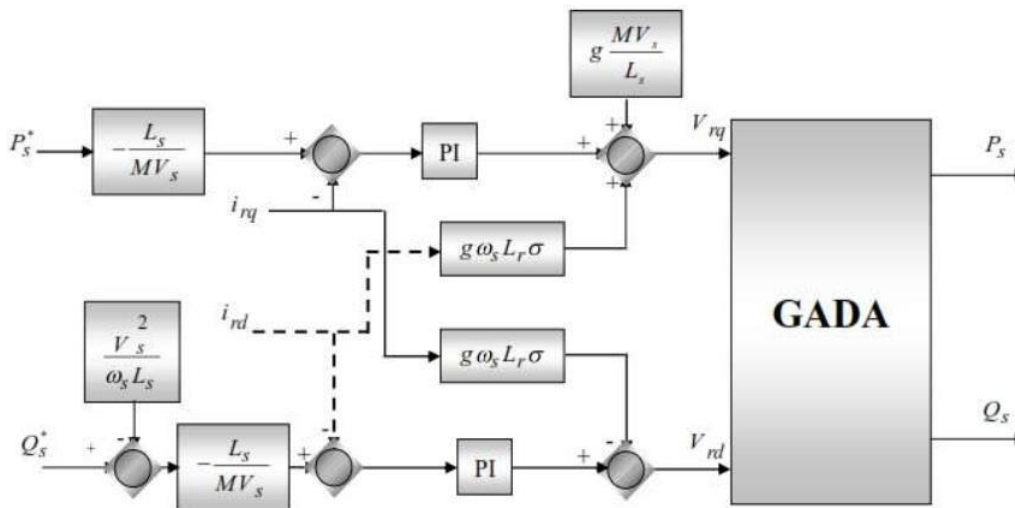


figure III 4: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

### III.5.2.2 Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante.

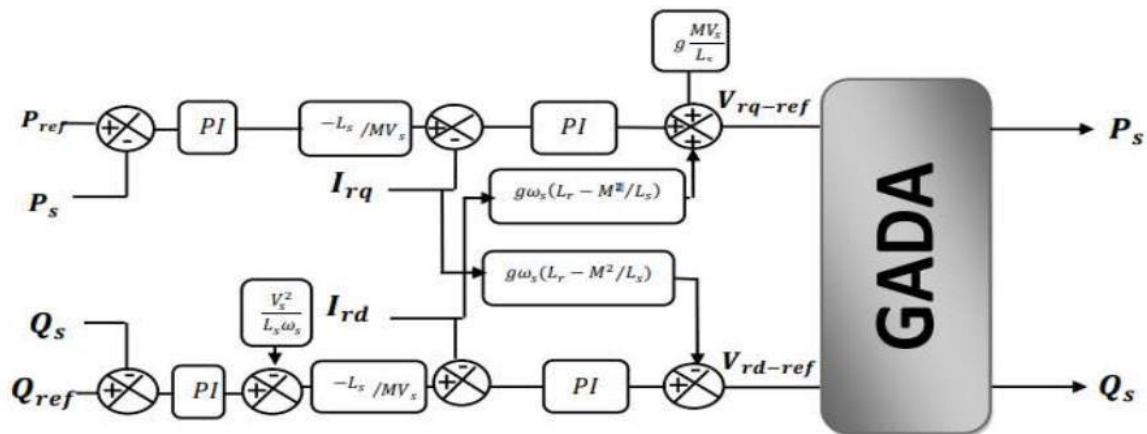
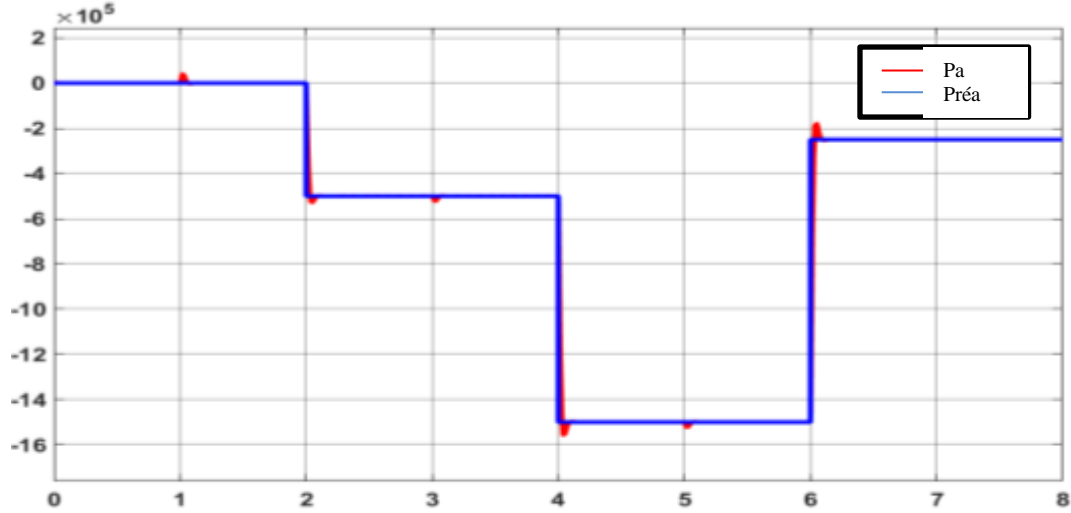


figure III 5: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleur robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. La synthèse des ces régulateurs est détaillée dans l'annexe.

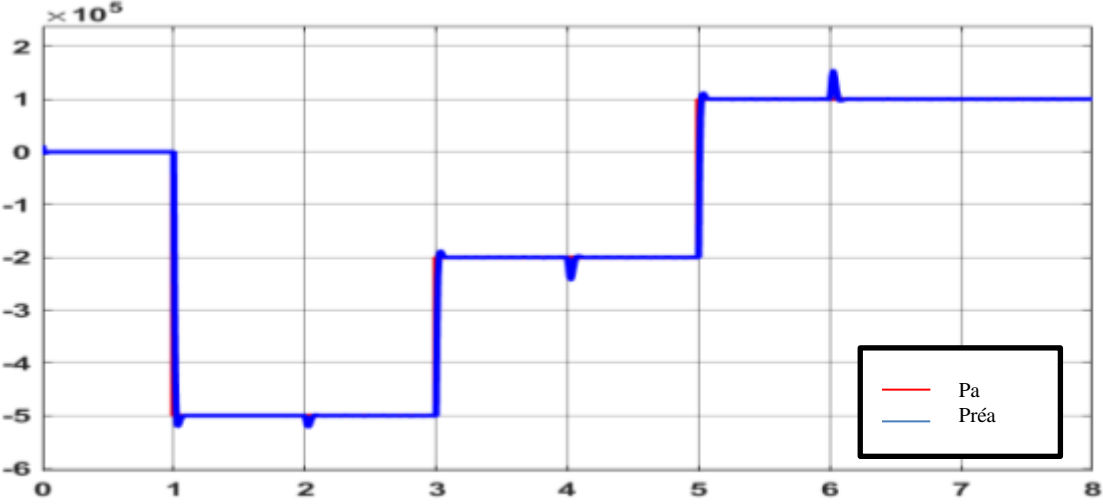
### III.6 Les résultats de simulation de la commande directe et indirecte

#### ➤ Commande directe



Temps [s]

Temps [s]



Temps [s]

Temps [s]

figure III 6: Puissance active et réactive statorique avec la commande directe.

