



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

## MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Electrotechnique, Réseaux électriques

Présenté par

**GRAINIA Iness**  
**ZIDAT Manel**

## Commande avancée d'une machine éolienne de type GADA

Encadré par

**Dr. REKIK Badri**  
ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCA. Karima SMILI	Présidente	ENSTI
MCA. Azzeddine DEKHANE	Examinateur	ENSTI
MAB. Mohamed ROUAMEL	Examinateur	ENSTI

# *Dédicaces*

*Louanges à Dieu, qui a ouvert les chemins pour nous, nous a aidés à les parcourir et a permis l'accomplissement de tous nos objectifs par Son intermédiaire.*

*À ma chère mère, BAKHOUCHE Rabiaa, qui a été une source constante d'inspiration dans ma vie. Son amour indéfectible et son rôle profond dans la formation de mon identité sont gravés en moi. Je suis convaincu qu'elle est fière. Chaque succès que j'ai accompli est un hommage à son amour et à son influence.*

*À mon cher père, je dédie mes succès et mes réalisations, en reconnaissance de tout ce que vous avez accompli et continuez à faire pour moi.*

*À ma précieuse compagne de mémoire, ZIDAT Manel, notre partenariat a été essentiel dans nos réussites académiques. Je suis profondément reconnaissante pour tout ce que nous avons accompli ensemble.*

*À Aya, ma sœur, et à mes meilleures amies : ARUIA Yousra, MAHDI Quods, SEMARI Douha et GHADJETI Nouha, qui ont rendu ce parcours mémorable et m'ont soutenue dans les hauts comme dans les bas.*

*Enfin, à toutes les personnes — famille ou amis — qui m'ont apporté un soutien constant : merci du fond du cœur pour votre aide et votre présence.*

**GRAINIA Iness**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail de fin d'études à toutes les personnes qui me sont chères, et sans qui ce parcours n'aurait pas été possible :*

*À mes parents, pour leur amour, leur patience et leurs innombrables sacrifices.*

*À Tito, pour sa présence, ses gestes attentionnés et son amour inconditionnel.  
Merci d'être toujours là.*

*À ma sœur, sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Merci de m'avoir soutenue à chaque étape, et de continuer à le faire avec autant de cœur.*

*À ma meilleure amie Anaïs, on a tous besoin d'une touche de folie dans nos vies, et tu es la mienne. Merci d'égayer mon quotidien.*

*À tous mes amis, pour leur soutien indéfectible et les moments partagés qui ont rendu cette aventure exceptionnellement riche, humaine et inoubliable.*

*Un grand merci à l'incubateur pour m'avoir accueillie dans un cadre propice au travail. Et une mention toute spéciale à la dame formidable qui y travaille, un vrai rayon de soleil : merci pour ta gentillesse et ta bonne humeur.*

*Et enfin, à la meilleure binôme du monde : un heureux hasard nous a mises sur le même chemin, et c'était sans doute le meilleur des parcours à vivre.*

*Bien sûr, je ne peux citer tout le monde, mais merci à chacun d'entre vous.*

*Ce projet est le reflet de tout ce que vous m'avez transmis.*

**ZIDAT Manel**

# Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout-puissant, de nous avoir donné la force, la capacité et la guidance pour accomplir ce travail de recherche.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos chers parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et les sacrifices endurés.

Nous tenons à remercier notre encadrant, Monsieur REKIK Badri, Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure des Technologies et d'Ingénierie, pour ses conseils avisés, sa disponibilité, ainsi que pour la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions chaleureusement l'École Nationale Supérieure des Technologies et d'Ingénieurs pour la qualité de la formation dispensée, l'environnement stimulant qu'elle offre à ses étudiants, et les valeurs humaines et professionnelles qu'elle nous a transmises tout au long de notre parcours.

Nous remercions aussi Monsieur DEKHANE Azzeddine pour ses interventions utiles au cours de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude et nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

## **Abstract**

The scientific community widely agrees that climate change caused by human activities constitutes a serious threat to the balance of natural ecosystems and the stability of human societies worldwide. Currently, wind energy has become an essential part of the energy mix in many countries. The uncertain and random characteristics of wind energy pose challenges to maintaining steady energy production. This study uses a doubly-fed induction generator to explore the decoupled control of active and reactive power in a horizontal-axis wind turbine. First, a mathematical model encompassing all the components of a wind turbine system is developed. Next, our focus turns to the implementation and examination of FUZZY LOGIC control and its comparison with the sliding mode method. This comparative analysis aims to enhance our understanding of the strengths and weaknesses inherent to each controller, thereby potentially providing suggestions to improve the regulation of wind turbines based on DFIG technology.

## **Keywords**

Wind energy, doubly-fed induction generator, mathematical model, fuzzy logic, sliding mode.

## المخلص

يتفق المجتمع العلمي على نطاق واسع أن التغير المناخي الناتج عن الأنشطة البشرية يشكل تهديدًا خطيرًا لتوازن النظم البيئية الطبيعية واستقرار المجتمعات البشرية على الصعيد العالمي. في الوقت الحالي، أصبحت طاقة الرياح جزءًا أساسيًا من مزيج الطاقة في العديد من البلدان. الخصائص غير المؤكدة والعشوائية لطاقة الرياح تشكل عقبات أمام الحفاظ على إنتاج طاقة مستقر. تستخدم هذه الدراسة مولدًا تحريضيًا مزدوج التغذية لاستكشاف التحكم المفصول في القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة في توربين رياح ذو محور أفقي. في البداية، يتم بناء نموذج رياضي يشمل جميع مكونات نظام التوربين الرياحي. بعد ذلك، يتركز اهتمامنا على تنفيذ وفحص التحكم بالمنطق الضبابي ومقارنته بطريقة الوضع الانزلاقي. تهدف هذه الدراسة المقارنة إلى تعزيز فهمنا لنقاط القوة والضعف الكامنة في كل متحكم، مما يوفر اقتراحات محتملة لتحسين تنظيم التوربينات الهوائية القائمة على تكنولوجيا المولد التحريضي مزدوج التغذية.

## الكلمات المفتاحية

طاقة الرياح، التوربين، المولد التحريضي مزدوج التغذية، النموذج الرياضي، المنطق الضبابي، طريقة الوضع الانزلاقي.

