

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

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



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي
المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'études

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par : DIB YASMINE

Thème

**Commande par la logique floue d'un système
de pompage photovoltaïque
au fil du soleil**

Soutenu publiquement, le 30/06/2024, devant le jury composé de :

M Mohamed M'HAMMEDI
M Abdelfettah KERBOUA
M Fouad BOUKLI HACENE
M Ahmed TAHOUR
M Lotfi MERAD

MAA
MCA
Professeur
Professeur
Professeur

ESSA. Tlemcen
ESSA. Tlemcen
ENP. Oran
ESSA. Tlemcen
ESSA. Tlemcen

Président
Encadrant
Co-Encadrant
Examineur 1
Examineur 2

Année Universitaire : 2023 / 2024 .

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
MASTER EN ÉLECTROTECHNIQUE**

DIB YASMINE

Dimanche 23 Juin 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACES

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À CEUX QUI ME SONT LES PLUS CHERS

À MES PARENTS, QUI M'ONT TOUJOURS SOUTENU ET ENCOURAGÉ, ET QUI
M'ONT INCULQUÉ LES VALEURS QUI ME GUIDENT AUJOURD'HUI

À MON FRÈRE

À TOUTE MA FAMILLE ET À MES AMIS, POUR LEUR SOUTIEN INDÉFECTIBLE
ET LEURS ENCOURAGEMENTS TOUT AU LONG DE MON PARCOURS

À TOUS MES AMIS DE LA PROMOTION, POUR LES MOMENTS DE PARTAGE ET
DE COMPLICITÉ QUE NOUS AVONS VÉCUS ENSEMBLE

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS, ET QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU
DE LOIN À MON SUCCÈS

VOTRE SOUTIEN ET VOS ENCOURAGEMENTS ONT ÉTÉ MA SOURCE DE
MOTIVATION TOUT AU LONG DE CE PARCOURS

JE VOUS REMERCIE DU FOND DU CŒUR

REMERCIEMENTS

TOUT D'ABORD, JE TIENS À EXPRIMER MA SINCÈRE RECONNAISSANCE À ALLAH, LE TOUT-PUISSANT ET MISÉRICORDIEUX. C'EST GRÂCE À DIEU QUE J'AI PU ACCOMPLIR CE MODESTE TRAVAIL.

JE TIENS À EXPRIMER MA PROFONDE GRATITUDE À MON ENCADRANT, **M. KERBOUA ABDELFTTAH**, POUR AVOIR ACCEPTÉ DE ME DIRIGER DANS MON TRAVAIL DE RECHERCHE ; SES EFFORTS INCESSANTS AINSI QUE SES PRÉCIEUX CONSEILS M'ONT PERMIS DE MENER À BIEN LA RÉUSSITE DE CE PROJET.

JE TIENS ÉGALEMENT À REMERCIER TOUT PARTICULIÈREMENT **M. BOUKLI HACENE FOUAD**, MON CO-ENCADRANT, POUR SES CONSEILS, SON AIDE CONSTANTE ET SA BONNE HUMEUR QUI ONT ÉTÉ SOURCE DE MOTIVATION LORS DE CES SIX MOIS DE TRAVAIL.

JE SOUHAITE DE MÊME REMERCIER , **M MHAMMEDI MOHAMED** POUR AVOIR ACCEPTÉ DE PRÉSIDER L'HONORABLE JURY. QUE **M. TAHOUR AHMED** ET **M. MERAD LOTFI** SOIENT AUSSI REMERCIÉS D'AVOIR ACCEPTÉ D'ÉVALUER MON TRAVAIL EN TANT QU'EXAMINATEURS.

JE TIENS ENFIN À EXPRIMER MA RECONNAISSANCE ENVERS **M. MEGNAFI HICHEM**, NOTRE CHEF DE DÉPARTEMENT, AINSI QU'ENVERS **M. ABDELLAOUI GHOUTI**, NOTRE ESTIMÉ PROFESSEUR, POUR LEUR PRÉCIEUX ACCOMPAGNEMENT ET LEUR INDÉFECTIBLE SOUTIEN.

Table des matières

Dédicaces	2
Remerciements	3
Table des matières	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
Liste des abréviations	9
Introduction générale	10
1 Contexte, enjeux et problématique	13
1.1 Introduction	13
1.2 Contexte et enjeux	13
1.3 Le pompage photovoltaïque au fil du soleil : une alternative durable	14
1.4 Problématique et objectifs de recherche	15
1.4.1 Problématique	15
1.4.2 Objectifs de recherche	15
1.5 Démarche méthodologique	15
1.6 Conclusion	17
2 Revue de la littérature	18
2.1 Introduction	18
2.2 Objectif de la Revue	18
2.3 Thèses de Doctorat	18
2.4 Articles de Revues	19
2.5 Conclusion	19
3 Commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil	21
3.1 Introduction	21
3.1.1 Principe de fonctionnement	21
3.1.2 Types de commande VFD	21
3.1.3 Avantages de la commande VFD	22
3.1.4 Modèle du Contrôleur PI	23
3.2 Commande scalaire en tension	23
3.2.1 Régulation de la vitesse	24

3.2.2	Génération des signaux de contrôle par MLI triangulo-sinusoïdale	26
3.3	Simulation du démarrage du système de pompage sous les conditions STC	28
3.4	Adaptation de la commande aux conditions variables	31
3.4.1	Influence de l'irradiation	31
3.4.2	Influence de la température	33
3.4.3	Suivi de référence	33
3.5	Conclusion	34
4	Commande floue: Une approche puissante pour les systèmes complexes	35
4.1	Introduction	35
4.2	Principe Fondamental de la Logique Floue	36
4.2.1	Ensembles Flous	37
4.2.2	Opérations élémentaires sur les ensembles	38
4.2.3	Variables linguistiques	38
4.2.4	Fonction d'appartenance	39
4.2.5	Opérateur floue	40
4.2.6	Raisonnement floue	40
4.3	Contrôleur floue	45
4.3.1	Stratégie de fuzzification	46
4.3.2	Base de données	46
Base de règles	46	
Justification des règles de contrôle flou	47	
4.3.3	Moteur d'inférence floue	50
Contrôleur de type Mamdani	51	
Contrôleur de type Larsen	51	
Contrôleur de type Zadeh	51	
Contrôleur de Sugeno	52	
4.4	Défuzzification	52
4.5	Conclusion	53
5	Résultats et discussions	54
5.1	Adaptation de la commande aux conditions variables	58
5.1.1	Influence de l'irradiation	58
5.1.2	Influence de la température	60
5.1.3	Tests de robustesse	61
5.2	Conclusion	65
	Conclusion générale	67
	Bibliographie	69
	Résumé	71

Liste des figures

3.1	Schéma de principe de la commande scalaire en tension de la MAS.	23
3.2	Schéma d'un régulateur PI	24
3.3	Schéma électrique d'une phase de la MAS.	25
3.4	Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.	26
3.5	Schéma de principe de la commande MLI triangulo-sinusoïdale.	27
3.6	Signaux de références, la porteuse et l'état S_1 du premier interrupteur. . .	27
3.7	Modèle simulink du système global avec commande scalaire.	28
3.8	Circuit de commande scalaire.	28
3.9	Profil évolutif de la vitesse du moteur en boucle fermée.	29
3.10	L'évolution du couple mécanique en boucle fermée.	30
3.11	Évolution du débit de la pompe en boucle fermée.	31
3.12	Variation de la vitesse du moteur en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m ²	32
3.13	Évolution du débit de la pompe en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m ²	32
3.14	Impact de la température sur la vitesse du moteur pour des valeurs de température de 25, 50 et 10 degrés Celsius.	33
3.15	Réponse du système à un échelon de vitesse de référence de 1000 à 1200 tr/min à t=1 s, illustrant la robustesse du correcteur.	34
4.1	Classification des vitesses en trois ensembles	37
4.2	Représentation graphique d'un ensemble classique (à gauche) et d'un ensemble flou (à droite)	38
4.3	Différentes formes des fonctions d'appartenance.	40
4.4	Exemple d'implication floue avec conjonction «ET» traduite par un « min »	42
4.5	Exemple d'application de l'ensemble des 3 règles de notre exemple.	43
4.6	Défuzzification par «moyenne des maxima»	44
4.7	Défuzzification par «centre de gravité»	44
4.8	Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.	45
4.9	Fonctions d'appartenance de l'erreur et la variation de l'erreur	48
4.10	Localisation des points critiques pour la déduction des règles	48
5.1	Circuit de commande floue.	54
5.2	Modèle conceptuel du correcteur fuzzy2.	55
5.3	Modèle conceptuel du correcteur fuzzy1.	55
5.4	L'évolution de la vitesse sous la commande par la logique floue	57
5.5	Superposition des réponses en vitesse avec les régulateurs PI, fuzzy 1, et fuzzy 2.	57

5.6	Superposition des réponses du débit avec les régulateurs PI, fuzzy1, et fuzzy2.	58
5.7	Réponse de la vitesse face aux variations brusques de l'intensité d'irradiation	59
5.8	Réponse du débit face aux variations brusques de l'intensité d'irradiation . . .	59
5.9	Réponse de la vitesse face aux variations brusques de la température . . .	60
5.10	Réponse du débit face aux variations brusques de la température	61
5.11	Réponse de la vitesse suite à une augmentation de l'inertie de 40% du système	61
5.12	Réponse de la vitesse suite à une augmentation du frottement de 40% du système	62
5.13	Réponse de la vitesse suite à une augmentation de la résistance rotorique R_r	62
5.14	Réponse de la vitesse suite à une augmentation de la résistance statorique R_s	63
5.15	Réponse de la vitesse suite à une diminution de l'inductance rotorique (L_r) .	63
5.16	Réponse de la vitesse suite à une diminution de l'inductance statorique (L_s)	64

Liste des tableaux

4.1	Matrice d'inférence pour le cas de deux entrées et une seule sortie	47
4.2	Récapitulation des décisions de 1 à 12	49
4.3	Matrice d'inférence de Mac-Vicar Whelan	50

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
VFD	Variable Frequency Drive
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Générateur Photovoltaïque
NG	Négatif grand
NM	Négatif moyen
EZ	Environ zéro
PM	Positif moyen
PG	Positif grand

Introduction générale

La commande par logique floue est une approche innovante qui permet de gérer les systèmes complexes en intégrant les imperfections et les incertitudes inhérentes aux données. Cette technique repose sur la théorie des ensembles flous, développée par Lotfi Zadeh en 1965, qui généralise la logique classique en permettant aux variables de prendre des valeurs entre 0 et 1. Contrairement à la logique binaire traditionnelle où les variables sont strictement vraies ou fausses, la logique floue introduit des degrés de vérité, ce qui permet de modéliser des phénomènes plus proches de la réalité.