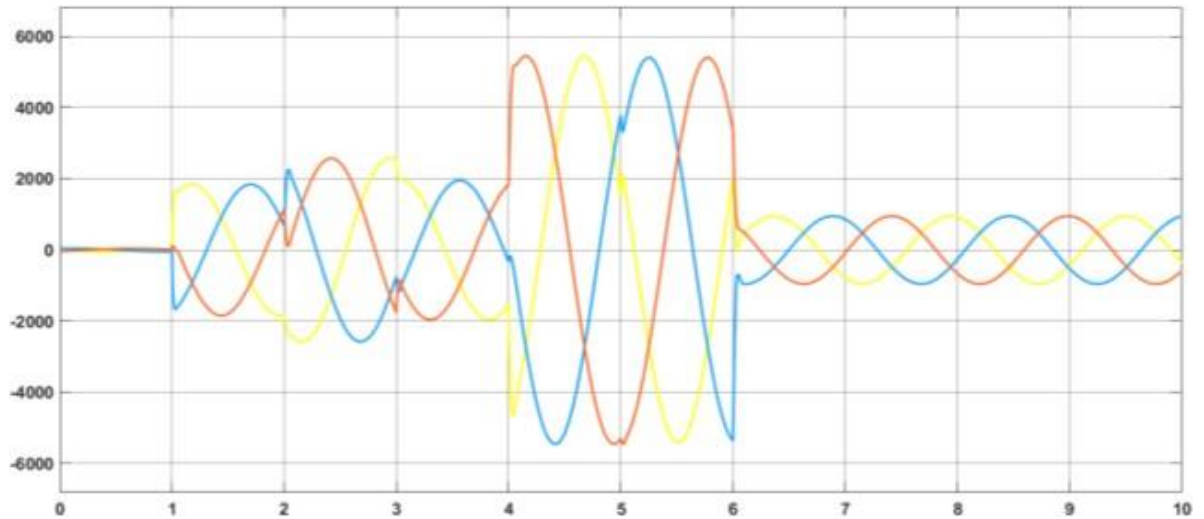


figure III 7: courant statorique

### ➤ Commande indirecte

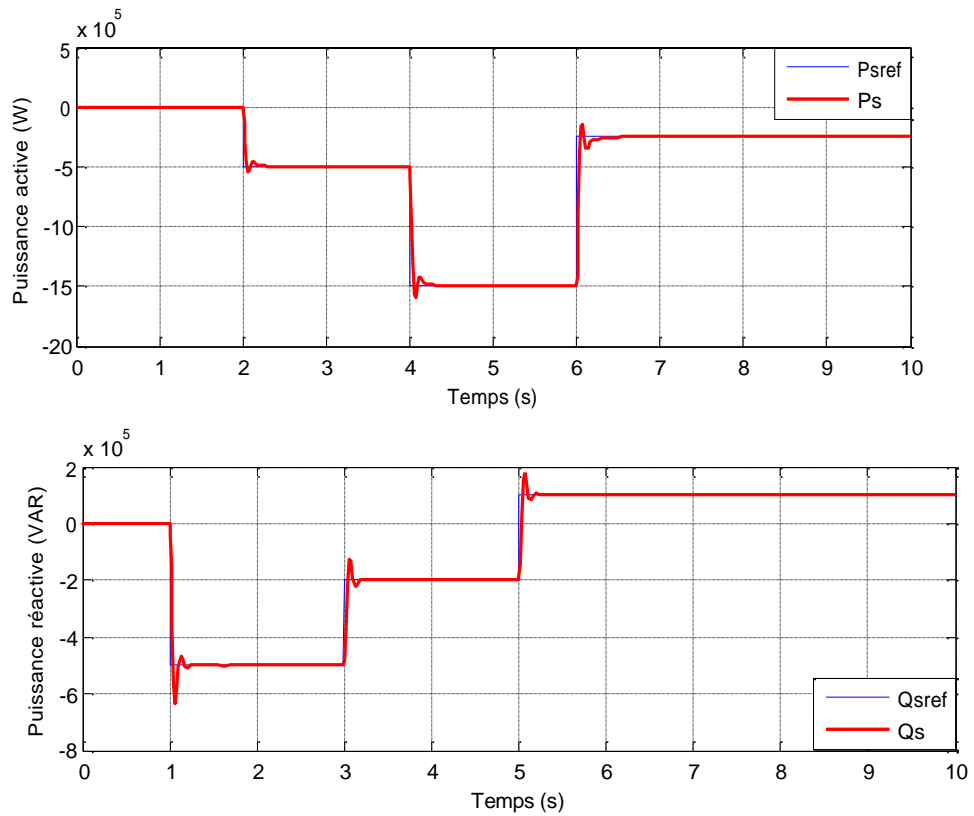


figure III 8: Puissance active et réactive statorique avec la commande indirecte.

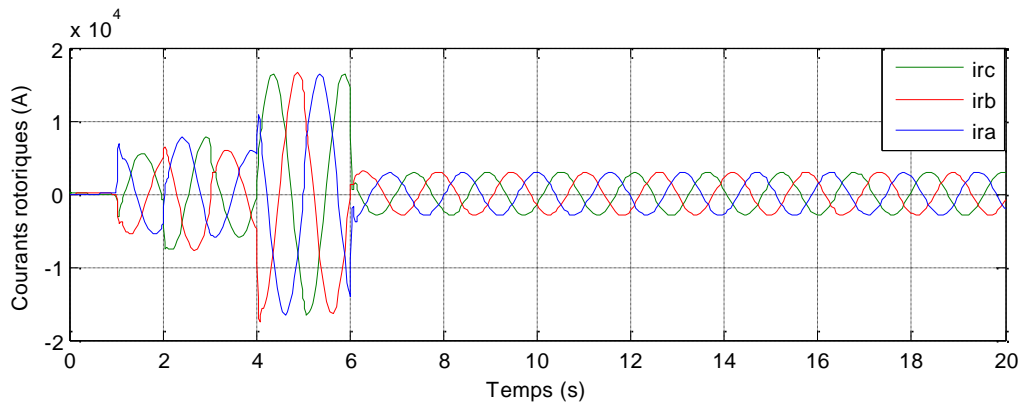


figure III 9: courant rotorique

### III.7 Interprétation des résultats

Les graphiques présentent une comparaison entre les réglages de la puissance active et réactive statorique, effectués à l'aide des méthodes vectorielles directes et indirectes. En observant les résultats de la simulation figure (III.3) et (III.4) et (III.8) on constate que les réglages effectués par un régulateur PI dans les commandes vectorielles directes et indirectes donnent des résultats satisfaisants. La puissance active et réactive, ainsi que la réactivité statorique, répertorie précisément les valeurs de référence souhaitées. Figure (III.5) et (III.9) de plus, le courant est maintenu dans sa plage admissible. Il est intéressant de noter que la réaction du régulateur PI dans la commande indirecte est plus performante que celle de la commande directe en régime transitoire, avec une réduction des oscillations.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique d'une GADA qui nous a permis de simplifier notre modèle mathématique.