## **Résumé**

La communauté scientifique s'accorde largement à reconnaître que le changement climatique provoqué par les activités humaines constitue une menace sérieuse pour l'équilibre des écosystèmes naturels et la stabilité des sociétés humaines à l'échelle mondiale. À l'heure actuelle, l'énergie éolienne est devenue un élément essentiel du bouquet énergétique de nombreux pays. Les caractéristiques incertaines et aléatoires de l'énergie éolienne constituent des obstacles au maintien d'une production d'énergie régulière. La présente étude utilise une génératrice asynchrone à double alimentation pour explorer la commande découplée de la puissance active et réactive dans une turbine éolienne à axe horizontal. Dans un premier temps, il s'agit de construire un modèle mathématique englobant tous les éléments constitutifs d'un système d'éolienne. Ensuite, notre attention se porte sur l'exécution et l'examen du contrôle LOGIQUE FLOUE. Et sa comparaison avec la méthode du mode glissant. La présente analyse comparative vise à améliorer notre compréhension des forces et des faiblesses inhérentes à chaque contrôleur, fournissant ainsi potentiellement des suggestions pour améliorer la régulation des turbines éoliennes basées sur la MADA.

## **Mots Clés**

Energie éolienne, génératrice asynchrone à double alimentation, modèle mathématique, logique floue, mode glissant.

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>3</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>5</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>6</b>
<b>1 Production électrique par éolienne</b>	<b>8</b>
1.1 Introduction . . . . .	8
1.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie . . . . .	8
1.3 Projet national de 1 000 MW éoliens . . . . .	9
1.4 Problématique . . . . .	9
1.5 Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA) . . . . .	10
1.5.1 Mode de fonctionnement . . . . .	10
1.6 Conclusion . . . . .	10
<b>2 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne</b>	<b>12</b>
2.1 Introduction . . . . .	12
2.2 Modélisation de la GADA . . . . .	12
2.3 Conclusion . . . . .	16
<b>3 Application de la logique floue</b>	<b>17</b>
3.1 Introduction . . . . .	17
3.2 Principe de base de la logique floue . . . . .	17
3.3 Fonction d'appartenance . . . . .	18
3.4 Structure d'un régulateur flou . . . . .	19
3.5 Simulation . . . . .	21
3.6 Conclusion . . . . .	22

<b>4</b>	<b>Discussion des résultats de simulation</b>	<b>23</b>
4.1	Introduction . . . . .	23
4.2	Résultats de la simulation . . . . .	23
4.3	Analyse comparative des résultats de régulateurs flou et à mode glissant pour le contrôle de la GADA . . . . .	25
4.4	Conclusion . . . . .	27
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>28</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>30</b>

# Table des figures

1.1	Parc des énergies renouvelable en Algérie . . . . .	9
1.2	Visualisation annuelle de la moyenne des vitesses de vent relevées à 10 mètres (m/s) . . . . .	9
3.1	Formes des fonctions d'appartenance dans les systèmes flous . . . . .	18
3.2	Architecture interne d'un contrôleur flou . . . . .	19
3.3	Fonctions d'appartenance . . . . .	20
3.4	Simulation sous MATLAB/Simulink . . . . .	21
4.1	Comportement simulé de la GADA sous commande floue - tension/courants statorique - courants rotorique . . . . .	24
4.2	Comportement simulé de la GADA sous commande floue - P,Q . . . . .	24

# Liste des tableaux

3.1	Structure des règles d'inférence . . . . .	20
4.1	Comparaison des performances entre les deux modes pour la puissance active .	25
4.2	Comparaison des performances entre les deux commandes pour la puissance réactive . . . . .	25

# Liste des abréviations

<b>GIEC</b>	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
<b>GADA</b>	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance-statorique par-phase
<b>R<sub>r</sub></b>	Résistance-rotorique par-phase
<b>L<sub>s</sub></b>	Inductance-cyclique statorique
<b>L<sub>r</sub></b>	Inductance-cyclique rotorique
<b>L<sub>m</sub></b>	Inductance-cyclique mutuelle (entre stator et rotor)
<b>p</b>	Nombre de paires-de-pôles
<b>C<sub>em</sub></b>	Couple électromagnétique
<b>V<sub>sd</sub>, V<sub>sq</sub></b>	Tensions statoriques-diphasées dans le repère dq
<b>V<sub>rd</sub>, V<sub>rq</sub></b>	Tensions rotoriques-diphasées dans le repère dq
<b>I<sub>ds</sub>, I<sub>qs</sub></b>	Courants statoriques-diphasés dans le repère tournant dq
<b>I<sub>dr</sub>, I<sub>qr</sub></b>	Courants rotoriques-diphasés dans le repère tournant dq
<b>P<sub>s</sub></b>	Puissance-active du stator
<b>Q<sub>s</sub></b>	Puissance-réactive du stator
<b>P<sub>r</sub></b>	Puissance-active du rotor
<b>Q<sub>r</sub></b>	Puissance-réactive du rotor
<b>φ<sub>ds</sub>, φ<sub>qs</sub></b>	Flux statoriques-diphasés dans le repère tournant dq
<b>φ<sub>dr</sub>, φ<sub>qr</sub></b>	Flux rotoriques-diphasés dans le repère tournant dq
<b>ω<sub>s</sub></b>	Pulsation-électrique des grandeurs statoriques
<b>ω<sub>r</sub></b>	Pulsation-électrique des grandeurs rotoriques
<b>g</b>	Glissement de la vitesse-de-rotation
<b>σ</b>	Coefficient de diffusion-magnétique
<b>ψ<sub>s</sub></b>	Flux-statorique total

# Introduction Générale

L'énergie, plus particulièrement l'électricité, joue un rôle fondamental dans le développement de nos sociétés. Elle façonne et améliore notre quotidien. Néanmoins, confrontée à une demande de plus en plus importante et à l'épuisement inévitables des ressources fossiles, l'humanité fait face à des défis sans précédent. L'émission massive des gaz à effet de serre, accélère le perturbations climatique et menace la stabilité écologique mondiale.

La communauté internationale a mis en place des accords et politiques (tels que le Protocole de Kyoto ou l'Accord de Paris) dans le but de limiter les émissions et à encourager des solutions durables. Dans ce contexte, les énergies renouvelables sont devenues une nécessité impérieuse. Ces dernières, telles que l'éolien ou le solaire, sont inépuisables, non polluantes et adaptées à un avenir énergétique durable [1].

L'énergie éolienne a connu une croissance conséquente ces dernières décennies. Transformant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, elle a prédominé comme une alternative viable aux sources d'énergies conventionnelles. Afin d'optimiser les performances des systèmes à conversion éolienne, de nombreuses recherches ont été menées, notamment ceux intégrant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Ce type de machine est apprécié pour sa robustesse, son fiable coût de fabrication et sa simplicité.

Les avancées en électronique de puissance et en microélectronique ont permis une intégration plus poussée des algorithmes de commande dans les systèmes. Améliorant de façon significative les performances des génératrices. Toutefois, malgré ses avancements, certaines méthodes présentent des limites, cela a conduit à la nécessité de développer des stratégies de commande plus robustes, capables de s'ajuster à des conditions de fonctionnement changeantes.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, qui s'intéresse au développement de commandes robustes. L'objectif fondamental est d'améliorer les performances et la stabilité de la machine, notamment grâce à l'apport de la logique floue.