L'approche par logique floue est particulièrement adaptée aux systèmes de commande nécessitant une grande flexibilité et une capacité à gérer les situations imprévisibles et les variations continues. Elle trouve ses applications dans divers domaines, allant du contrôle industriel à l'intelligence artificielle, en passant par les systèmes de gestion de l'énergie. Dans ce mémoire, nous allons explorer les principes fondamentaux de la commande par logique floue et son application spécifique dans le domaine du pompage photovoltaïque au fil du soleil.

Le pompage photovoltaïque est une technique de plus en plus utilisée pour alimenter des systèmes de pompage d'eau dans des régions reculées ou dépourvues d'infrastructures électriques. L'intégration de la logique floue dans ce contexte permet de mieux gérer les variations d'ensoleillement et les conditions environnementales fluctuantes, optimisant ainsi le rendement énergétique et la fiabilité du système. Nous allons détailler les différentes étapes de la commande floue, notamment :

- **La Fuzzification** : Cette étape consiste à convertir les valeurs d'entrée précises en valeurs floues. Les variables d'entrée, telles que l'intensité lumineuse ou la demande en eau, sont transformées en ensembles flous avec des degrés de pertinence.
- **La Base de Connaissances** : Elle contient les règles floues sous la forme de "si-alors" qui définissent la relation entre les variables d'entrée et les actions de commande. Ces règles sont élaborées à partir de l'expertise humaine et des connaissances spécifiques du système.
- **La Logique de Prise de Décision** : À partir des règles floues, cette étape détermine les actions de commande appropriées en combinant les informations fournies par les ensembles flous d'entrée.

- **La Défuzzification** : Elle transforme les sorties floues en valeurs précises, convertissant ainsi les actions de commande floues en signaux concrets pour le système de pompage.

Ces éléments s'articulent pour produire une commande efficace et adaptée aux besoins spécifiques du système de pompage photovoltaïque. En outre, la commande par logique floue présente plusieurs avantages notables :

- **Gestion des Incertitudes** : La logique floue est particulièrement efficace pour traiter les données imprécises ou incomplètes, offrant une solution robuste face aux incertitudes et aux variations rapides des conditions environnementales.
- **Flexibilité et Adaptabilité** : Les paramètres de commande peuvent être facilement ajustés en fonction des conditions spécifiques du système, permettant une adaptation rapide aux changements et une optimisation continue des performances.
- **Facilité de Mise en Œuvre** : Grâce à une approche basée sur des règles simples et intuitives, la commande floue peut être mise en œuvre sans nécessiter de modélisation mathématique complexe, rendant la technique accessible à un large éventail d'applications.

Dans ce mémoire, nous allons illustrer ces concepts par des études de cas et des simulations spécifiques au domaine du pompage photovoltaïque. Nous montrerons comment la logique floue peut être utilisée pour améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité et la durabilité des systèmes de pompage dans des conditions variées et souvent imprévisibles. Cette exploration nous permettra de mieux comprendre le potentiel de la logique floue et de proposer des solutions pratiques pour des défis concrets dans le domaine des énergies renouvelables.

Voici un aperçu des chapitres qui composent ce mémoire :

Chapitre 1: Introduction et problématique : Ce chapitre expose le défi majeur de répondre à la demande croissante en énergie tout en préservant l'environnement. Il met en lumière la dépendance actuelle aux ressources non renouvelables et ses conséquences néfastes sur l'environnement, soulignant ainsi l'importance de trouver des solutions durables pour l'avenir.

Chapitre 2: Régulation VFD : Ce chapitre se concentre sur la régulation VFD (Variable Frequency Drive) utilisée dans le contexte du pompage photovoltaïque au fil du soleil. Il explore les principes et les avantages de cette technologie en termes de contrôle de la vitesse et de l'efficacité énergétique du système.

Chapitre 3: Correction floue : Ce chapitre présente l'application de la correction floue dans le cadre du contrôle du système de pompage solaire. Deux modèles de contrôleurs flous sont étudiés et comparés à la régulation VFD, mettant en avant les performances et l'efficacité de ces stratégies de contrôle dans différentes conditions d'exploitation.

Chapitre 4: Résultats et discussions : Ce chapitre analyse les résultats obtenus à travers l'expérimentation et la simulation des différentes stratégies de contrôle. Il met en évidence l'évolution du débit pour les différents types de régulateurs, soulignant les avantages et les spécificités de chaque approche. Les discussions portent sur la comparaison des performances et l'évaluation de l'efficacité des contrôleurs flous dans le contexte du pompage photovoltaïque au fil du soleil.

Chapitre 5: Conclusion : Ce chapitre synthétise les principales conclusions de l'étude sur la commande par logique floue d'un système de pompage solaire. Il met en avant les contributions de la recherche, les limites identifiées et les perspectives futures pour le développement de solutions durables dans le domaine de l'énergie renouvelable.

Chapitre 1

Contexte, enjeux et problématique

1.1 Introduction

Répondre à la demande croissante en énergie tout en préservant l'environnement est un défi majeur pour les années à venir. La dépendance actuelle aux ressources non renouvelables, comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel, a des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en contribuant au changement climatique.

Les énergies renouvelables offrent une alternative prometteuse. Elles permettent de produire de l'électricité propre et de réduire la dépendance aux ressources fossiles. Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et largement exploitable. Elle offre la possibilité aux utilisateurs de subvenir à une partie de leurs besoins en énergie sans intermédiaire.

Cette solution innovante est parfaitement adaptée aux besoins des zones isolées privées du réseau électrique. Elle offre aux habitants une alternative écologique et économique pour leur consommation d'énergie électrique.

Le pompage photovoltaïque, solution écologique et économique, s'avère être une réponse particulièrement adaptée aux défis de l'accès à l'eau en Algérie. Parfaitement compatible avec les conditions climatiques du pays et les besoins des populations rurales, cette technologie permet d'alimenter en eau potable et d'irriguer les terres agricoles de manière durable. Son développement en Algérie contribuera à la sécurité alimentaire, à la préservation des ressources naturelles et à l'amélioration des conditions de vie des populations rurales.

1.2 Contexte et enjeux

L'accès à l'eau potable et à l'irrigation est un défi crucial pour le développement durable et la lutte contre la pauvreté. Dans les zones rurales et isolées, où l'accès à l'électricité conventionnelle est souvent limité ou inexistant, les systèmes de pompage d'eau constituent une solution vitale pour répondre aux besoins des populations.

Les pompes à moteur diesel, couramment utilisées dans ces régions, présentent des inconvénients majeurs :

- **Dépendance aux combustibles fossiles** : Elles reposent sur l'utilisation de combustibles fossiles, tels que le diesel, qui sont des ressources non renouvelables et polluantes.
- **Coûts d'exploitation élevés** : Le prix du diesel est souvent fluctuant et élevé, ce qui représente une charge financière importante pour les communautés locales.
- **Impact environnemental négatif** : La combustion du diesel émet des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques, contribuant au changement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air.

1.3 Le pompage photovoltaïque au fil du soleil : une alternative durable

Le pompage photovoltaïque au fil du soleil, également connu sous le nom de pompage solaire direct, se présente comme une alternative économique et écologique aux systèmes de pompage traditionnels. Cette technologie ingénieuse tire parti de l'énergie solaire pour faire fonctionner une pompe directement, sans nécessiter l'utilisation de batteries.

Face aux défis croissants liés à la raréfaction de l'eau et aux impacts environnementaux du changement climatique, le pompage solaire se présente comme une solution durable et prometteuse. En effet, cette technologie innovante offre de nombreux avantages qui en font un choix particulièrement pertinent pour les régions isolées et fragilisées. Parmi les principaux atouts du pompage solaire, on peut citer :

1. Coût plus bas :

- **Système plus simple** : L'absence de batteries réduit le nombre de composants et simplifie l'installation, ce qui se traduit par des coûts d'investissement initiaux moins élevés.
- **Moins d'entretien** : Sans batteries à entretenir ou à remplacer, le pompage au fil du soleil nécessite une maintenance moins importante, réduisant ainsi les coûts d'exploitation sur le long terme.

2. Fiabilité accrue :

- **Moins de composants sensibles** : L'absence de batteries, qui sont des éléments fragiles du système, rend le pompage au fil du soleil plus fiable et moins susceptible de pannes.
- **Stockage d'eau sécurisé** : Le stockage d'eau dans des réservoirs ne présente aucun risque de pollution ou de contamination, contrairement aux batteries qui peuvent contenir des substances nocives pour l'environnement.

3. Respectueux de l'environnement :

- **Impact environnemental réduit** : La fabrication et le recyclage des batteries ont un impact environnemental non négligeable. En les éliminant, le pompage au fil du soleil minimise son empreinte écologique.

- **Utilisation optimale des ressources naturelles** : Le pompage au fil du soleil exploite directement l'énergie solaire, une ressource renouvelable et abondante, sans gaspillage d'énergie stockée dans des batteries.

4. Adaptabilité :

- **Parfaitement adapté aux zones ensoleillées** : Le pompage au fil du soleil tire pleinement parti des régions ensoleillées pour maximiser son efficacité, ce qui le rend particulièrement adapté aux climats arides et semi-arides.
- **Solution évolutive** : La capacité de pompage peut être facilement augmentée en ajoutant des panneaux solaires supplémentaires, sans nécessiter de modifications majeures du système.

1.4 Problématique et objectifs de recherche

Malgré ses nombreux avantages, le pompage photovoltaïque au fil du soleil présente des défis techniques liés à la variabilité de la ressource solaire et à la nécessité d'adapter continuellement le débit et la pression d'eau pompée à la tension et le courant issus du champ des panneaux PV.

1.4.1 Problématique

Établir une commande robuste du débit via le réglage de la vitesse de rotation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil afin de maximiser l'efficacité énergétique, de répondre aux besoins en eau des utilisateurs et de garantir une alimentation économique fiable et durable.