Le contrôle des puissances actives et réactives injectées dans le réseau a été présenté par deux méthodes : directe et indirecte. Nous avons également présenté les schémas fonctionnels de chaque commande.

Enfin, nous avons montré plusieurs résultats de simulation réalisés sous MATLAB/SIMULINK d'une éolienne de 2 kW. Ces résultats, montrent que la commande directe règle mieux les puissances mais la commande indirecte offre une meilleure dynamique.

# **Chapitre 4 :**

## **Commande par logique floue**

### IV.1 Introduction

L'utilisation croissante de l'outil informatique et le développement des techniques de régulation dans le domaine industriel est devenu une réalité qui se manifeste car la fiabilité et la puissance du calculateur numérique qui offre la possibilité d'implantation de la loi de commande avec une grande flexibilité du fait qu'elle peut être modifiée par un programme. La commande peut être perçue comme la gestion automatique d'un processus en fonction de consigne d'entrée par action sur une consigne de sortie. La commande floue traite elle aussi ce type de problème, mais avec des outils qui lui sont propres. Pour cela, la logique floue a connu un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années.

### IV.2 Historique de la logique floue

Les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg ont été développées par des chercheurs américains dans les années 20 et 30[39]. Ces recherches ont finalement conduit à l'émergence de la logique floue. Cependant, ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique ont été énoncées dans un article intitulé "Fuzzy sets" par le professeur Lotfi Zadeh, un automaticien de renommée internationale. Depuis lors, il a réalisé de nombreuses avancées théoriques qui ont permis de modéliser des phénomènes sous forme floue, dans le but de pallier les limitations associées aux modèles classiques à équations différentielles et de tenir compte des incertitudes.

Voici l'essentiel de l'historique de la logique floue[39] :

- En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue pour résoudre les problèmes dérégulés ;
- En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la logique floue et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur ;
- En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue [40] ;
- En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la logique floue qui est mis au point avec succès.
- A partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegnoau Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge AïsaïgoPayFuzzy de Matsushita (1990).

### IV.3 Pourquoi utiliser la logique floue ?

Il convient d'utiliser la logique floue lorsque des imperfections entachent la connaissance dont nous disposons sur le système, lorsqu'une modélisation rigoureuse de celui-ci est difficile, lorsqu'il est très complexe, lorsque notre façon naturelle de l'aborder passe par une vue globale de certains de ses aspects. Si elle impose une standardisation de la signification des descriptions du système exprimée linguistiquement, ce qui peut sembler rédacteur par rapport à une utilisation purement symbolique des descriptions linguistiques, la logique floue présente l'avantage de permettre le passage d'une telle description d'un expert ou d'un observateur à l'autre [41].

### IV.4 Les avantages et les inconvénients de la logique floue

#### IV.4.1 Les avantages

- Pas de modèle mathématique requis pour le procédé à réguler.
- La théorie est simple et peut s'appliquer à des systèmes complexes.
- La commande floue est en général robuste.
- La commande peut facilement être auto-adaptative.
- La commande floue permet la capitalisation du savoir-faire
- La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain.

#### IV.4.2 Les inconvénients de la logique floue

- La technique de réglage est totalement empirique.
- Les performances dépendent directement de l'expertise.
- Il y a aucune démonstration possible, par exemple il est impossible de prouver la stabilité de la boucle.
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
- La cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible)..[42].

### IV.5 Domaines d'applications

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, on peut citer [43] :

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

- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...) ;
- Systèmes de conditionnement d'ambiance ;
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet ;
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance ;
- Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules ;
- Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin ;
- Produits de consommation courante.

### IV.6 Principe de la Logique Floue

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système. Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par logique floue [44].

### IV.7 Réglage par la logique floue

Les techniques de régulation 'floue' deviennent intéressantes lorsque la description d'un processus est difficile ou ne peut être représentée par un modèle mathématique. C'est le cas, par exemple, des systèmes complexes qui comprennent plusieurs entrées et sorties (en industrie sidérurgiques, pétrochimiques, réacteurs biologiques et chimiques, en nucléaire, robotique, contrôle de la pollution, etc...) ou dans le cas des systèmes fortement non linéaires (avions, hélicoptères,...).

L'application de la théorie des ensembles repose sur plusieurs technologies, tel que le cluster ING flou dans le traitement d'images (classification), identification et détection de défauts et pannes, contrôleurs flous en incorporant les connaissances d'un expert ou opérateur humain dans une boucle de commande, modélisation floue (expertise humaine), optimisation floue pour résoudre des problèmes de conception (design problème) [45].

### IV.7.1 Notions fondamentales de la logique floue

Dans cette section, nous présentons les notions de base de la logique floue. Nous aborderons uniquement les points les plus importants pour la compréhension d'un raisonnement flou à savoir :

#### IV.7.1.1 Ensembles flous

Dans la théorie des ensembles conventionnels, une chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne grande et une autre de grandeur moyenne ? C'est à partir de ce genre de constatation que Zadeh a développé sa théorie. Il a défini les ensembles flous comme étant des termes linguistiques du genre : zéro, grand, négatif, petit ... Ces termes existent aussi dans les ensembles conventionnels [46].

Toutefois, la distinction entre ces deux théories relatives aux ensembles réside dans leurs limites respectives. Les ensembles flous autorisent la notion de degré d'appartenance, ou une chose peut appartenir partiellement à un ensemble. En revanche, les ensembles conventionnels ne permettent que des degrés d'appartenance de 0 ou 1. En logique floue, le degré d'appartenance est représenté par une fonction d'appartenance  $\mu$  qui prend une valeur réelle entre 0 et 1 [47].

Un exemple simple d'ensembles flous est la classification des personnes selon leur âge en trois ensembles : jeune, moyen et vieux. La façon d'établir cette classification est présentée à la figure (IV.1).

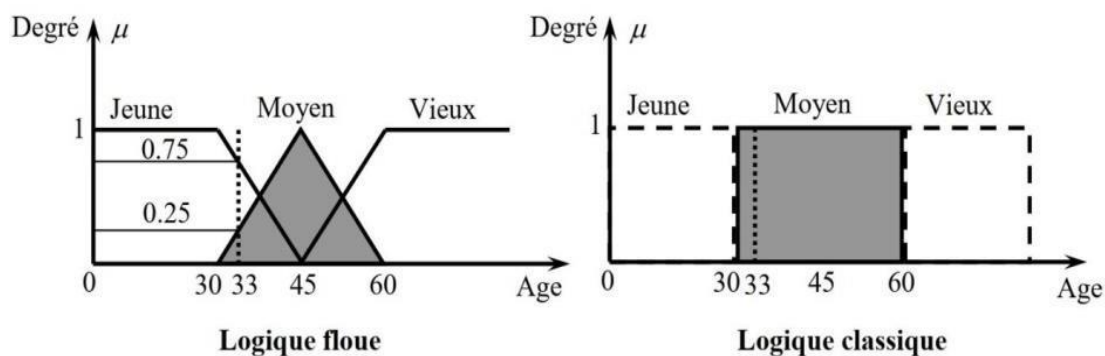


figure IV 1: Classification des ensembles flous

La représentation graphique indique que les frontières entre les trois groupes ne changent pas brusquement, mais de manière progressive. Par exemple, une personne de 33 ans est considérée comme appartenant au groupe « jeune » avec un degré d'appartenance de 0,75 et au groupe « moyen » avec un degré d'appartenance de 0,25. Cette figure illustre le