Le document s'articule autour de plusieurs chapitres complémentaires. Le premier chapitre introduit les concepts de base relatifs au système éolien. Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse du modèle mathématique de l'éolienne, en présentant les équations physiques qui régissent son fonctionnement. Ce chapitre inclut également une introduction à la logique floue, mettant en lumière son application dans la modélisation de systèmes complexes et non linéaires.

Le troisième chapitre est consacré au développement du système de commande basé sur la logique floue. Il traite de l'élaboration des règles floues spécifiques pour le contrôle de l'éolienne.

Enfin, le dernier chapitre présente les résultats de simulations réalisées sous Matlab/Simulink. Ces résultats permettent de valider les performances du système, tant en termes de stabilité que de robustesse, de rentabilité, de fiabilité et de rapidité de réponse.

Ce travail vise à fournir une analyse détaillée de la conception et de l'optimisation d'un parc éolien, en mettant en avant les techniques avancées mises à disposition par les logiciels de simulation. Cette étude contribuera à évaluer la faisabilité et la performance des installations éoliennes, tout en participant à la réflexion sur le développement des énergies renouvelables et leur rôle essentiel dans la diversification du mix énergétique national.

# Chapitre 1

## Production électrique par éolienne

### 1.1 Introduction

Dans le but d'optimiser les performances des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, des techniques de commande avancées ont été mises en œuvre sur les génératrices. Nous exposerons dans ce chapitre un descriptif du principe de fonctionnement du système éolien.

### 1.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie

Le secteur d'énergie éolienne a connu un développement important, cela s'inscrit dans une démarche visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre. L'Algérie reste à la traîne en matière de réalisations dans ce domaine. La rentabilité de ces systèmes dépend de la ressource éolienne qui varie considérablement d'une région à une autre en raison de la diversité de la topographie et du climat en Algérie.

Le nord méditerranéen, avec ses montagnes et littoral, présente des vitesses de vent généralement faibles, tandis que le sud, caractérisé par un climat Saharien, affiche des vitesses plus élevées, notamment dans le sud-ouest et la région d'Adrar. Des microclimats favorables existent également sur certaines zones côtières et dans les hauts plateaux [2].

Face à ce potentiel, l'Algérie manifeste un intérêt de plus en plus marqué pour le développement de l'énergie éolienne sur son territoire.



solaire, et stabilisation du réseau.

## 1.5 Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA)

La machine asynchrone à double alimentation (GADA) fournit un accès simultané au stator et au rotor. Ayant un fonctionnement similaire aux machines synchrones, la différence réside dans l'écart entre la vitesse statorique et rotorique. L'expression « machine synchrone à double alimentation » provient du fait que les deux armatures, alimentées en courant alternatif, fournissent la magnétisation nécessaire au fonctionnement de la machine.

Le stator est alimenté par le réseau, tandis que le rotor l'est via un convertisseur de fréquence ou un onduleur, permettant ainsi un fonctionnement à vitesse variable, avec une injection partielle de puissance. On distingue alors :

- **$P_s$**  : puissance injectée au réseau
- **$P_r$**  : puissance statorique
- **$P_{mec}$**  : puissance mécanique

### 1.5.1 Mode de fonctionnement

- **Mode moteur hypo-synchrone :  $g > 0$** 
  - La puissance alimentant le stator vient réseau.
  - La puissance du glissement est renvoyée au réseau. Avec ce mode, la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse synchrone.
  - Il est possible à la machine asynchrone de fonctionner de cette manière, mais la puissance de glissement est alors dissipée sous forme de pertes Joule au sein du rotor.
- **Mode moteur hyper-synchrone :  $g < 0$** 
  - Les puissances alimentant le stator et le rotor viennent réseau.
  - La vitesse de la machine est plus grande que la vitesse synchrone.
  - Cependant, la machine asynchrone ne peut pas fonctionner de cette manière.

## 1.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de situer le contexte énergétique de l'Algérie, notamment sur le potentiel éolien faiblement exploité, malgré les conditions météorologiques favorable au sud du pays. Nous avons aussi pris connaissance du projet national de 1000 MW pour faire face aux enjeux de la transition énergétique. Dans cette dynamique, étant capable de fonctionner à vitesse

variable, la machine asynchrone à double alimentation est une solution technologique adaptée à l'exploitation de l'énergie éolienne. Cette étude ouvre la voie à l'analyse et à l'optimisation des commandes de cette génératrice, objet des chapitres suivants.

# Chapitre 2

## Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation mathématique d'une éolienne, qui est essentielle pour comprendre son fonctionnement et optimiser ses performances. Un modèle mathématique simplifié peut être établi en tenant compte des relations entre la puissance générée par l'éolienne, la vitesse du vent et les caractéristiques spécifiques de la turbine.

Cette modélisation constitue également une base nécessaire à l'implémentation de stratégies de commande avancées, telles que la logique floue ou le contrôle à mode glissant, visant à maximiser l'extraction d'énergie malgré les variations dynamiques du vent.

### 2.2 Modélisation de la GADA

La machine asynchrone à double alimentation (GADA) est modélisée à l'aide de la représentation de Park dans le repère  $(d, q)$ . Les équations correspondantes sont formulées dans un référentiel tournant lié au champ magnétique de la machine.

#### Tensions statoriques

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad (2.1)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \quad (2.2)$$

## Tensions rotoriques

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (2.3)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \quad (2.4)$$

## Flux magnétiques statoriques

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (2.5)$$

$$\phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (2.6)$$

## Flux magnétiques rotoriques

$$\phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (2.7)$$

$$\phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (2.8)$$

## Puissances actives et réactives

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (2.9)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (2.10)$$

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \quad (2.11)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq}) \quad (2.12)$$

## Couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (2.13)$$

où  $p$  est le nombre de paires de pôles de la GADA.

## Hypothèse d'orientation du flux statorique

Dans le cas des machines asynchrones à double alimentation (GADA) de moyenne ou grande puissance, il est courant de négliger la résistance statorique  $R_s$  lors de l'élaboration du modèle, sous l'hypothèse que le flux statorique est orienté. Ce qui donne :

$$\phi_{sq} = 0 \quad (2.14)$$

$$\phi_{sd} = \psi_s \quad (2.15)$$

$$V_{sd} = 0 \quad (2.16)$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \psi_s \quad (2.17)$$

En posant :

$$V_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (2.18)$$

$$0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (2.19)$$

En se basant sur l'équation (2.19), il est possible d'exprimer les relations entre les courants statoriques et les courants rotoriques.

$$i_{ds} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \quad (2.20)$$

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (2.21)$$

En injectant les expressions des courants statoriques issues de l'équation (2.3) dans les équations (2.7) et (2.8) des flux rotoriques, on obtient :

$$\Phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \psi_s \quad (2.22)$$

$$\Phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \quad (2.23)$$

avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

(Coefficient de Cispersion de Blondel)

En substituant les expressions des flux rotoriques données par les équations (2.22) et (2.23) dans les équations (2.3) et (2.4), on obtient :

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \quad (2.24)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \quad (2.25)$$

En régime permanent (état stationnaire), les dérivées des courants rotoriques s'annulent, ce qui permet d'éliminer les termes qui en dépendent.