1.4.2 Objectifs de recherche

- Développer un modèle précis du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, prenant en compte les différentes composantes du système et les interactions entre elles.
- Analyser les différentes stratégies de commande du débit existantes et identifier leurs avantages et leurs limites.
- Développer une commande de la vitesse de rotation du MAS pour optimiser les performances du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.

1.5 Démarche méthodologique

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons opté pour la commande par logique floue afin de piloter la vitesse du moteur asynchrone et, par conséquent, le débit d'eau dans le système de pompage photovoltaïque. Ce choix s'explique par plusieurs avantages que présente cette approche par rapport aux techniques de commande classiques :

- **Adaptabilité et robustesse** : La logique floue offre une grande flexibilité et une capacité d'adaptation aux variations des conditions de fonctionnement du système, telles que l'ensoleillement, la demande en eau et les caractéristiques du puits. Cette robustesse face aux perturbations la rend particulièrement adaptée aux environnements complexes et incertains.
- **Traitement des connaissances imprécises et linguistiques** : La logique floue permet de traiter des informations imprécises et linguistiques, ce qui s'avère particulièrement utile pour modéliser le comportement non linéaire du système de pompage et la complexité des interactions entre ses différents composants.
- **Prise en compte de plusieurs objectifs** : La commande par logique floue peut intégrer simultanément plusieurs objectifs de contrôle, tels que l'optimisation du débit d'eau, l'efficacité énergétique du système et la protection du moteur asynchrone. Cette capacité à gérer des objectifs multiples est essentielle pour un fonctionnement optimal du système de pompage.

La mise en œuvre de la commande par logique floue s'est déroulée en plusieurs étapes:

1. **Modélisation du système de pompage** : Un modèle mathématique du système de pompage a été développé, prenant en compte les caractéristiques du moteur asynchrone, de la pompe hydraulique et du générateur photovoltaïque. Un régulateur à action proportionnel-intégral a été synthétisé pour pouvoir comparer ses performances à celles obtenues en utilisant un contrôleur à base de logique floue.
2. **Théorie des contrôleurs flous** : Une introduction complète aux concepts et principes fondamentaux de la logique floue et des contrôleurs flous a été présentée. En premier lieu, les origines et les motivations de la logique floue ont été explorées, en soulignant sa capacité à traiter des informations imprécises et incertaines, contrairement à la logique booléenne classique. Cela a permis de poser les bases de la compréhension des principes fondamentaux de la logique floue, notamment le concept d'ensembles flous, de fonctions d'appartenance et d'opérations floues. Ensuite, la structure et le fonctionnement des systèmes de contrôle flous ont été explorés, en mettant l'accent sur le rôle des règles floues, de l'inférence floue et de la défuzzification dans la traduction d'entrées floues en sorties de contrôle nettes. Cette discussion a permis de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les contrôleurs flous peuvent gérer efficacement des systèmes complexes et incertains.
3. **Simulation et validation** : La commande de la vitesse du moteur asynchrone et le débit d'eau dans le système de pompage photovoltaïque par la logique floue a été simulée numériquement en utilisant des outils de simulation dédiés. Les résultats obtenus ont été confrontés à des tests de robustesse afin de valider l'efficacité de cette commande.

1.6 Conclusion

Ce chapitre introductif éclaire sur les enjeux du pompage photovoltaïque au fil du soleil, mettant en lumière son rôle potentiel en tant que solution durable. En définissant la problématique et en énonçant les objectifs de recherche, il établit une base solide pour cette étude. La démarche méthodologique présentée promet une exploration rigoureuse et structurée. Ainsi, ce chapitre inaugure une investigation approfondie et éclairée sur le sujet.

Chapitre 2

Revue de la littérature

2.1 Introduction

La commande par logique floue est une technique de commande robuste et adaptative qui s'avère particulièrement adaptée aux systèmes non linéaires et complexes comme les systèmes de pompage solaire. Cette technique permet de gérer la variabilité de la ressource solaire et d'optimiser les performances du système en temps réel.

Cette revue de littérature vise à synthétiser les travaux de recherche les plus récents sur la commande par logique floue des systèmes de pompage solaire.

2.2 Objectif de la Revue

L'objectif principal de cette revue de littérature est de fournir une vue d'ensemble des recherches récentes sur la commande par logique floue des systèmes de pompage solaire. Plus précisément, elle vise à :

- Identifier les différentes approches de commande par logique floue appliquées aux systèmes de pompage solaire.
- Évaluer les performances des différentes approches de commande par logique floue en termes d'efficacité de pompage, de stabilité et de suivi du point de puissance maximale (MPPT).
- Discuter des avantages et des limites de la commande par logique floue pour les systèmes de pompage solaire.
- Identifier les directions de recherche futures dans le domaine de la commande par logique floue des systèmes de pompage solaire.

2.3 Thèses de Doctorat

1. Zaïem, K., & Kamar, A. (2019) : Cette thèse propose une approche de commande par logique floue adaptative pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. L'approche proposée permet d'améliorer l'efficacité de pompage et la stabilité du système en tenant compte des variations de la ressource solaire et des caractéristiques du moteur de pompe [2].

2. Benkhelifa, A., & Belfodil, M. (2018) : Cette thèse présente une commande par logique floue de type-2 pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. La commande floue de type-2 permet de gérer l'incertitude sur les paramètres du système et d'améliorer la robustesse de la commande [3].
3. Sebbah, M., & Fadel, M. (2017) : Cette thèse propose une commande par logique floue pour un système de pompage photovoltaïque à moteur asynchrone. La commande proposée permet d'optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et d'améliorer l'efficacité de pompage [4].

2.4 Articles de Revues

- Fekrouni, M., & Kraa, F. (2022) : Cet article propose une approche de commande par logique floue basée sur une optimisation hybride des algorithmes Harris Hawks et Whale pour un système de pompage photovoltaïque. L'approche proposée permet d'optimiser les performances du système en termes d'efficacité de pompage et de suivi du MPPT [5].
- Boualleg, A., & Khedher, A. (2021) : Cet article présente une commande par logique floue optimisée par algorithme de particules pour un système de pompage photovoltaïque. L'approche proposée permet d'améliorer l'efficacité de pompage et la stabilité du système [6].
- Aissa, M., & Bekkouche, A. (2020) : Cet article compare les performances de différentes approches de commande par logique floue optimisées par algorithmes métaheuristiques pour un système de pompage photovoltaïque. Les résultats montrent que l'approche basée sur l'algorithme des abeilles artificielles offre les meilleures performances [8].

2.5 Conclusion

Les travaux de recherche cités dans cette revue de littérature démontrent de manière convaincante que la commande par logique floue représente une approche efficace et prometteuse pour améliorer les performances des systèmes de pompage solaire. Voici plusieurs aspects clés qui ressortent de ces études :

1. **Optimisation de l'efficacité de pompage** : Les différentes approches de commande par logique floue appliquées aux systèmes de pompage solaire visent à maximiser l'efficacité de conversion d'énergie solaire en énergie de pompage. En ajustant les paramètres de contrôle en temps réel, ces méthodes permettent d'exploiter de manière plus efficace la puissance disponible, en adaptant la vitesse de la pompe aux conditions variables de l'ensoleillement et de la demande en eau.
2. **Amélioration de la stabilité du système** : La commande par logique floue aide à maintenir la stabilité opérationnelle du système de pompage solaire face à des variations externes telles que les changements météorologiques ou les fluctuations de charge.

En ajustant les actions de contrôle de manière adaptative et en prenant en compte les conditions environnementales changeantes, ces approches contribuent à réduire les risques de perturbations et à assurer un fonctionnement stable et fiable du système.

3. **Suivi optimal du Point de Puissance Maximale (MPPT) :** Un aspect critique de la commande par logique floue dans les systèmes de pompage solaire est sa capacité à suivre efficacement le Point de Puissance Maximale (MPPT). Cette fonctionnalité permet au système de toujours fonctionner à la puissance maximale disponible du panneau solaire, même lorsque les conditions d'éclairement solaire varient. Cela se traduit par une maximisation de l'énergie produite et une utilisation plus efficace des ressources disponibles.
4. **Adaptabilité et robustesse :** Les études montrent également que les approches de commande par logique floue, en particulier celles intégrant des algorithmes d'optimisation comme les essaims de particules, les algorithmes hybrides, ou d'autres métaheuristiques, renforcent la robustesse du système face à l'incertitude et aux conditions opérationnelles variables. Cela est essentiel pour garantir une performance optimale sur le long terme et pour répondre aux exigences spécifiques des environnements solaires souvent imprévisibles.

En conclusion, l'utilisation de la commande par logique floue dans les systèmes de pompage solaire se révèle être une approche particulièrement efficace pour surmonter les défis liés à la variabilité des conditions solaires et des demandes en eau. Les avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique, de stabilité opérationnelle et de capacité à maximiser la production d'énergie solaire font de cette technique une solution attrayante et viable pour les applications de pompage solaire à petite et grande échelle.

Chapitre 3

Commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil

3.1 Introduction

La commande VFD (Variable Frequency Drive), également connue sous le nom de variateur de fréquence, joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. En permettant d'ajuster la vitesse de rotation du moteur de la pompe en temps réel, la commande VFD offre plusieurs avantages importants:

- Adaptation à la ressource solaire variable : La vitesse de la pompe peut être ajustée en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, ce qui permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible et de stocker la quantité maximale de l'eau.
- Protection du système : La commande VFD peut protéger le système contre les surcharges, ce qui prolonge la durée de vie des composants et garantit un fonctionnement fiable.
- Fonctionnement souple : La commande VFD offre une grande flexibilité de fonctionnement, permettant de programmer différents modes de fonctionnement et de répondre à des besoins spécifiques en eau.

3.1.1 Principe de fonctionnement

La commande VFD utilise des techniques de conversion électronique pour ajuster la fréquence et la tension du courant fourni au moteur de la pompe. En modifiant l'amplitude et la fréquence du courant, la vitesse de rotation du moteur est contrôlée, ce qui permet de réguler le débit d'eau pompée.