## **Chapitre 4 : Commande par logique floue**

---

degré d'appartenance d'une personne a ensemble floue en fonction de son âge , ce qui est

## Chapitre 4 : Commande par logique floue

---

appelé une fonction d'appartenance . Ainsi, la terminologie peut être résumée dans l'illustration suivante :

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| <b>Variable linguistique</b>              | <b>Âge</b>                        |
| <b>Valeur d'une variable linguistique</b> | Jeune, Moyen, Vieux, ...          |
| <b>Ensembles flous</b>                    | "jeune", "moyen", "Vieux",<br>... |
| <b>Plage de valeurs</b>                   | (0, 30, 45,60, ...)               |

### IV.7.1.2 Opérateurs logique flous [48]

tableau IV 1: Opérateur logique

| Opérateur          | Application                                    |
|--------------------|--|
| <b>Ou</b>          | $A \text{ OU } B = \max(A, B)$                 |
| <b>ET</b>          | $A \text{ ET } B = \min(A, B)$                 |
| <b>NON</b>         | $\text{NON } A = 1 - A$                        |
| <b>OU Exclusif</b> | $A \text{ OU Ex } B = \max(A, B) - \min(A, B)$ |

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs **ET**, **OU**, négation.

## IV.8 Structure de la commande par logique floue

Les quatre composants de base d'un système flou sont : la fuzzification, le mécanisme d'inférence floue, la base de règles et la défuzzification (Figure IV.2). La conception d'un système flou est constituée de trois étapes principales : la conversion des entrées en valeurs floues, l'évaluation des règles et la conversion du résultat des règles en une valeur numérique de sortie. La première étape est donc la fuzzification ; pour transformer les grandeurs physiques (entrées) en valeurs linguistiques (sous ensemble floue). La deuxième étape concerne le module d'inférence, qui est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles. Enfin, l'étape de défuzzification qui permet d'inférer une valeur nette (précise), utilisable en commande par exemple, à partir l'agrégation des règles.

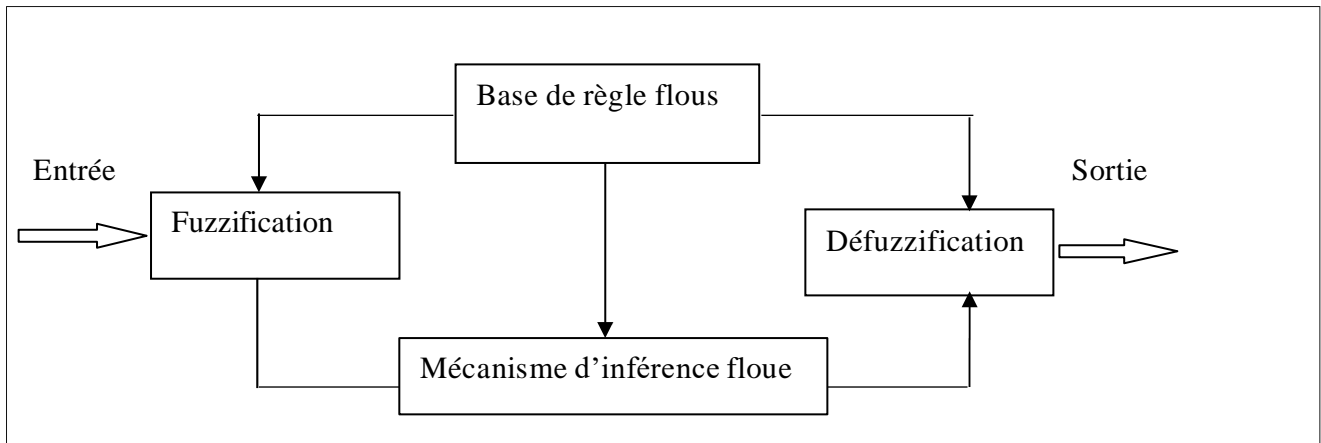


figure IV 2. Schéma synoptique général d'un système flou

### IV.8.1 Fuzzification

La fuzzification consiste une opération de transformation de la grandeur physique réelle d'entrée en une grandeur floue à l'aide des ensembles flous. La fuzzification permet de donner le degré avec lequel une grandeur physique apparié à un ensemble flou en utilisant des fonctions d'appartenance.

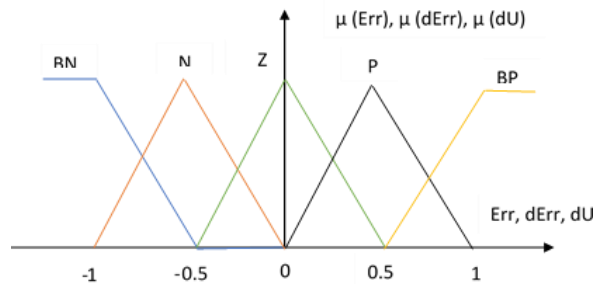


figure IV 3 :Fuzzification avec cinq fonctions d'appartenance symétriques et non équidistantes

### IV.8.2 Mécanisme d'inférence flou

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base de règles floues, une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance [49] :

- Méthode d'inférence max
- Méthode d'inférence min
- Méthode d'inférence somme

Les règles d'inférences conduisent à adapter une table de décision anti-diagonale, résumant les règles choisies ; cette table figure dans le **Tableau IV.2** est appelée de

## Chapitre 4 : Commande par logique floue

---

MACVICAR\_WHELAN 86. Ce tableau montre la matrice de CF pour une partition de 5 sous-ensembles flous pour chaque variable d'entrée E(t) et dE(t).

tableau IV 2 : Matrice d'inférence du régulateur flou pour 5 sous-ensembles-flous

| E / DE | NG | NP | EZ | PP | PG |
|--------|----|----|----|----|----|
| NG     | NG | NG | NG | NP | ZE |
| NP     | NG | NP | NP | ZE | PP |
| EZ     | NP | NP | ZE | PP | PP |
| PP     | NP | ZE | PP | PP | PG |
| PG     | ZE | PP | PP | PG | PG |

Les différents ensembles flous sont caractérisés par des désignations standards, la signification des symboles et par exemple :

- **NG** : Négative Grande.
- **NP** : Négative Petite.
- **ZE** : Environ Zéro.
- **PP** : Positive Petite.
- **PG** : Positive Grande.

La méthode d'inférence choisie est celle de MAMDANI, c'est la méthodologie la plus couramment utilisée. Dans cette méthode, le calcul de minimum est utilisé pour l'opérateur « ET », tandis que le calcul de maximum est utilisé pour l'opérateur « OU ». Alors, la fonction produit est utilisée pour représenter l'opérateur « ET », la fonction somme ou moyenne est utilisée pour représenter l'opérateur « OU ». Pour la conclusion, la fonction produit est utilisée pour représenter l'opérateur « ALORS ». En conséquent, la sortie floue du régulateur Urés est le résultat de contribution de 25 règles floues de la matrice d'inférence.

### IV.8.3 Base de règles

La base de règles floues considère l'architecture générale du système. C'est-à-dire, elle contient les règles floues décrivant le comportement du système, où ces règles prennent la forme suivante : « Si permisse Alors conclusion ».