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \quad (2.26)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} - g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \quad (2.27)$$

## Puissances active et réactive

Les équations de puissance (2.9) et (2.10), une fois adaptées au repère utilisé ainsi qu'aux hypothèses simplificatrices propres à notre étude (notamment  $V_{sd} = 0$ ), s'expriment comme suit :

$$P_s = -\frac{3}{2} V_s i_{sq} \quad (2.28)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} V_s i_{sd} \quad (2.29)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans l'équation (2.21) et (2.22), nous obtenons :

$$P_s = \frac{3}{2} \left( \frac{V_s L_m}{L_s} \right) i_{rq} \quad (2.30)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left( \frac{V_s \psi_s}{L_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} i_{rq} \right) \quad (2.31)$$

En tirant  $\psi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  de l'équation (2.16) et (2.17), la puissance réactive s'écrit :

$$Q_s = -\frac{3}{2} \frac{V_s L_m}{L_s} i_{rq} + \frac{3 V_s^2}{2 L_s \omega_s} \quad (2.32)$$

## Couple électromagnétique

En remplaçant l'équation (2.16) et (2.17) dans (2.13), le couple électromagnétique de la GADA devient :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m \psi_s}{L_s} i_{rq} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} i_{rq} \quad (2.33)$$

## **2.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons établi le modèle mathématique de la GADA en nous basant sur ses équations caractéristiques, afin de décrire son fonctionnement électrique de manière précise et exploitable pour la commande.

# Chapitre 3

## Application de la logique floue

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la logique floue comme méthode de commande adaptée aux systèmes éoliens soumis à des variations rapides et incertaines. Grâce à son raisonnement basé sur des règles linguistiques et des degrés d'appartenance, cette approche offre une alternative souple et efficace aux commandes classiques, notamment pour le pilotage d'une génératrice asynchrone à double alimentation.

### 3.2 Principe de base de la logique floue

En 1965, Lotfi Zadeh a introduit la logique floue, fondée sur un modèle mathématique basé sur les ensembles flous, qui étend la théorie classique des ensembles. Cette approche permet à une condition d'appartenir à un état intermédiaire entre le vrai et le faux, grâce à l'introduction du concept de degré d'appartenance. Dans cette situation, Blurred Logic offre beaucoup plus de flexibilité au raisonnement qu'il utilise, ce qui permet de prendre en compte des données imprécises ou incomplètes. Contrairement à la logique booléenne, où une variable ne peut être que vraie (1) ou fausse (0). La logique floue proche du raisonnement humain, introduit la notion de degré d'appartenance, permettant ainsi à une condition d'être partiellement vraie ou partiellement fausse. Les valeurs de vérité sont plutôt précises, comme le montrent les exemples suivants [5].

### 3.3 Fonction d'appartenance

Dans un système basé sur la logique floue, les fonctions d'appartenance servent à exprimer dans quelle mesure une valeur réelle appartient à une catégorie floue. Autrement dit, elles permettent de convertir des grandeurs numériques en niveaux d'appartenance compris entre 0 et 1. Le choix de la forme de ces fonctions, comme montré dans la Figure 3.1 (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïde, en cloche, ...) a un impact direct sur la précision et la réactivité du système de commande floue, notamment dans les applications de régulation comme celle d'une éolienne.

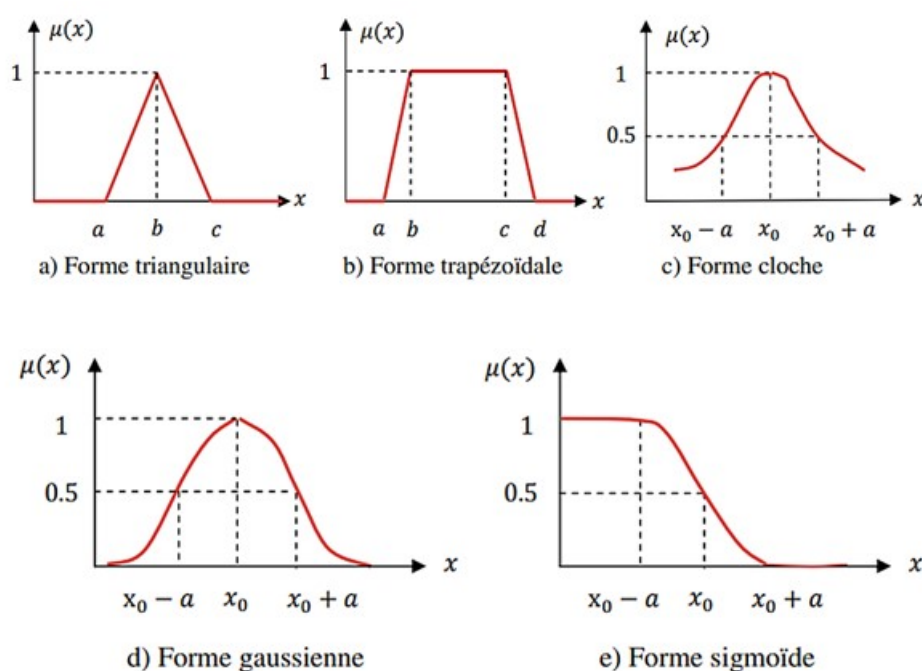


FIGURE 3.1 – Formes des fonctions d'appartenance dans les systèmes flous

- **Fonction triangulaire** : Simple et rapide à calculer, idéale pour des approximations linéaires.
- **Fonction trapézoïdale** : Variante de la triangulaire, elle permet une meilleure prise en compte des plages d'incertitude.
- **Fonction gaussienne** : Fournit une transition douce et continue, adaptée aux phénomènes naturels à variation progressive.
- **Fonction sigmoïde** : Modélise des transitions asymétriques, utile quand les changements ne sont pas centrés.
- **Fonction en cloche** : Proche de la gaussienne, avec une forme symétrique autour d'un maximum [6].

### 3.4 Structure d'un régulateur flou

Un contrôleur à logique floue est constitué de plusieurs modules coopérant pour prendre des décisions en se basant sur des règles linguistiques [7]. La Figure 3.1 illustre cette structure.