3.1.2 Types de commande VFD

Il existe différents types de commandes VFD, chacune avec ses propres caractéristiques et avantages :

- Commande VFD scalaire : La commande scalaire, également connue sous le nom de commande V/f constant, est une méthode de commande simple et intuitive des moteurs asynchrones (MAS) dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Cette technique se base sur la variation simultanée de la tension et de la fréquence d'alimentation du moteur pour contrôler sa vitesse et son couple. En gardant le rapport tension/fréquence constant, le couple sera proportionnel à la vitesse de glissement. Ce qui permet un contrôle de la vitesse de rotation du MAS peu coûteux et facilement réalisable. Cette méthode de commande présente l'inconvénient d'être instable à basse vitesse et très sensible aux variations de la résistance statorique du moteur [16].
- Commande VFD vectorielle : La commande VFD vectorielle, également connue sous le nom de commande à orientation de flux, se présente comme une méthode de commande sophistiquée et performante des moteurs asynchrones dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Cette technique repose sur la décomposition du flux rotorique du moteur en ses composantes directe et inverse, permettant un contrôle découplé du flux et du couple du moteur. Cette technique permet de maximiser l'efficacité énergétique du MAS en optimisant le couple. Cependant, sa mise en œuvre est plus complexe et plus coûteuse que la commande scalaire [17].
- Commande VFD floue : Dans le domaine des systèmes à base du MAS, l'émergence de techniques de commande VFD modernes et intelligentes ouvre de nouvelles perspectives en matière de performance, d'efficacité et d'optimisation. Ces approches, qui s'appuient sur des algorithmes avancés et des techniques d'intelligence artificielle, permettent de repousser les limites des commandes classiques et d'offrir des solutions innovantes pour les applications à base du MAS. Parmi les exemples de commandes VFD modernes et intelligentes, on peut citer ; la commande floue, la commande par réseaux de neurones artificiels et les commandes adaptatives. Ces commandes permettent d'atteindre des performances plus élevées en termes de précision, de vitesse de réponse et d'efficacité énergétique. Malgré leurs nombreux avantages, les commandes VFD modernes et intelligentes présentent certains inconvénients qu'il est important de prendre en compte comme la mise en œuvre qui est plus difficile et le coût qui est très élevé [18].

Le compromis entre les avantages potentiels et les inconvénients de chaque types de commande doit être soigneusement analysé pour déterminer si ces commandes constituent la meilleure solution pour un projet de pompage photovoltaïque donné.

3.1.3 Avantages de la commande VFD

L'utilisation d'une commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil présente de nombreux avantages :

- Amélioration de l'efficacité énergétique : La commande VFD permet de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale du système.
- Augmentation de la durée de vie des composants : La commande VFD protège le système contre les surcharges et les autres perturbations, ce qui prolonge la durée de vie des composants.

- Fonctionnement souple : La commande VFD offre une grande flexibilité de fonctionnement et permet de répondre à des besoins spécifiques en eau.
- Réduction des coûts d'exploitation : L'amélioration de l'efficacité énergétique et la prolongation de la durée de vie des composants peuvent contribuer à réduire les coûts d'exploitation du système.

3.1.4 Modèle du Contrôleur PI

Le contrôleur PI ajuste la commande de tension pour minimiser l'erreur entre la vitesse de référence $\Omega_{ref}(s)$ et la vitesse réelle $\Omega_m(s)$. La fonction de transfert du contrôleur PI est :

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.1)$$

où :

- k_p est le gain proportionnel.
- k_i est le gain intégral.

3.2 Commande scalaire en tension

La commande scalaire de la machine asynchrone repose principalement sur le principe de maintenir le rapport tension-fréquence constant pour conserver un flux magnétique constant dans la machine.

Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine asynchrone alimentée en tension par un onduleur MLI de tension contrôlé en tension par MLI triangulo-sinusoïdale, il faut maintenir le flux statorique constant par le contrôle de la pulsation rotorique ω_r .

Le schéma bloc de la figure 3.1 présente la commande scalaire d'une machine asynchrone alimentée en tension par un onduleur MLI de tension contrôlé en tension par MLI triangulo-sinusoïdale.

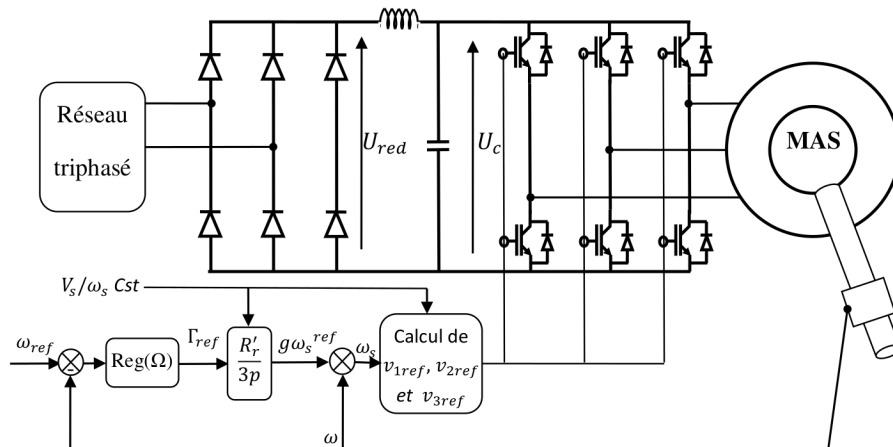


Figure 3.1: Schéma de principe de la commande scalaire en tension de la MAS.

Le circuit de commande de ce schéma comporte trois parties essentielles: la régulation de la vitesse nécessaire pour avoir la pulsation rotorique de référence, la loi de commande scalaire pour construire les tensions de références statoriques, et enfin la technique MLI triangulo-sinusoidale pour la génération des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur.

Les tensions de références de la commande MLI triangulo-sinusoidale sont construites à partir de cette loi de commande et de la relation d'autopilotage $\omega_s = \omega_r + \omega$ comme suit:

$$\begin{cases} v_{s1}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t) \\ v_{s2}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{s3}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec : $V_s = \phi_{sn} \omega_s$

Où $\phi_{sn} = \frac{V_{sn}}{\omega_{sn}}$ est le flux nominal en fonctionnement normal.

3.2.1 Régulation de la vitesse

La régulation de la vitesse du moteur asynchrone sert à déterminer la pulsation rotorique de référence ω_r^* . Cette dernière est l'image du couple de la machine. Si la machine est chargée, la vitesse décroît, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée en conséquence et la tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en $\frac{V_s}{f}$ constant.

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI) sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques. L'action proportionnelle assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action intégrale élimine l'erreur statique en régime permanent. Le schéma d'un régulateur PI est représenté sur la figure (3.2).

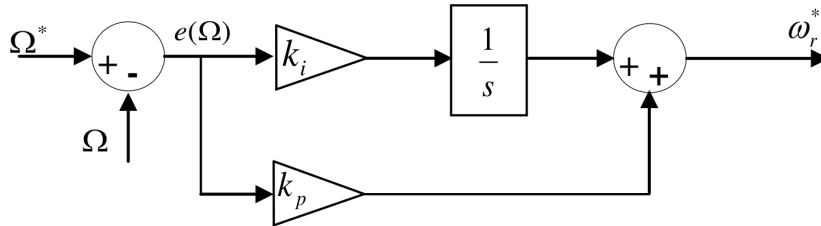


Figure 3.2: Schéma d'un régulateur PI

En se basant sur le schéma électrique d'une phase de la MAS (figure 3.3) en régime permanent et en négligeant les pertes dans le fer. On ramène l'inductance de fuite du stator en aval de la branche magnétisante. Le schéma électrique équivalent avec fuites magnétiques totalisées sera donné comme suit.

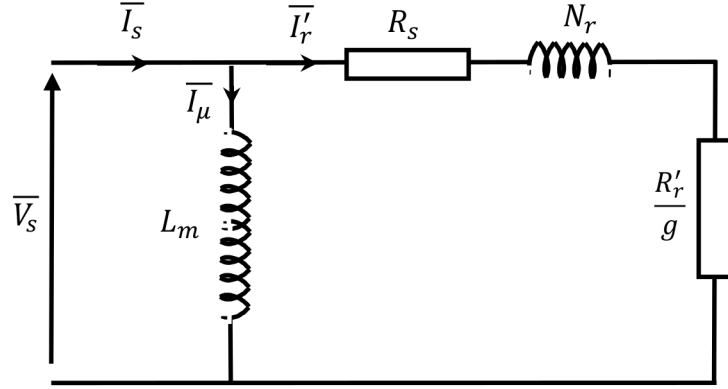


Figure 3.3: Schéma électrique d'une phase de la MAS.

Alors, en partant du schéma par phase de cette figure, on peut écrire l'équation régissant le couple électromagnétique du MAS en régime permanent ainsi :

$$T_e = \frac{3pR'_r}{g\omega_s} \left(\frac{V_s^2}{\left(\frac{R'_r}{g} + R_s\right)^2 + (N_r\omega_s)^2} \right) \quad (3.3)$$

Si l'on écrit le couple en régime permanent en négligeant la résistance du stator de la machine asynchrone, dans ces conditions, on aura :

$$T_e = \frac{3pR'_r}{g\omega_s} \left(\frac{V_s^2}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (N_r\omega_s)^2} \right) \quad (3.4)$$

Cette expression du couple en régime permanent pourra être simplifiée et donné comme suit :

$$T_e = 3pR'_r \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \left(\frac{g\omega_s}{(R'_r)^2 + (gN_r\omega_s)^2} \right) \quad (3.5)$$

En négligeant la résistance du stator et " $gN_r\omega_s$ " devant " R'_r " en régime nominal, on aura :

$$T_e = \frac{3p}{R'_r} \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 g\omega_s \quad (3.6)$$

Il est clair que la vitesse du glissement est proportionnelle au couple mécanique de la MAS.

Le schéma de commande de la figure (3.4) présente la manière de réguler la vitesse de la machine en reconstituant la pulsation statorique à partir de la vitesse et de la pulsation rotorique. Cette dernière, qui est l'image du couple de la machine est issue du régulateur de vitesse.

Si la machine est chargée, la vitesse a tendance à baisser, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée pour garder cet équilibre. La tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en "V/f" Constant. d'une machine asynchrone alimentée en tension.

La chaîne de régulation de vitesse peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure (3.4).