### IV.8.4 Défuzzification

Le rôle de la défuzzification est de transformer la grandeur floue issue de Figure IV.2 avec cinq fonctions d'appartenance symétriques et non équidistantes la partie d'inférence en grandeur physique [50].

### IV.9 Application de la commande par la logique floue à la MADA

Dans le système présenté dans cette étude, deux régulateurs indépendants à base de la logique floue sont utilisés pour produire les tensions de référence souhaitées à la commande des puissances actives et réactives dans le stator de GADA ( $P_s$ ,  $Q_s$ ).

Comme il est représenté sur la figure IV.4, dans le contrôleur floue CF, la valeur de référence  $r(t)$  est comparée à la valeur réelle (mesurée)  $y(t)$  pour obtenir l'erreur  $\Delta(t)$ .

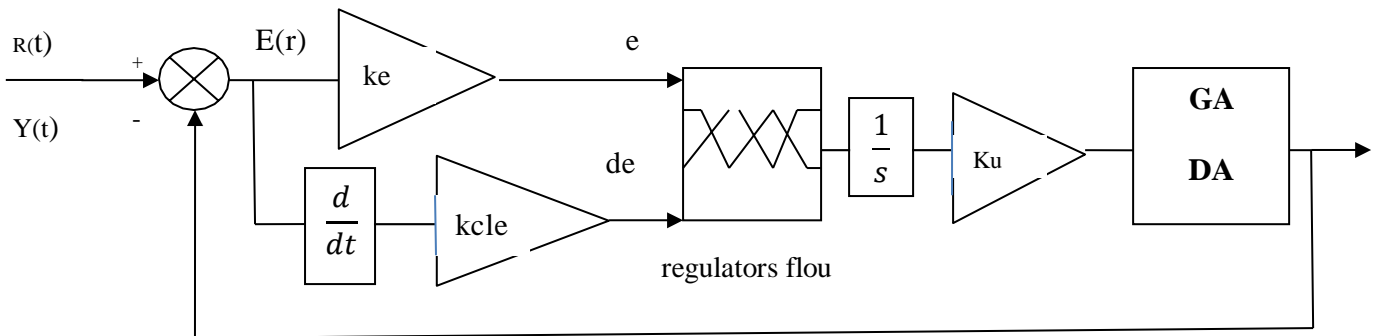


figure IV 4: Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.

Les deux entrées du contrôleur floue (CF) sont l'erreur de la puissance active ou réactive et sa variation. La sortie du régulateur correspond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme il est montré dans le schéma.

$Ke$ ,  $Kde$  et  $Ku$  sont des gains de normalisation associés à  $e(t)$ ,  $de(t)$ ,  $U(t)$  respectivement. Ils permettent de changer la sensibilité du régulateur floue sans en changer la structure. Les grandeurs  $[E(t), de(t), U(t)]$  indicées sont donc les grandeurs normalisées à l'entrée et la sortie du CF.

Pour assurer un bon fonctionnement, il est crucial de normaliser les grandeurs d'entrées et de sortie. Les gains d'entrées permettent de contrôler l'impact des entrées sur le CF, tandis que le gain de sortie influence directement sur la commande envoyée au processus. Les gains d'entrées sont étroitement liés au gain de sortie car les réglages des gains d'entrée ont une incidence sur la sortie du CF. Si les réglages sont mal choisis, cela peut entraîner une erreur dans les résultats [51].

#### IV.9.1 Résultats de simulation

Pour appliquer cette commande à notre système, on a utilisé la même structure de commande vectorielle directe  $s$  dans le chapitre précédent avec un changement des régulateurs PI par des régulateurs flous de mêmes types (régulateur de type Mamdani à cinq classes), qui possèdent les mêmes fonctions d'appartenance. La différence réside dans les gains de normalisation (facteurs d'échelles). L'objectif de notre travail est d'appliquer cette

## Chapitre 4 : Commande par logique floue

commande pour contrôler en permanence et indépendamment la puissance active et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. Les hypothèses de simulation ont été effectuées sous les mêmes conditions, et avec les mêmes profils dans le but de voir les nouvelles qualités de poursuite et de régulation ainsi que la robustesse de la commande [52].