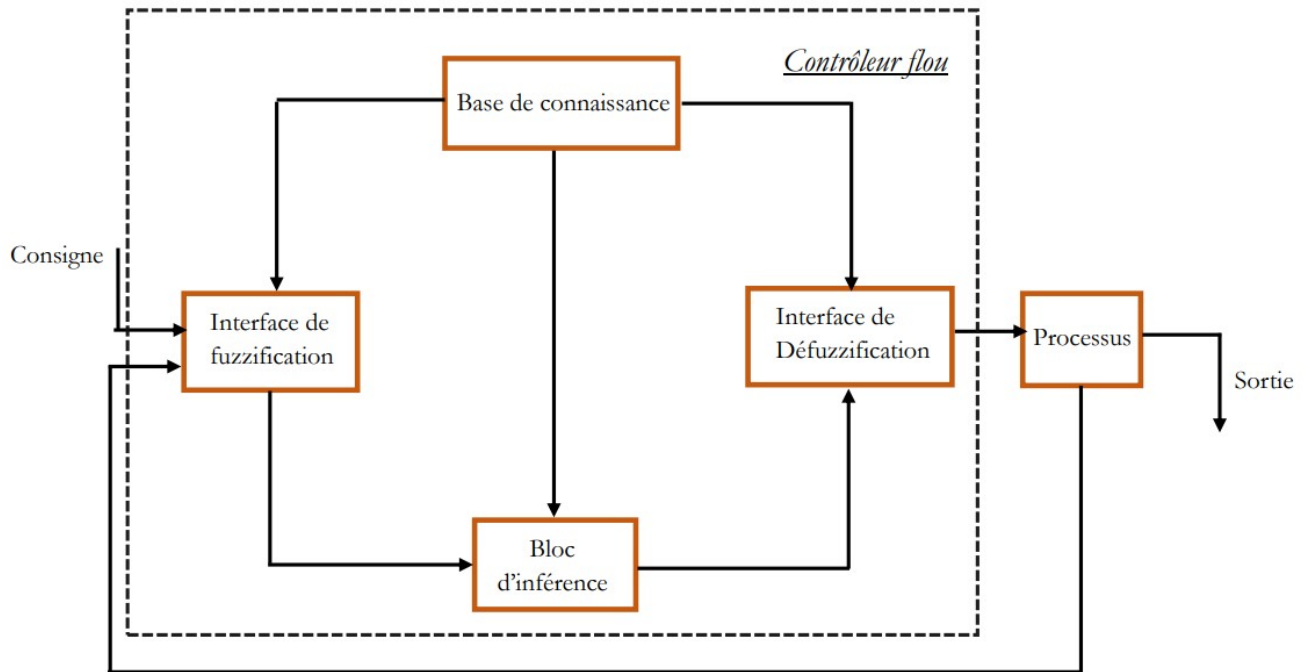


FIGURE 3.2 – Architecture interne d'un contrôleur flou

- **Fuzzification** : L'interface de fuzzification assure la conversion des variables d'entrée, exprimées en valeurs numériques, en variables linguistiques floues. Cette transformation repose sur des fonctions d'appartenance définissant le degré auquel chaque valeur appartient à un ensemble flou.

Nous avons choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme indiqué sur la figure :

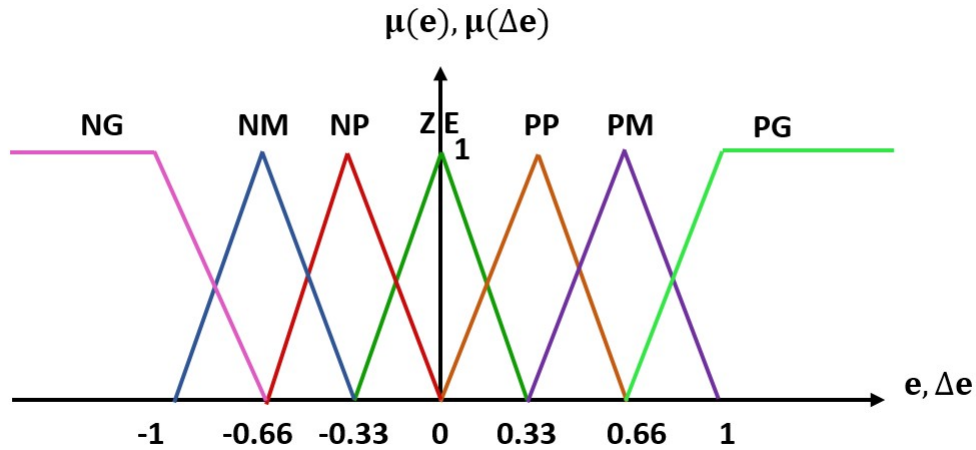


FIGURE 3.3 – Fonctions d'appartenance [8]

- **Base de règles :** Les règles floues servent à établir le lien logique entre les variables d'entrée et les réponses produites par le système de commande.

TABLE 3.1 – Structure des règles d'inférence

		$e$						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
$\Delta u$	NG	NG	NG	NG	NM	NP	NP	ZE
	NM	NG	NM	NM	NM	NP	ZE	PP
	NP	NG	NM	NP	NP	ZE	PP	PM
	ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	ZE	PP	PP	PM	PG
	PM	NP	ZE	PP	PM	PM	PM	PG
	PG	ZE	PP	PP	PM	PG	PG	PG

- **Bloc d'inférence :** Le bloc d'inférence a pour rôle d'appliquer les règles floues aux entrées fuzzifiées. Il analyse chaque règle de la base de connaissances et détermine celles qui sont activées, ainsi que leur degré d'activation. Il combine ensuite les résultats des règles activées afin de produire une sortie floue, qui reflète la réponse du système selon les conditions données. Cette sortie sera ensuite traitée par l'étape de défuzzification.
- **Défuzzification :** Il s'agit de l'étape finale du processus de commande floue. Elle consiste à transformer les résultats flous obtenus en une valeur précise, permettant ainsi de définir

l'action de commande à appliquer selon la loi de régulation. Elle traduit les données floues produites par le mécanisme d'inférence en valeurs concrètes, exprimées sous forme physique ou numérique.

- **Processus (ou système à contrôler) :** Le processus représente le système physique ou dynamique sur lequel agit le contrôleur flou. Il reçoit la commande issue de la défuzzification et génère une réponse mesurable.

### 3.5 Simulation

La figure ci-dessous présente le schéma global de la simulation de l'éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), commandée par un régulateur basé sur la logique floue. Ce modèle a été développé sous l'environnement MATLAB/Simulink.