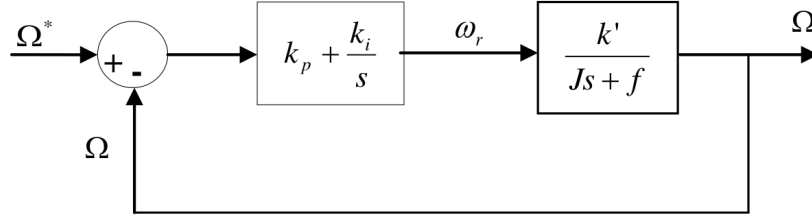


Figure 3.4: Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

La relation entre la pulsation rotorique et le signal d'erreur $e(\Omega) = \Omega^* - \Omega$ est donnée comme suit :

$$\omega_r = k_p e(\Omega) + \frac{k_i}{s} e(\Omega) \quad (3.7)$$

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système de la figure (3.4) est :

$$\text{FTBO} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left(\frac{k'}{Js + f} \right) = \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)} \quad (3.8)$$

La Fonction de transfert du système en boucle fermé (FTBF) est :

$$\text{FTBF} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{\text{FTBO}}{1 + \text{FTBO}} = \frac{\frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)}}{1 + \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)}} \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) peut être simplifiée comme suit :

$$\text{FTBF} = \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f) + k'(k_p s + k_i)} = \frac{\frac{k'}{J}(k_p s + k_i)}{s^2 + \frac{(f + k'k_p)}{J}s + \frac{k'k_i}{J}} \quad (3.10)$$

Soit la fonction de transfert d'un système désiré de 2ème ordre :

$$\text{FTBF} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.11)$$

Par identification du polynôme caractéristique de la FTBF (dénominateur de la FTBF) avec le polynôme caractéristique du système désiré et si l'on néglige l'effet de zéro sur la stabilité du système, on obtient :

$$\begin{cases} f + k'k_p = 2\zeta\omega_n J & \Rightarrow k_p = \frac{2\zeta\omega_n J - f}{k'} \\ k'k_i = \omega_n^2 J & \Rightarrow k_i = \frac{\omega_n^2 J}{k'} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.2.2 Génération des signaux de contrôle par MLI triangulo-sinusoïdale

La méthode de la MLI triangulo-sinusoïdale ou MLI sinusoïdale (en anglais : Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) consiste à comparer une onde de référence dite modulatrice avec une onde triangulaire dite porteuse d'une amplitude et d'une fréquence fixées.

Ce contrôle peut être mis en œuvre par un comparateur qui, à partir de l'écart entre la tension de référence et la porteuse, détermine les signaux de commande des interrupteurs comme il est indiqué sur la figure (3.5). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

Dans cette technique de commande, la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectue par variation de la largeur des signaux de commande.

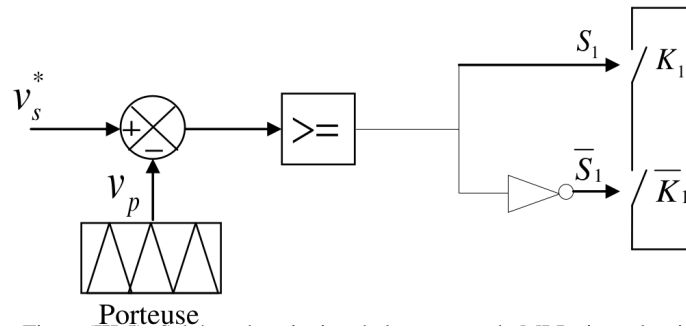


Figure 3.5: Schéma de principe de la commande MLI triangulo-sinusoidale.

La technique MLI triangulo-sinusoidale consiste à obtenir après modulation une tension en sortie égale en valeur moyenne sur une période de découpage (T_d) à sa référence.

$$\langle V_s \rangle_{T_d} = v_s^* \quad (3.13)$$

Cette équation peut être satisfaite sur une période de découpage avec un signal de commande S_1 égal à 1 si la tension de référence v_s^* est supérieure à la porteuse v_p , et 0 dans le cas contraire, comme indiqué dans la figure (3.6).

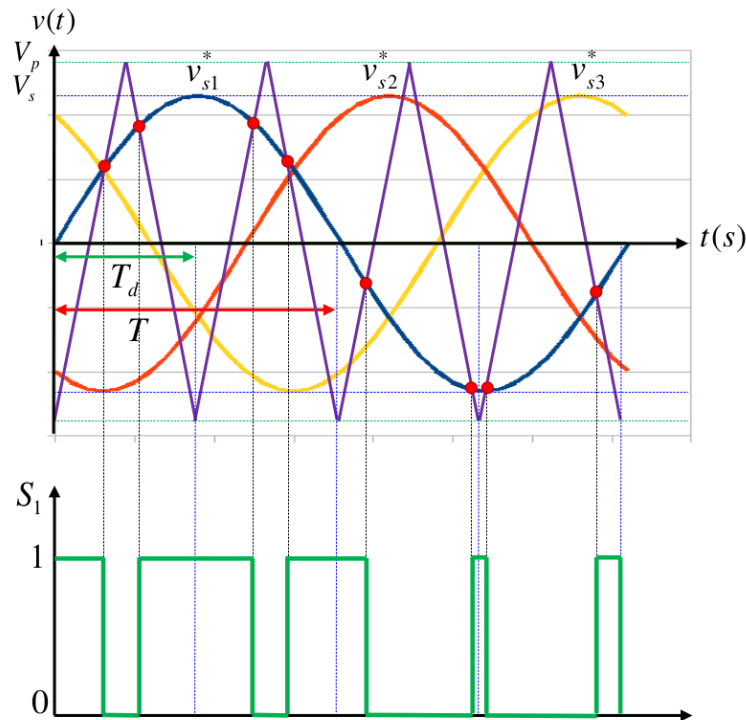


Figure 3.6: Signaux de références, la porteuse et l'état S_1 du premier interrupteur.

3.3 Simulation du démarrage du système de pompage sous les conditions STC

Suite à la simulation et à l'analyse approfondie des différents composants du système global de pompage solaire, nous nous concentrerons désormais sur la modélisation de l'architecture directe GPV-convertisseur-moteur-pompe, qui représente l'option la plus simple et la plus économique en termes d'implantation.

La figure (3.7) montre le schéma bloc global du système de pompage solaire modélisé dans l'environnement Simulink. Cette représentation inclut tous les composants principaux, à savoir le générateur photovoltaïque (GPV), le convertisseur, le moteur, et la pompe. Le schéma met en évidence la manière dont ces éléments sont interconnectés pour fournir une solution de pompage efficace et économique.

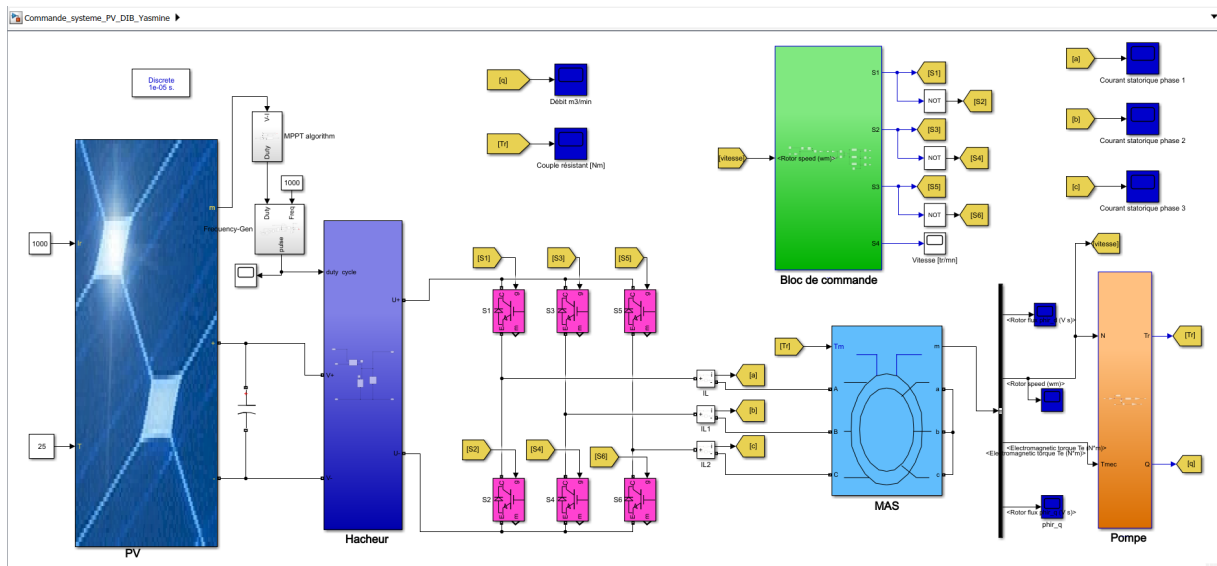


Figure 3.7: Modèle simulink du système global avec commande scalaire.

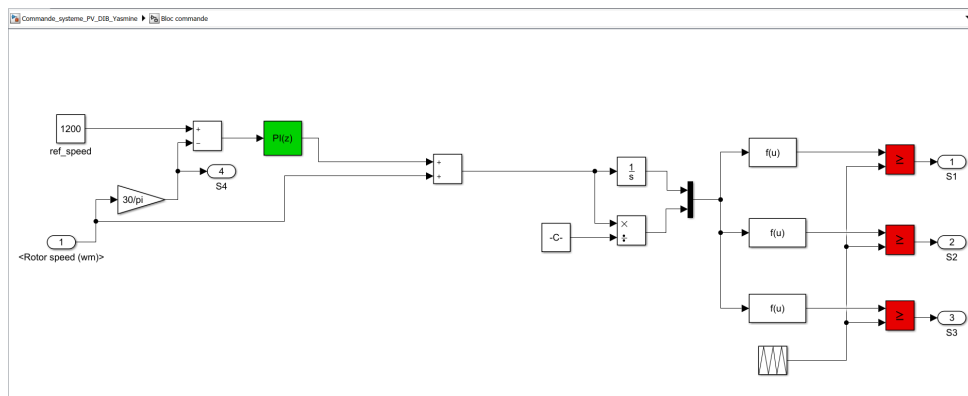


Figure 3.8: Circuit de commande scalaire.

La figure (3.9) illustre l'évolution de la vitesse du moteur avec la commande appliquée. Cette courbe permet de visualiser comment la vitesse du moteur est régulée au fil du

temps pour assurer un fonctionnement optimal du système de pompage. Nous pouvons vérifier que la vitesse du moteur reste dans des plages opérationnelles sûres et efficaces et qui respecte la consigne. La vitesse de rotation fait un dépassement acceptable due au poles imposés en boucle fermée puis tend à sa valeur de référence de manière à avoir une erreur statique nulle.