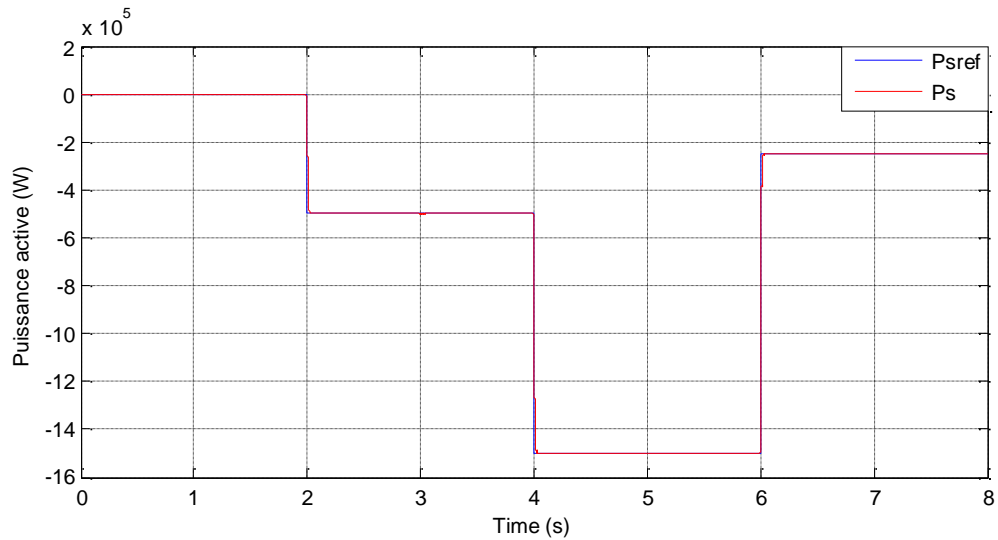


figure IV 5: puissance active

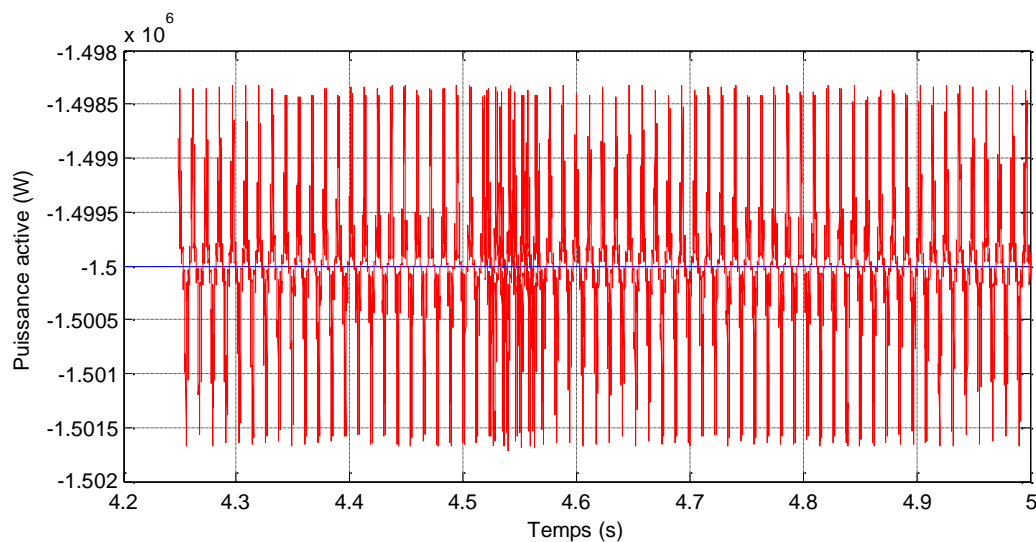


figure IV 6: Puissance active avec zoom

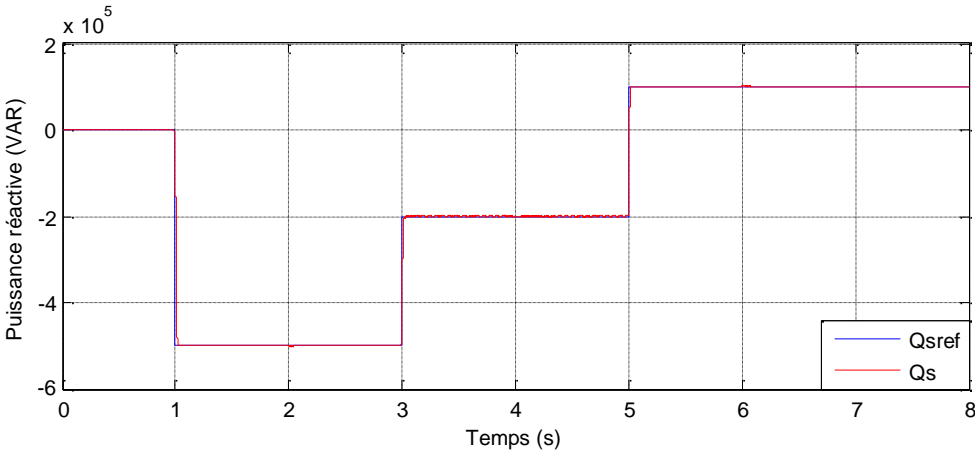


figure IV 7:Puissance réactive

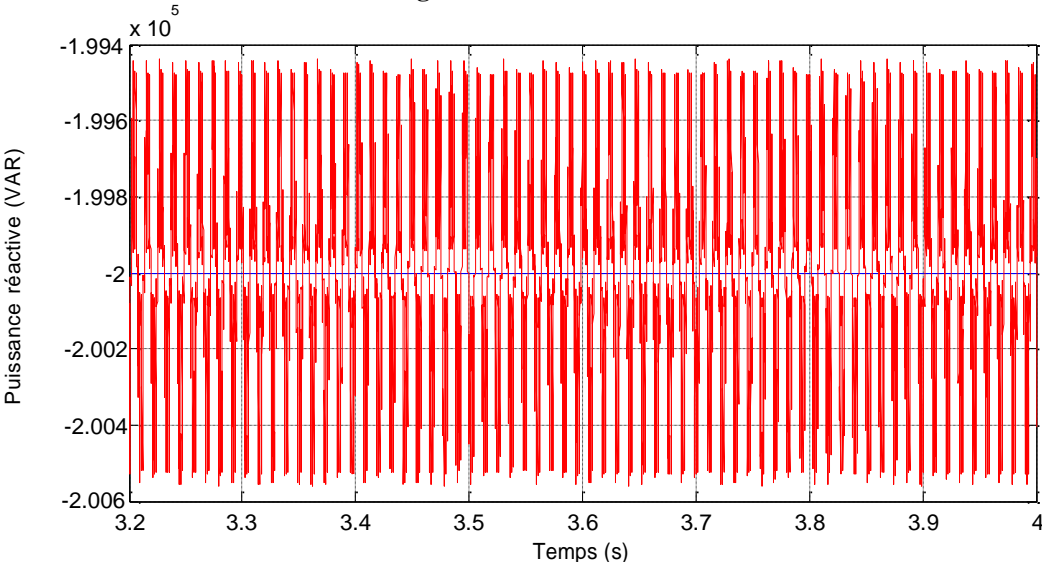


figure IV 8 :Puissance réactive avec zoom

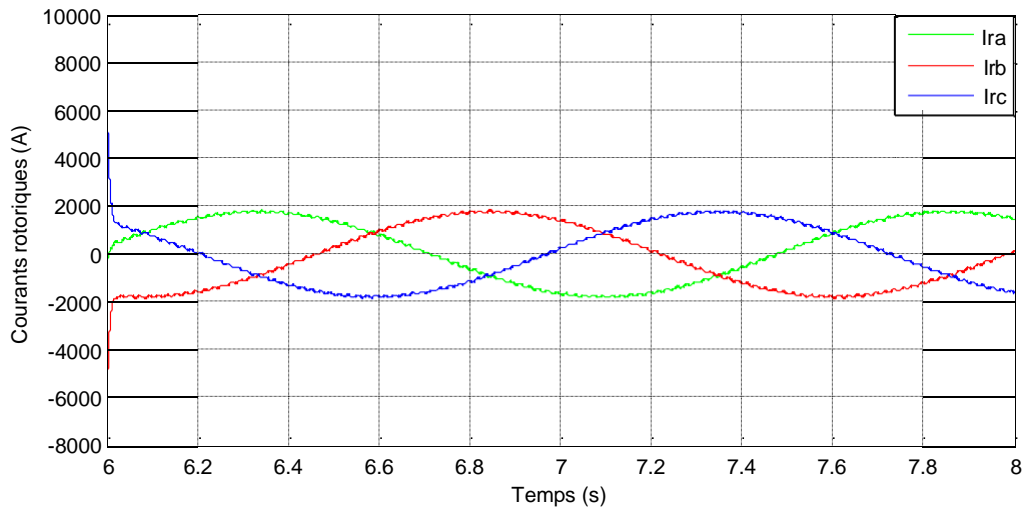


figure IV 9 : courants rotoriques

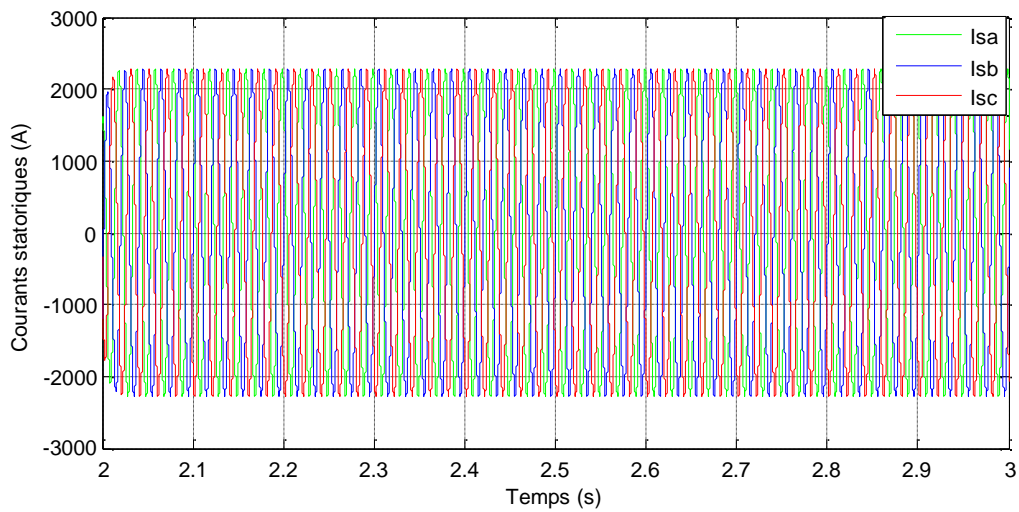


figure IV 10: courants statoriques

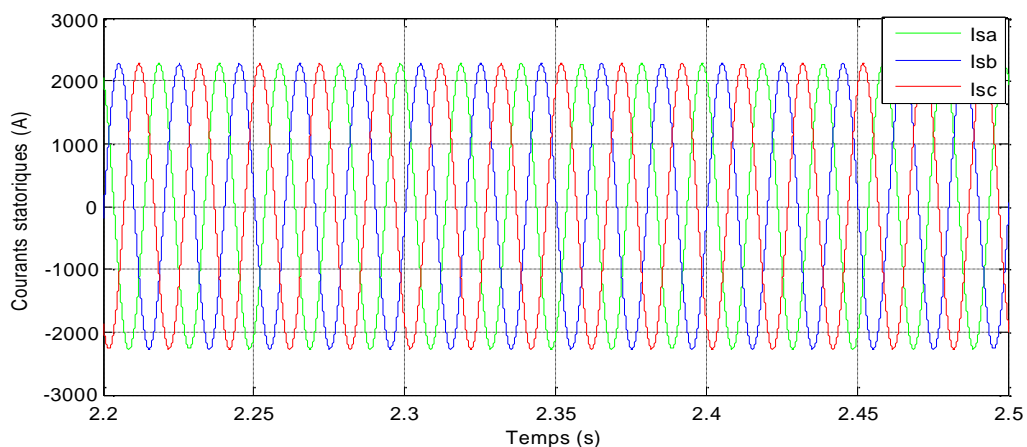


figure IV 11: Courants statoriques avec zoom

Les figures ci-dessous montrent les performances par logique floue type des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA.

### **IV.9.2 Interprétation des résultats**

D'après les courbes des figures (IV.5 et IV.6) qui représentent les résultats de simulation, il est évident que la méthode de commande floue permet une séparation totale entre les deux aspects de la puissance statorique, à savoir la puissance active et réactive. Les résultats de la simulation démontrent clairement que l'utilisation de cette méthode de commande permet de maintenir les valeurs de la puissance active et réactive à leur niveau désiré, tout en amélioration se manifeste notamment par une réponse rapide en régime transitoire et lors de changements de consignes, une minimisation maximale de l'erreur entre les valeurs de consigne et les valeurs mesurées (presque nulle), ainsi qu'une réduction significative des oscillations de puissance et aussi les courants rotoriques et statorique sont en forme sinusoïdales équilibré.

### **IV.10 Conclusion**

Ce chapitre expose une méthode de contrôle basée sur la logique floue pour le système de conversion d'énergie d'une génératrice asynchrone à double alimentation, cette approche est particulièrement utile pour surmonter les incertitudes du modèle et les défis associés à la commande non linéaire. Nous avons donné une application de commande des puissances par logique floue de La MADA, qui sont découplées par orientation du flux statorique.

Les résultats des simulations numériques ont prouvé l'efficacité croissante de cette méthode de contrôle dans les électriques, en particulier en termes de réponse rapide et précise sans dépassement. Cette approche assure également le découplage et la stabilité du système.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

Le travail réalisé dans cette mémoire a permis d'étudier et d'analyser les performances d'une génératrice asynchrone double alimentation. Nous avons d'abord eu recours à la commande vectorielle, qui à son tour offre des résultats un peu limités en terme de suivi de consigne en présence d'une contrainte.

Ainsi afin de pallier les inconvénients de la commande vectorielle, on a pensé à de nouvelles techniques de commande intelligentes, notamment de commande par la logique floue. Ces commandes intelligentes ont montré d'excellents résultats, notamment en termes de flexibilité et d'organisation.