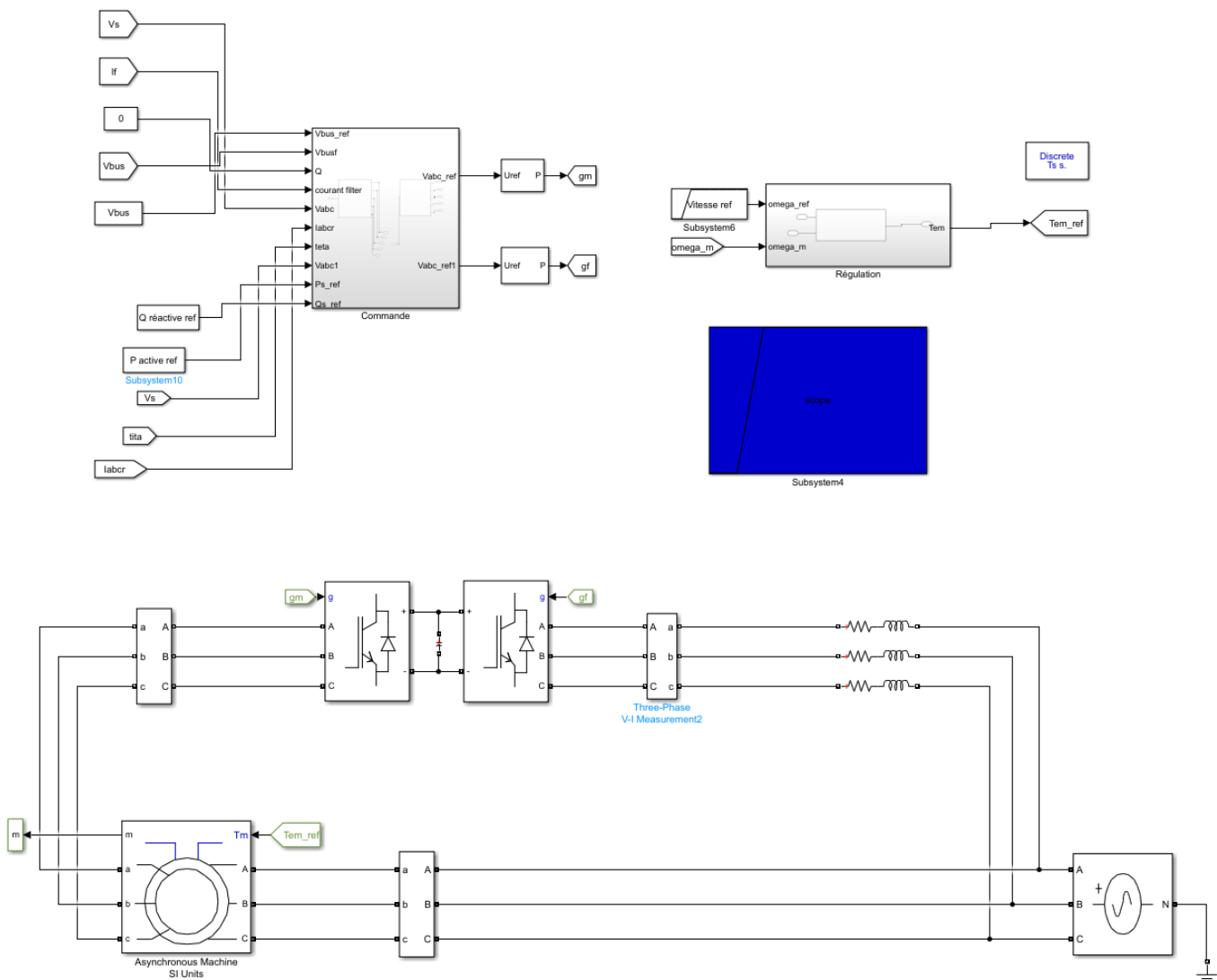


FIGURE 3.4 – Simulation sous MATLAB/Simulink

## **3.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les principes de la logique floue et montré comment elle permet de contrôler des systèmes complexes. Les bases de cette approche ont été présentées, ainsi que son intérêt dans le domaine du contrôle. Nous avons également introduit le contrôleur flou comme solution pour ajuster la production, en vue de son application au pilotage d'une machine à double alimentation.

# Chapitre 4

## Discussion des résultats de simulation

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation du régulateur flou, réalisés sous MATLAB/Simulink. Les simulations réalisées concernent la régulation des puissances active et réactive au niveau du stator de la GADA. Elles visent à évaluer les performances du régulateur à base de logique floue en termes de précision, de stabilité et de temps de réponse. Une étude comparative sera également effectuée afin de mettre en lumière les points forts et les éventuelles limites de cette méthode de commande.

### 4.2 Résultats de la simulation

Nous allons procéder à une analyse visuelle détaillée des comportements des puissances actives et réactives statoriques par rapport aux références. Cette analyse permettra d'apprécier les performances du régulateur, de mettre en évidence ses avantages et ses inconvénients.