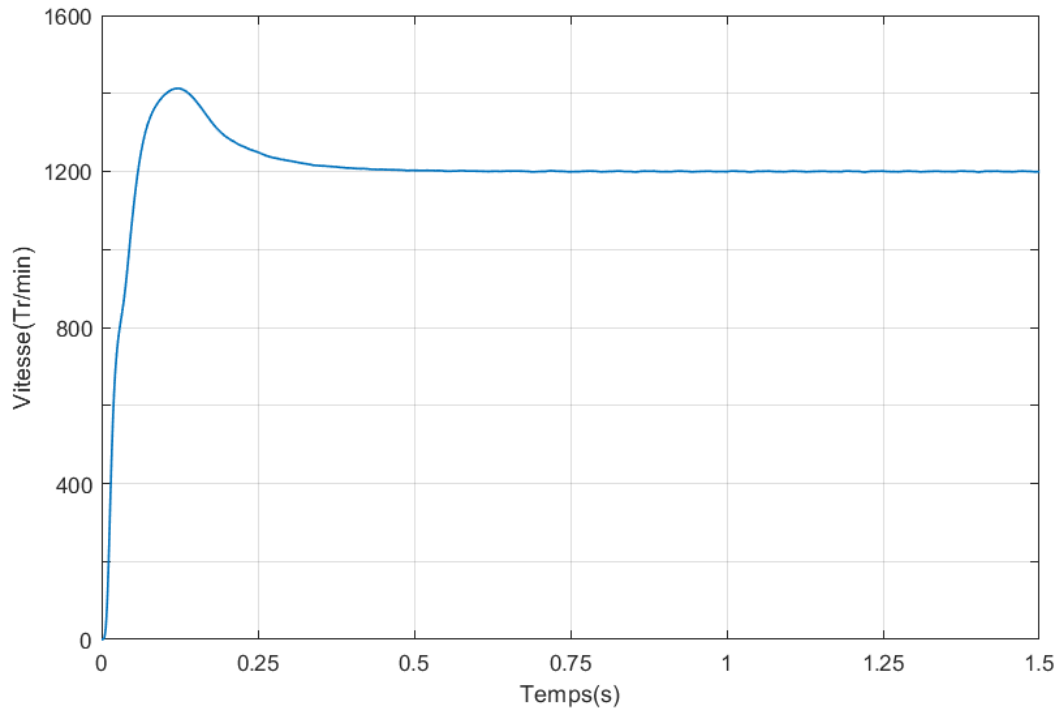


Figure 3.9: Profil évolutif de la vitesse du moteur en boucle fermée.

La figure (3.10) présente l'évolution du couple résistant de la pompe appliqué sur le moteur asynchrone lorsque la commande est appliquée. Cette dernière permet de maintenir ce couple à des niveaux acceptables pour éviter des surcharges et garantir la durabilité du moteur. Il est claire que ce couple augmente de manière très dure car ce couple est proportionnel au carré de la vitesse, puis il se stabilise à une valeur proche de sa valeur nominale.

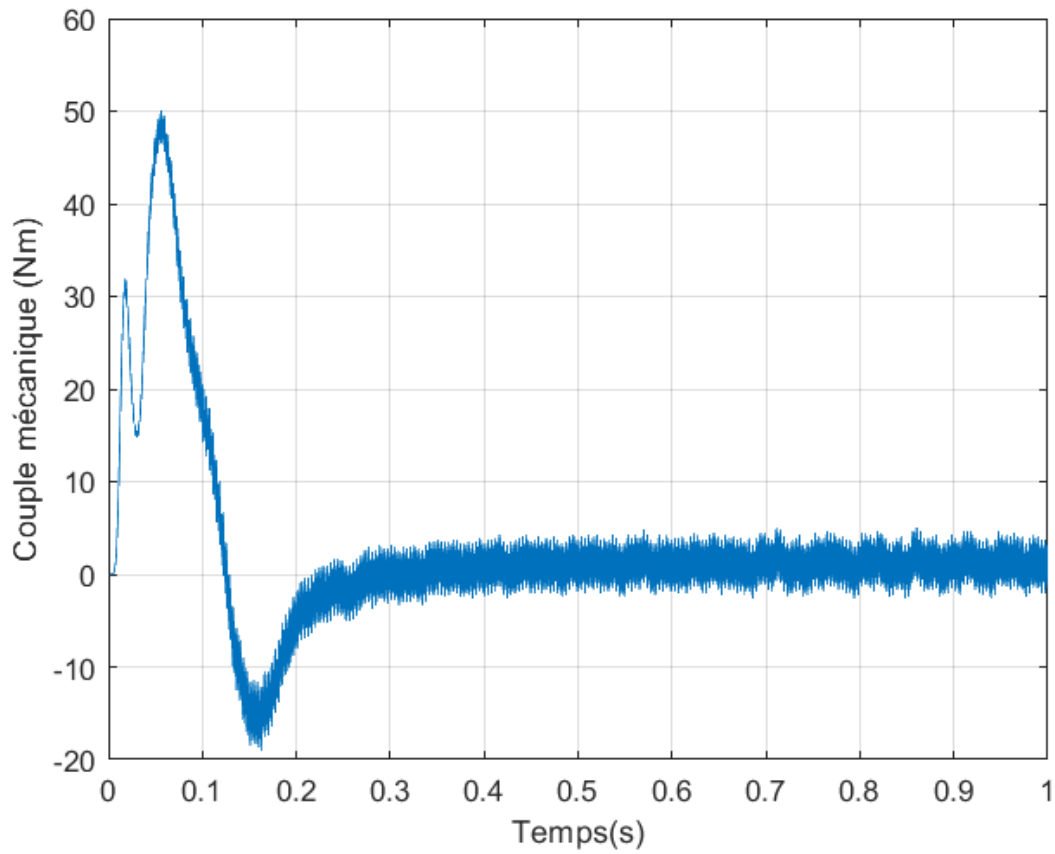


Figure 3.10: L'évolution du couple mécanique en boucle fermée.

La figure (3.11) montre l'évolution du débit de la pompe avec la commande en place. L'allure du débit suit celle de la vitesse de rotation conduisant à un débit stable et optimal. Ceci est un indicateur clé de performance pour le système de pompage solaire.

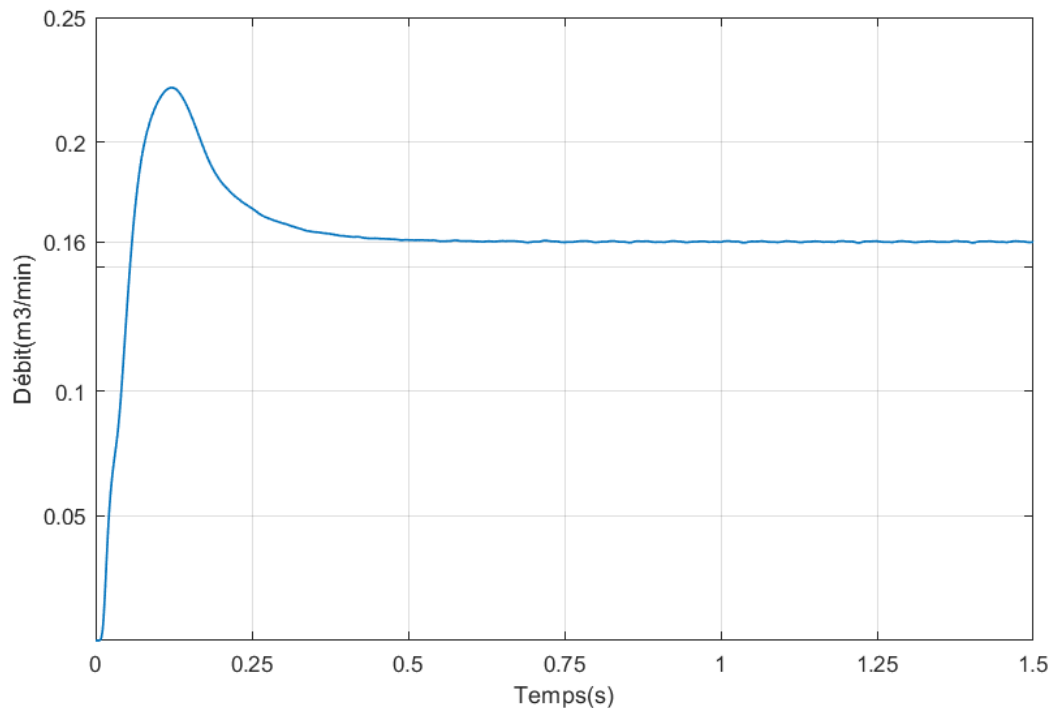


Figure 3.11: Évolution du débit de la pompe en boucle fermée.

3.4 Adaptation de la commande aux conditions variables

3.4.1 Influence de l'irradiation

Dans cette partie, nous avons augmenté le nombre de panneaux de sorte que la vitesse de 1200tr/mn soit assurée même sous l'irradiation minimale ($500\text{W}/\text{m}^2$).

La variation de la vitesse de rotation du moteur en fonction des niveaux d'irradiation (1000 , 800 et $500\text{W}/\text{m}^2$) est présentée dans la figure (3.12). L'observation met en lumière l'ajustement précis opéré par la stratégie de commande pour optimiser les performances du système de pompage photovoltaïque, même face aux fluctuations d'irradiation. Cette adaptation permet de garantir une efficacité énergétique maximale, d'assurer la fiabilité du système et maintenir une trajectoire de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

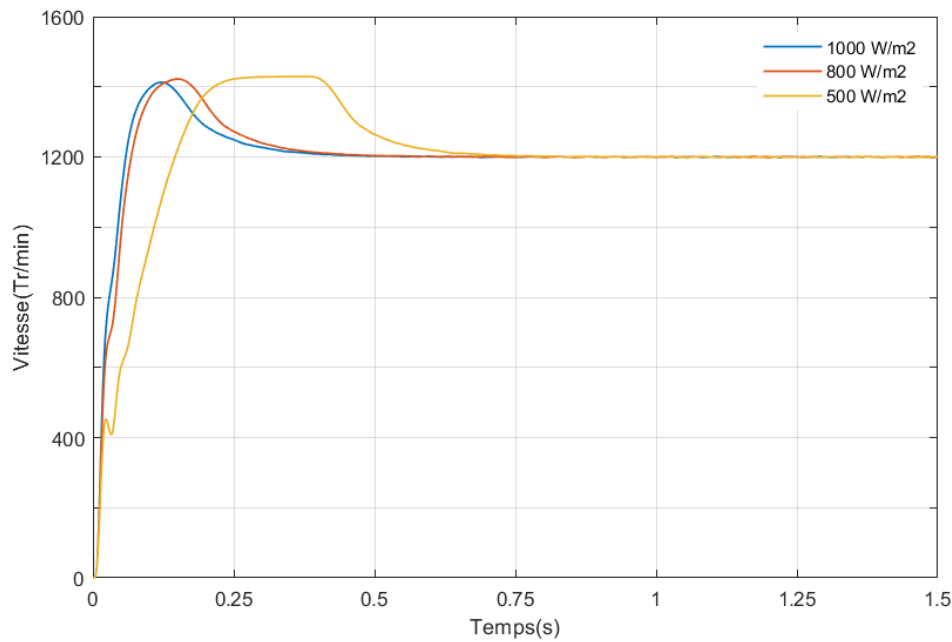


Figure 3.12: Variation de la vitesse du moteur en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m^2 .