Pour mener à bien ce travail, nous avons commencé au chapitre 1 par une introduction aux éoliennes, les différents types des éoliennes et les composants qui la constituent. Ensuite, Nous décrivons les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients.

Le second chapitre a été dédié à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, premièrement on modélisera la partie mécanique (la turbine, le multiplicateur, et l'arbre mécanique) puis dans la seconde partie on modélisera la partie électrique (la GADA et l'onduleur).

Ensuite, pour le troisième chapitre on a présenté la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Finalement dans le dernier chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous, Nous avons montré comment appliquer cette théorie en vue de la conception d'un régulateur flou. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée afin de maintenir la tension du bus continu constante, différents essais sont effectués. Les résultats obtenus montrent que le régulateur flou présente des performances de poursuite très satisfaisantes.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, il est possible d'aboutir à des perspectives intéressantes pouvant contribuer à améliorer le fonctionnement du dispositif :

- Utilisation des onduleurs multi-niveaux.
- Application d'autres stratégies de commande au système d'énergie éolienne.

# **Références bibliographies**

## Références bibliographies

---

- [1] Mr. REGUIG Bilal ;"Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation« Application à l'énergie éolienne » ; mémoire de master ;2015 / 2016
- [2]S. khojet el khil,«Commande vectorielle d'une machine asynchrone double alimentée (MADA)»,thèse de doctorat ,institut national polytechnique detoulouse,décembre2006.
- [3]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
- [4] Rabia BEHLOUL /Sabrina Amina MOKRANI/ Etude, «Modélisation Et Commande d'une Eolienne A Base d'une MADA» ; HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES--T L E M C E N—.
- [5] <https://www.energy.gov.dz/> Site officiel du ministère de l'énergie consulté le 14 /02/2020 à 15:00.
- [6] Ben kadem.S ,Benmebarek D, Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne ;(Université Ahmed Draïa Adrar) 2018.
- [7]<https://www.clicours.com/generalites-sur-les-systemes-eoliennes/> Généralités sur les systèmes éoliennes. June 16th, 2023
- [8] BEN AMAR ASMA ; ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA ; (Ingénieur d'état en Electrotechnique, Université El-Oued) Soutenu le : 24/04/2016.
- [9] M. Bahia ; "Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister API Université de TLEMCEM, 2011.
- [10] A. Davigny. « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [11] H. Camblong ;"Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable" ;Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
- [12] N. Abu-Tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat de l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon , 2008.
- [13] F. MERRAHI, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)", mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique. 30/06/2007.