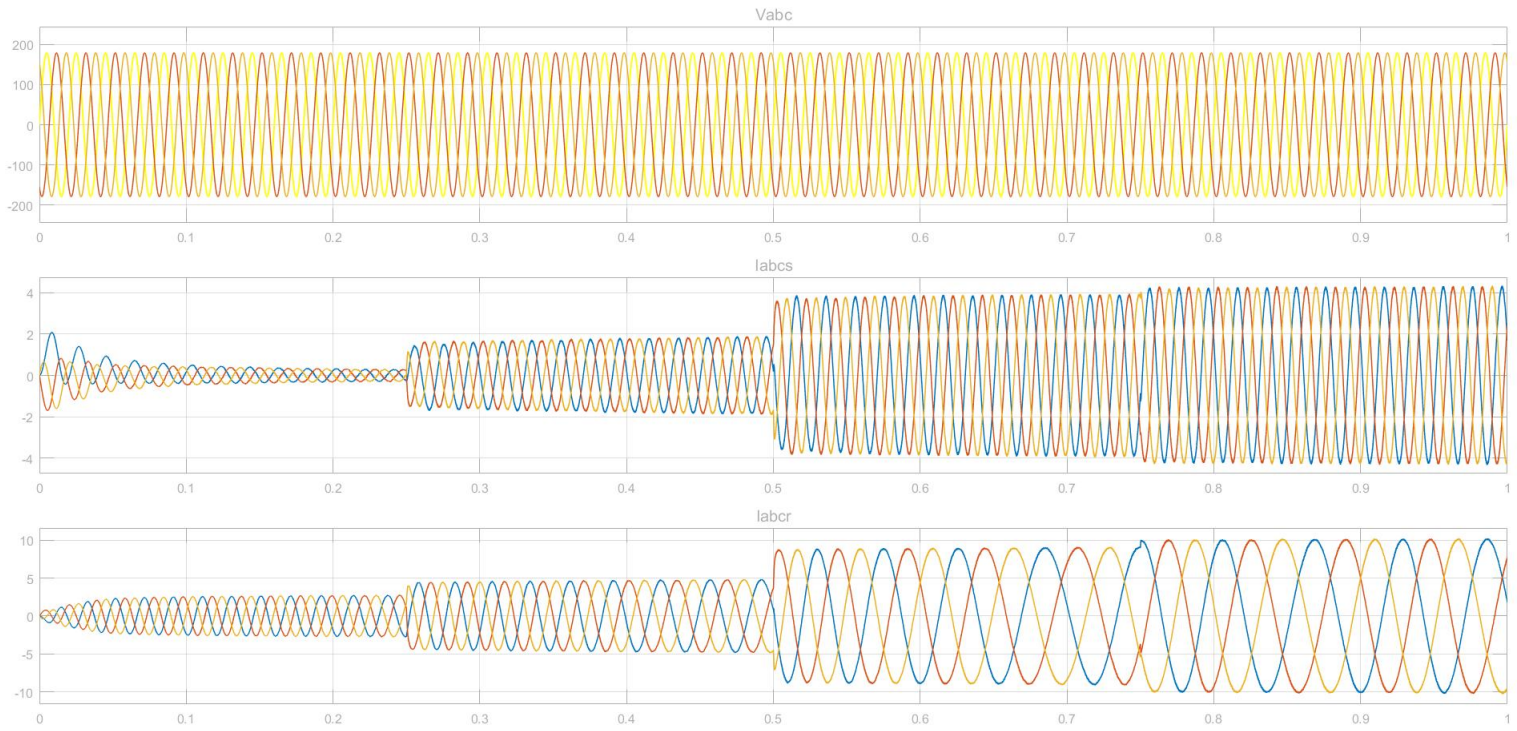


FIGURE 4.1 – Comportement simulé de la GADA sous commande floue - tension/courants statorique - courants rotorique

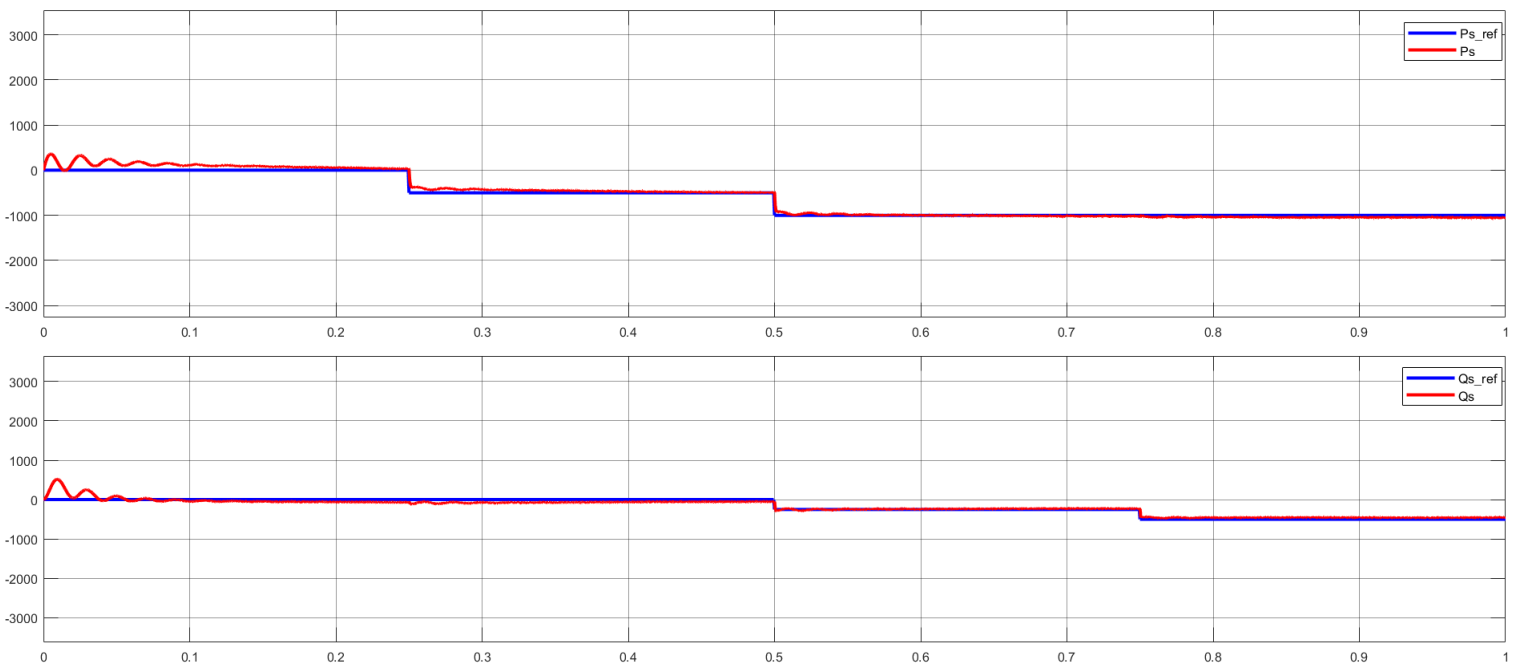


FIGURE 4.2 – Comportement simulé de la GADA sous commande floue - P,Q

La Figure 4.2 illustre les réponses obtenues après l'application d'une commande basée sur la logique floue. On observe que les puissances active et réactive s'alignent efficacement sur les valeurs de consigne fixées.

Cette réponse met en évidence une amélioration significative du comportement du système, notamment en termes de dépassement, de temps de réponse et d'erreur à l'état stationnaire. Prouvant que l'intégration d'une commande intelligente contribue de manière importante à l'optimisation des performances globales du système.

### 4.3 Analyse comparative des résultats de régulateurs flou et à mode glissant pour le contrôle de la GADA

Le tableau offre une comparaison des performances des deux types de commandes avancées (flou et à mode glissant) dans le cadre de la commande séparée de la GADA, en se basant sur les critères de précision et de rapidité. Les données relatives au régulateur à mode glissant ont été extraites d'une étude qui propose une analyse comparative approfondie des performances de différentes stratégies de commande appliquées aux systèmes éoliens [9].

TABLE 4.1 – Comparaison des performances entre les deux modes pour la puissance active

Performances	Critères de performances pour le contrôle de la puissance active (P)	
	Commande par logique floue (indirect)	Commande par mode glissant
D (%)	0.005	0
Erreur moyenne statique (%)	0.02	0.17
Temps de réponse (s)	0.004	0.006125

TABLE 4.2 – Comparaison des performances entre les deux commandes pour la puissance réactive

Performances	Critères de performances pour le contrôle de la puissance réactive (Q)	
	Commande par logique floue (indirect)	Commande par mode glissant
D (%)	0.001	0
Erreur moyenne statique (%)	0.03	0.912
Temps de réponse (s)	0.0021	0.0054

Les résultats présentés dans les tableaux 4.1 et 4.2 permettent de comparer de manière détaillée les performances des deux régulateurs analysés : la commande floue indirecte et la commande par mode glissant.