La figure (3.13) montre la variation du débit de la pompe en fonction des niveaux d'irradiation de 1000, 800 et 500 W/m^2 . Ce graphique met en évidence la relation entre l'irradiation et le débit, démontrant la capacité du système commandé à réguler le débit de manière dynamique en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, assurant ainsi une performance optimale.

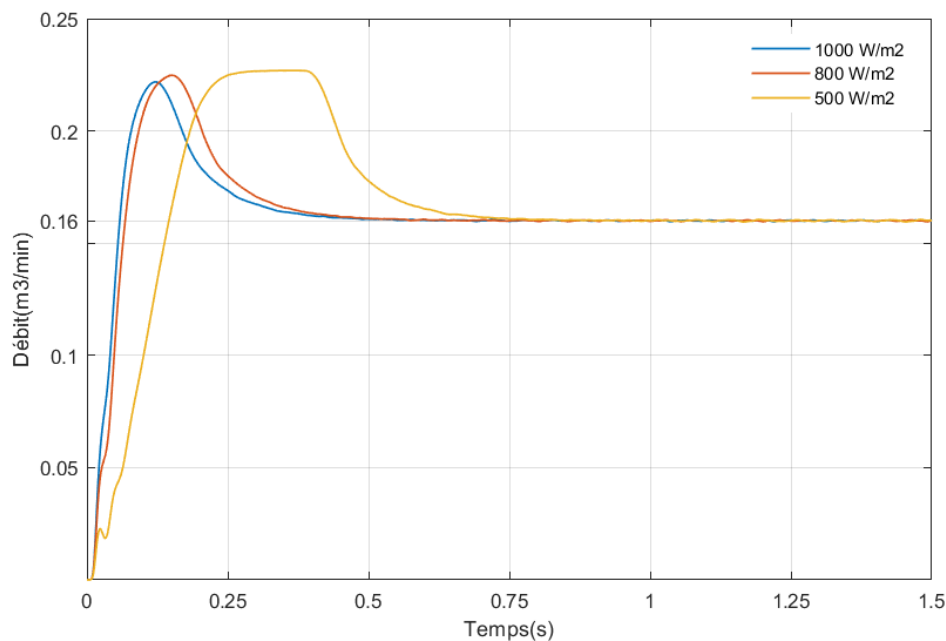


Figure 3.13: Évolution du débit de la pompe en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m^2 .

3.4.2 Influence de la température

Dans cette partie, il est simulé la réponse de la vitesse et du débit sous différentes températures.

La figure (3.14) présente l'évolution de la vitesse de rotation du moteur pour des températures ambiantes de 20, 50 et 10 degrés Celsius. Ce diagramme montre l'impact des variations de température sur les performances du moteur et la capacité de la commande à compenser ces variations pour maintenir une opération stable et efficace du système de pompage photovoltaïque.

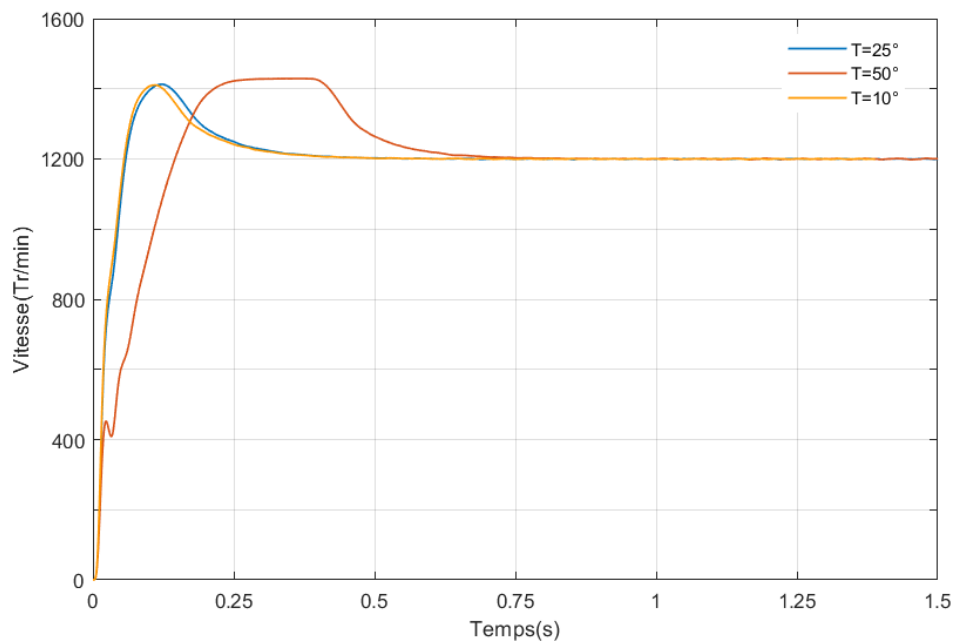


Figure 3.14: Impact de la température sur la vitesse du moteur pour des valeurs de température de 25, 50 et 10 degrés Celsius.

3.4.3 Suivi de référence

La figure (3.15) représente la réponse du système à un échelon de vitesse de référence, passant de 1000 à 1200 tr/min à $t=1$ s. La courbe illustre le suivi précis de la consigne par le système, mettant en évidence l'efficacité et la robustesse du correcteur utilisé.

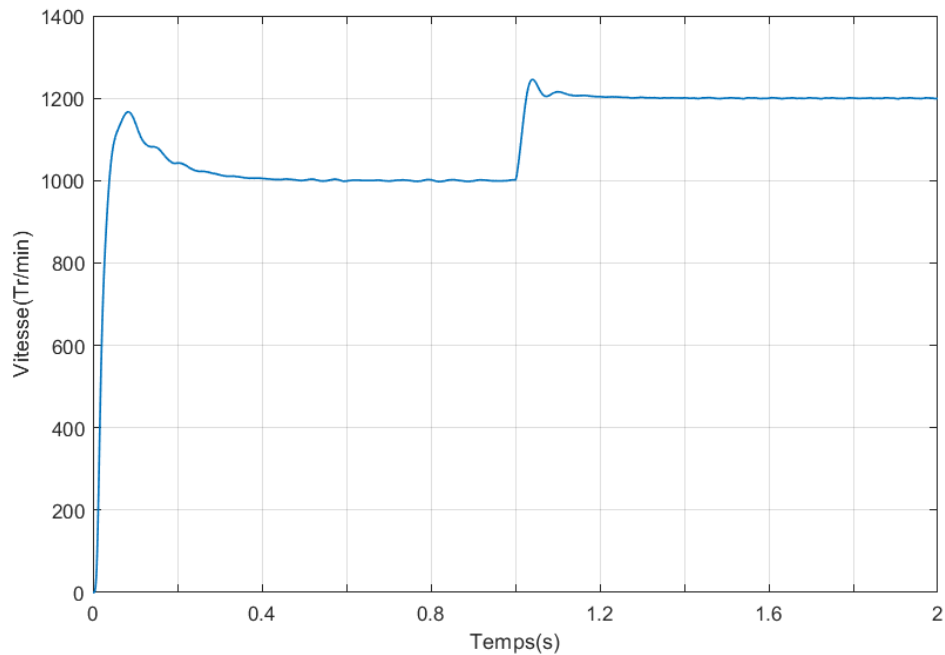


Figure 3.15: Réponse du système à un échelon de vitesse de référence de 1000 à 1200 tr/min à $t=1$ s, illustrant la robustesse du correcteur.

3.5 Conclusion

Ce chapitre se consacre à une analyse rigoureuse des résultats et des discussions concernant la commande d'un système de pompage solaire, visant à évaluer son efficacité et sa fiabilité dans des environnements variables.

Nous avons examiné les performances du système sous différentes intensités d'irradiation solaire et de température, mettant en évidence la capacité de la commande à optimiser le fonctionnement du système tout en s'adaptant aux fluctuations environnementales.

Les résultats ont révélé que la stratégie de commande était capable de réguler précisément la vitesse du moteur et le débit de la pompe, même face à des changements significatifs dans les conditions extérieures. Cette capacité d'adaptation assure non seulement une efficacité énergétique maximale, mais aussi la fiabilité et la durabilité du système dans divers contextes d'utilisation.

Chapitre 4

Commande floue: Une approche puissante pour les systèmes complexes

4.1 Introduction

La logique floue en anglais fuzzy logic est une théorie qui a été mise au point dans les années 60 du dernier siècle par le professeur Zadeh. Aujourd'hui cette technique est utilisée dans beaucoup d'applications comme dans des lave-vaisselle jusqu'aux compresseurs. Le Professeur Zadeh est parti de ce point de vue pour développer sa théorie. Les mathématiques classiques sont bien connues. Des ensembles avec leurs éléments soit l'élément appartient à cet ensemble soit il n'y appartient pas. L'élément appartient à un ensemble ou plusieurs ou aucun mais le concept reste le même : oui ou non, vrai ou pas. C'est la logique binaire. Mais que ce passe-t-il si tout n'est pas clair ? Un élément contient un peu à un ensemble, un peu à un autre et le reste n'appartient à aucun ensemble. Maintenant nous sortons du raisonnement binaire et entrons dans la logique floue. Comment peut-on utiliser cette théorie dans la théorie de réglage?

Au début certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes mathématiques réputés difficiles. Ce n'est qu'en 1975 que le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenu sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L. Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue. C'est au Japon où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative que la logique floue connaît son véritable essor. À la fin des années 1980, les produits grand public (machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes) estampés « fuzzy logic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical.