## Références bibliographies

---

- [14] BOUDISSA MALIKA ;BOUDJEMIL HOURIA ;"Commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone à aimants permanents" ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU2017.
- [15] Pr. Rahem Djamel ; Dr. AberkaneHesna ;" Modélisation et Commande d'un Système de Production de l'Energie Electrique" ; Université Larbi Ben Mhidi –Oum El Bouaghi ;Juin 2021.
- [16] TRIA Fatma Zahra ;"Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien" Université Mohamed Khider-BiskraSoutenue le : 13/02/2018.
- [17] roumani khayra ,‘’ Contribution à des commandes robustes à des sources d'énergie nouvelle et à leur connexion aux réseaux électriques ‘thèse doctorat, université oran,2020.
- [18] merouraymen ,bououdouraymen ,’’ Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique’’, université Guelma 2021.AboubakrBelkaïd – Tlemcen, 2016.
- [19] Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [20] Hemdane Ahmed Abderrahmane , Si Tayeb Zohra ’’ Etude d'une chaine de conversion d'énergie Eolienne ‘’ université tizi-ouzou 2018
- [21] BEGHNI Ayman , BELKHADEM abderrezak , ZOUDJI Abderrezak’’COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UNE EOLIENNE A BASE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (GADA)’’ université naama 2022.
- [22] DiabHamza ,SighiAbdElhakim , AouadiAissa , BerroussiAbdElrazak’’ Modélisation et simulation de la turbine éolienne’’ université el oued 2022.
- [23] Benkhaledbilal,‘’ Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne ‘’ université m'sila 2013
- [24] A. MIRECKI, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. L'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [25] S. El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences Technologies Delille, France ,2004
- [26] Abdelkarim CHEMIDI, Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme, THESE De Doctorat, Université Abou BekrBelkaïd de Tlemcen, 2015.

## Références bibliographies

---

- [27] A. BOYETTE, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [28] BAKOURI Nacera, " Etude et Commande des Générateurs pour Réseaux Autonomes de Bord d'Avions " université bejaia 2013
- [29] Merabetsalaheddine , " Commande à mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation" Ingénieur d'Etat en Electrotechnique ,mémoire de magister , université oum el bouaghi 2017.
- [30] Arezki ARAB SAID Zahra AIT AIDER , "Commande en vitesse d'une Machine Asynchrone à double alimentation (MADA) en vue de la production de l'énergie électrique connectée au réseau " , université tiziouzou 2017
- [31] **LEBADI NASSIREDDINE2. LOUAFI LEYLA** « CONTROLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DELA MADA » université msila 2018
- [32] Mokrane Smaili "Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur À Machine Asynchrone À Double Alimentation En Vue De Simulation Des Problèmes De Cogénération" , Mémoire présenté Comme Exigence Partielle De La Maitrise En Ingénieure, Université Du Quebec En AbitibiTemiscamingue,2013
- [33]GHEMAM AMARA SEDDIK -GHEMAM AMARA ABDELLATIF –SADOUN ABDELKADER Contrôle des puissance d'un system éolien basé sur une MADA université el oued 2020
- [34] Mohammed Malki ,Saïd Ali Belarbi, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine+MADA+Réseau) en mode continu et discret» ,Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen,2014.
- [35] S. HEIER, «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Publications JohnWiley ET Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [36] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [37] B.BOUKHEZZAR ; «les Stratégies de Commande pour l'optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI Orsay ; 23 février 2006.
- [38] C. NICHITA, D.LUCA, B.DAKYO, E.CEANGA, N.A.CUTULULIS, « Modelling non-stationary wind speed for renewable energy systems control», The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle III, 2000, pp.29-34.

## Références bibliographiques

---

- [39] A. Mechernene, " Commande Neuro-Floue Adaptative pour la Régulation de Vitesse d'un Moteur Asynchrone", Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure d'enseignement Technique d'Oran, Algérie, 2008.
- [40]F. Michel, " Application de la Logique Floue dans la Commande des Machines Synchrones à Aimants Permanents ", Thèse Présentée en vue de l'obtention de la Maîtrise en Sciences Appliquées, Faculté d'ingénierie, Université de Moncton, Canada, 2007.
- [41]F Charif ;" Commande directe de couple par la logique floue de la machine synchrone à aimant permanent - 2022 - dspace.univ-msila.dz.
- [42] KA DEBOUZE Aymen ;"Commande floue des machines électriques- 2019 - dspace.univ-guelma.dz.
- [43] M. Khami, "Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique Neuro-flou", Mémoire de master, université de Ouargla, 2013.
- [44]MAMA GHANI , FATIMA DHIMAN,COMMANDE VECTORILLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMONTATION PAR LA LOGIQUE FLOUE Mémoire de Master, univ \_Adrar, 2017.
- [45] Commande Intelligente I. Logique Floue UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2017-2018.
- [46] El-amria, Zeghlache; Salwa, Lachi; Enca/ Abdelmadjid, CHOUCHE ;"Commande par la logique floue d'une chaîne de conversion éolienne" ;Mémoire de Master \_uiniv\_msila\_2022.
- [47] B. Kosko, Neural Network, Fuzzy Systems «A Dynamical System Approach toMachineIntelligence» Prentice-Hall, Englewood Cliffs N J, 1991].
- [48] TAMAART , Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADAA, Mémoire de doctorat - Université Mohamed Khider, Biskra, 2015.
- [49] A Ghecham ;Commande non linéaire d'un système à énergie renouvelable dspace.univ\_msila.dz- 2022.
- [50] C.MINH« commande numérique de machines asynchrones par logique floue »Université Laval.
- [51] El-amria, Zeghlache; Salwa, Lachi; Enca/ Abdelmadjid, CHOUCHE, Commande par la logique floue d'une chaîne de conversion éolienne ; mémoire de Master \_uiniv\_msila\_2022.
- [52] A Chaiba ;Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle ,mémoire de doctorat,eprints.univ-batna2.dz - 2010.

## Annexe A

### Données de la machine asynchrone à double alimentation (GADA)

#### Paramètres :

Tension nominal statorique :  $V_s = 230$

Résistance du rotor :  $R_r = 0.02 \Omega$

Inductance stator :  $L_s = 0.0135 \text{ H}$

Inductance du rotor :  $L_r = 0.0136 \text{ H}$

Inductance mutuelle :  $M = 0.135 \text{ H}$

$\text{Sig} = 1 - M^2 / (L_s * L_r)$

$W_s = 314$

## المخلص

في هذا العمل، يتم استخدام إستراتيجية التحكم المنطقي الضبابي للتحكم في نظام مجهز بمولد غير متزامن مزدوج التغذية أكثر ما يبرر مشكلة استخدام قانون التحكم غير الخطي بهذه الطريقة. الهدف هو تطبيق هذا الأمر للتحكم بشكل مستقل في القوى النشطة والتفاعلية التي تولدها الآلة غير المتزامنة.

## الكلمات المفتاحية

توربينات الرياح، التحكم المنطقي الضبابي، التحكم الشعاعي. مولد غير متزامن ثنائي التغذية

---

## Résumé

Dans ce travail, une stratégie de commande par logique floue est utilisée pour commander un système éolien qui est équipé d'une génératrice asynchrone à double alimentation "GADA". Le problème de l'utilisation d'une loi de commande non linéaire est le plus justifié par cette méthode. L'application d'une technique intelligente pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone est l'objectif.

## Mots clés

Génératrice asynchrone double alimentation GADA, Eolienne, Commande par logique floue, Commande vectorielle.

---

## Abstract

In this work, a fuzzy logic control strategy is used to control a wind system that has a "DFIG" (double fed induction generator). The problem of using a non-linear law of command is best justified by this method. The goal is to use this instruction to independently control the active and reactive powers produced by the asynchronous machine.

## Keywords

Dual-feed induction generator (DFIG), wind turbine, fuzzy logic control, Vector control.