Pour la puissance active (P), la commande par logique floue présente un **dépassement (D)** de seulement **0,005 %**, une **erreur moyenne statique** de **0,02 %** et un **temps de réponse très court** de **0,004 secondes**. À titre de comparaison, la commande par mode glissant n'affiche **aucun dépassement**, mais souffre d'une **erreur statique significativement plus élevée (0,17 %)** et d'un **temps de réponse légèrement plus long (0,006125 secondes)**. Il est important de noter que le dépassement obtenu avec la commande floue est **quasi nul**, mais n'a pas été arrondi à zéro afin de préserver l'objectivité et la crédibilité des résultats. Ces performances confirment que, **malgré un dépassement minime**, la logique floue assure une **meilleure précision statique** et une **réactivité supérieure**, ce qui est essentiel dans les systèmes dynamiques.

En ce qui concerne la puissance réactive (Q), la commande floue confirme sa supériorité en termes de **rapidité et de stabilité**. Elle affiche un **dépassement** de **0,001 %**, une **erreur statique moyenne** de **0,03 %** et un **temps de réponse réduit** à **0,0021 secondes**. La commande par mode glissant, bien qu'exempte de dépassement, présente une **erreur statique plus élevée** et une **réactivité légèrement inférieure**. Ces résultats confirment l'intérêt de la commande floue pour des applications exigeant un comportement dynamique rapide et précis.

En résumé, la commande floue a démontré une capacité remarquable à réduire l'erreur statique et à raccourcir le temps de réponse. Toutefois, sa mise en œuvre exige une certaine maîtrise de la logique floue, notamment dans la définition des fonctions d'appartenance et la formulation des règles.

À l'inverse, bien que le mode glissant assure une distorsion nulle, il s'accompagne de performances statiques moins favorables, ce qui peut poser problème dans des applications exigeant une précision élevée et une grande stabilité.

L'analyse harmonique a révélé un taux de distorsion harmonique total (THD) de 1,337 %. Ce résultat confirme la capacité du système commandé par logique floue à injecter une puissance de qualité sans perturber le réseau.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une simulation sur l'environnement MATLAB/SIMULINK, en évaluant et comparant deux méthodes de contrôle pour la gestion des puissances active et réactive produites par la machine asynchrone à double alimentation. Il ressort que la commande par logique floue a démontré un succès significatif en améliorant les performances du système. Nous pouvons affirmer que le réglage par logique floue surpasse la commande basée sur un régulateur mode glissant. Cette approche offre une robustesse supérieure par rapport à la commande vectorielle utilisant un mode glissant, garantissant ainsi une meilleure insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

# Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des énergies renouvelables, et plus précisément de l'énergie éolienne, qui constitue aujourd'hui une alternative crédible aux sources d'énergie conventionnelles. L'objectif principal de ce mémoire a été de concevoir, modéliser et simuler un système de conversion éolienne basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), en intégrant une commande avancée par logique floue.

La première partie de ce mémoire a permis d'explorer le contexte énergétique national et de souligner l'intérêt croissant pour le développement de l'énergie éolienne en Algérie. Ce regain d'intérêt se traduit notamment par l'inscription d'un projet de 1000MW éoliens dans les perspectives nationales de diversification du mix énergétique. La GADA a été retenue comme machine de conversion pour ses avantages techniques, tels que le fonctionnement à vitesse variable et la capacité de réguler indépendamment les puissances active et réactive.

Après avoir établi le modèle mathématique de la machine, une stratégie de commande basée sur la logique floue a été développée. Ce type de régulation, qui s'inspire du raisonnement humain, s'avère particulièrement adapté aux systèmes non linéaires et soumis à des variations continues, comme c'est le cas pour les systèmes éoliens. Les simulations réalisées sous *MATLAB/Simulink* ont mis en évidence l'efficacité de cette approche, notamment en matière de stabilité et de précision.

Une comparaison avec la commande à mode glissant a permis de confirmer la supériorité de la commande floue dans ce contexte précis. En effet, le régulateur flou a permis de réduire significativement l'erreur statique, tout en respectant les contraintes de qualité du signal injecté au réseau. Le taux de distorsion harmonique du courant (THD) obtenu, égal à 1,337 %, reste en dessous des seuils recommandés pour le raccordement au réseau. Il convient de noter que les résultats relatifs à la commande à mode glissant ont été extraits d'une étude antérieure, utilisée ici comme référence comparative, afin d'évaluer objectivement les performances de la commande floue.

En conclusion, cette étude a démontré l'intérêt d'associer des techniques de commande intelligentes à des systèmes de conversion éolienne, dans l'objectif d'optimiser leur performance et leur intégration au réseau électrique. Des perspectives peuvent être envisagées, notamment l'étude expérimentale du système, l'évaluation de sa robustesse face aux perturbations, ainsi que l'exploration de méthodes de commande hybrides intégrant l'intelligence artificielle, capables d'apprendre en temps réel et de s'adapter dynamiquement aux variations du vent ou aux contraintes réseau. Cette approche constitue une voie prometteuse pour accroître l'efficacité et la résilience des systèmes éoliens de nouvelle génération.

# Bibliographie

- [1] A. Petersson, T. Thiringer, L. Harnefors, and T. Petru. Modeling and experimental verification of grid-connected wind turbine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(4), December.
- [2] A. Djalal. Chapitre i : Généralités sur les systèmes éoliens, 2020. Consulté le 7 mai 2025.
- [3] SONELGAZ. Site officiel de sonelgaz. [En ligne] Consulté le 17/06/2025.
- [4] Moctar Ficou. Algérie : Lancement d'un projet ambitieux d'énergie éolienne de 1 000 mégawatts pour accélérer la transition énergétique d'ici à 2035, December 2024. Consulté le 7 mai 2025.
- [5] Meriem Benbrahim. Chapitre 3 : Commande floue d'une éolienne à génératrice asynchrone à double alimentation (gada). [https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benbrahim\\_meriem/files/chapitre\\_3\\_221f.pdf](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benbrahim_meriem/files/chapitre_3_221f.pdf), juin 2022. Université de Batna 2, Département de Génie Électrique.
- [6] B. Bouchon-Meunier. La logique floue et ses applications. Addison-Wesley, France.
- [7] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-15.
- [8] SOLTANA Aya et TOUMI Nouara. Évaluation et analyse comparative des techniques de commandes destinées aux éoliennes à vitesse variable dotées de générateur asynchrone à double alimentation.
- [9] Badri Rekik & all. Performance comparison of pi, fuzzy logic, and sliding mode controls for wind turbine power management. Journal of Engineering and Applied Sciences (JESA).