Dans ce chapitre, elles sont définies les notions de base de la logique floue en les illustrant par des exemples de compréhension. Nous présentons aussi l'utilisation de cette technique dans la théorie de réglage.

4.2 Principe Fondamental de la Logique Floue

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Afin de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple : celui de la classification de la vitesse d'une automobile en trois ensembles « lente », « moyenne » et « rapide ». Selon la logique classique (logique de Boole) qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1 (vrai ou faux), une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure 1.a. Toutes les vitesses moins de 40 km/h sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble « lente » et toutes les vitesses plus de 70 km/h sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble « rapide » alors qu'entre ces deux vitesses elle est jugée moyenne. Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une vitesse de 69 km/h très proche de 70 km/h doit-elle être considérée comme appartenant à l'ensemble «moyenne»? En réalité, un tel passage doit être fait progressivement et individuellement.

On peut exprimer le terme linguistique « rapide » d'une façon mathématique par construction d'une transition qui donne une certaine valeur de vérité selon la vitesse. On peut interpréter ceci comme une valeur de probabilité. On demande à cent personnes quand une vitesse est rapide : il y en a qui vont répondre à 65 km/h, d'autres répondent à 75 km/h, encore un autre à 90 km/h. Le groupe va construire une valeur de vérité pour la notion rapide. Le nombre de personnes qui trouve une vitesse rapide à une certaine valeur. Cette dernière est la valeur de vérité. Par exemple, dans un groupe de cent personnes, 5 personnes trouvent que 65 km/h est rapide, 17 personnes trouvent que 75 km/h est rapide et 55 personnes trouvent qu'une vitesse est rapide à 90 km/h. Donc, 65 km/h a la valeur de vérité de 5%, 75 km/h a une valeur de vérité de 17% et la vitesse de 90 km/h a une valeur de vérité de 55%. D'une telle manière on construit une courbe qui représente « rapide » et cette courbe est appelée fonction d'appartenance [7, 1].

Le concept d'appartenance est primordial dans la théorie des ensembles. Il désigne le fait qu'un élément fasse partie ou non d'un ensemble. Une fonction d'appartenance (également appelée fonction indicatrice ou encore fonction caractéristique) est une fonction qui explicite l'appartenance ou non à un ensemble. Par exemple, l'entier 7 appartient à l'ensemble $\{6; 7; 9\}$ (vrai). À contrario, l'entier 5 n'appartient pas à l'ensemble $\{6; 7; 9\}$ (faux). La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Dire que la théorie des ensembles flous est une généralisation de la théorie des ensembles classiques signifie que cette dernière n'est qu'un cas particulier de la théorie des ensembles flous. Pour faire une métaphore en langage ensembliste, la théorie des ensembles classiques n'est qu'un sous-ensemble de la théorie des ensembles flous.

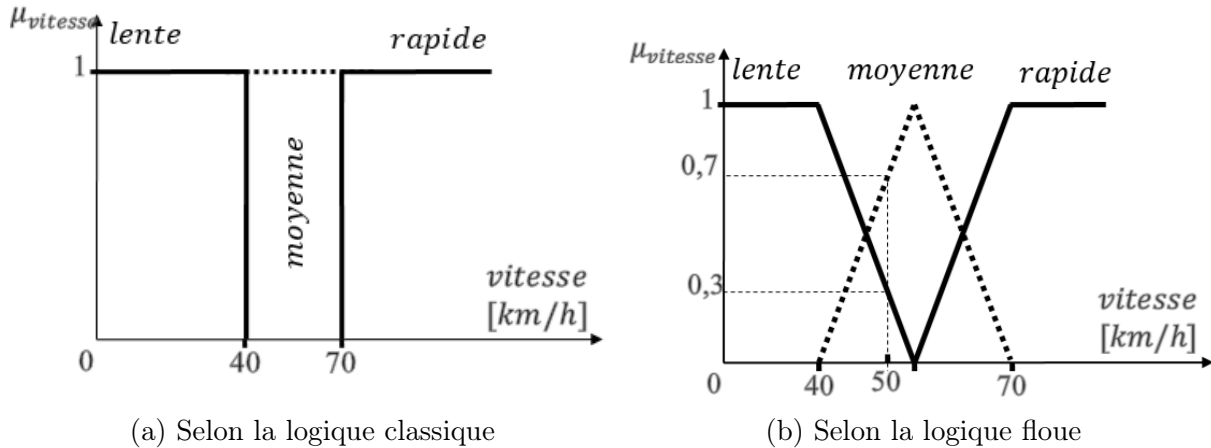


Figure 4.1: Classification des vitesses en trois ensembles

Pour simplifier les choses. La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, permet de tenir compte de cette réalité. La figure (4.1) montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci à l'aide de la logique floue. Ainsi, une vitesse de 50 km/h appartient à l'ensemble « lente » avec une valeur de $\mu = 0.3$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble « moyenne » avec $\mu = 0.7$. Évidemment, la forme des fonctions d'appartenance n'est pas rigide et peut dépendre du contexte envisagé, à savoir professionnel, sportif ou autre.

Dans ce qui suit, nous résumons les concepts de la théorie des ensembles flous nécessaires pour la conception des contrôleurs flous.

4.2.1 Ensembles Flous

Si l'on considère une grandeur physique u , dire que u appartient à un ensemble flou revient à lui attribuer une propriété de définition imprécise (linguistique) : u est grand, petit, voisin de zéro, etc. Un ensemble flou peut être vu comme une généralisation de concept d'ensemble ordinaire dont la fonction d'appartenance prend seulement deux valeurs $\{0,1\}$ (ensemble « booléen »). Cependant, sur un univers de discours U , un ensemble flou F est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_F prenant des valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$ [9].

$$\mu_F : U \rightarrow [0, 1] \quad x \mapsto \mu_F(x)$$

Cet ensemble flou F peut être représenté comme un ensemble de paires (élément générique, degré d'appartenance) ordonnées : $F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in U\}$. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle. Chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure 4.2) ne sont pas « nets » mais « flous » ou « graduels ».



Figure 4.2: Représentation graphique d'un ensemble classique (à gauche) et d'un ensemble flou (à droite)

4.2.2 Opérations élémentaires sur les ensembles

Soient A et B deux ensembles flous dans l'univers U ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonctions d'appartenance. L'union, l'intersection et la complémentation des ensembles flous utilisés le plus couramment sont définies à l'aide de leur fonction d'appartenance [10].

- **Union \cup :** La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ de la réunion $A \cup B$ est définie, pour tout $x \in U$, par $\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$.
- **Intersection \cap :** La fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ de l'intersection $A \cap B$ est définie, pour tout $x \in U$, par $\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$.
- **Complémentation:** La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément d'un ensemble flou A est définie, pour tout $x \in U$, par $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$.
- **Produit cartésien:** Si A_1, A_2, \dots, A_n sont des ensembles flous dans les univers U_1, U_2, \dots, U_n respectivement, le produit cartésien de ces ensembles est un ensemble flou dans l'espace produit $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{(A_1, A_2, \dots, A_n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \times \mu_{A_2}(x_2) \times \dots \times \mu_{A_n}(x_n)$$

Comme il est défini aussi dans certains cas par :

$$\mu_{(A_1, A_2, \dots, A_n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\}.$$

Contrairement aux définitions des propriétés des ensembles classiques qui sont toujours les mêmes, la définition des opérateurs sur les ensembles flous est choisie, à l'instar des fonctions d'appartenance. Par exemple, pour l'intersection de deux ensembles flous, on trouve aussi le produit des deux fonctions d'appartenance au lieu de la fonction min.

4.2.3 Variables linguistiques

L'utilisation des ensembles flous constitue une voie privilégiée pour la manipulation de concepts vagues et imprécis. En particulier, on peut employer les ensembles flous pour représenter des variables linguistiques. Une variable linguistique peut être vue soit comme une variable dont la valeur est un nombre flou, soit comme une variable dont les valeurs sont définies en termes linguistiques [7].

Soit V une variable (lente, rapide, moyenne de notre exemple), U est l'univers de discours constituant la plage de valeurs de la variable et $T(V)$ un ensemble fini ou infini des ensembles flous. Une variable linguistique correspond au triplet $(V, T(V), U)$.

Par exemple, si la vitesse est interprétée comme une variable linguistique, alors son ensemble de termes $T(\text{vitesse})$ peut être $\{\text{lente, moyenne, rapide, ...}\}$. On peut écrire donc:

$$\mathbf{T(\text{vitesse})} = \{\text{lente, moyenne, rapide, ...}\}$$

Où chaque terme dans $T(\text{vitesse})$ est caractérisé par un ensemble flou dans un univers de discours $U = [0, 100 \text{ km/h}]$ par exemple. M interprétera lente comme une vitesse inférieure ou égale à 40 km/h, rapide est interprété comme une vitesse supérieure ou égale à 70 km/h, moyenne est interprété par une vitesse entre ces deux vitesses. Ces termes peuvent être caractérisés comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure 1.b.

4.2.4 Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique. La fonction caractéristique de l'ensemble A de la variable V , dont l'ensemble des valeurs possibles est $T(V)$, est associée à une fonction $\mu_A(x)$ comprise entre 0 et 1, appelée fonction d'appartenance (ou degré d'appartenance, coefficient d'appartenance ou degré de possibilité)[11].

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des vitesses « moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les vitesses moyennes sont celles limitées entre 40 km/h et 70 km/h, donnant « 0 » pour les vitesses hors de l'intervalle $[40 \text{ km/h}, 70 \text{ km/h}]$ et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des vitesses « moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[0, 1]$. A chaque vitesse possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des vitesses « moyenne » compris entre 0 et 1 [7].

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, dites « linéaires par morceaux », car elles sont simples. De plus, elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie et les zones où elle est fausse, ce qui simplifie le recueil d'expertise. Ce sont des fonctions d'appartenance de ce type qui seront utilisées dans la suite de ce document [12].

- Fonction Triangulaire : $\mu_A(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right]$
- Fonction Trapézoïdale : $\mu_A(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c} \right), 1, 0 \right]$
- Fonction Gaussienne : $\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x-m}{\sigma} \right)^2 \right]$

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons ». Un singleton flou défini sur une variable réelle est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière de cette variable (comme «le feu est rouge»).

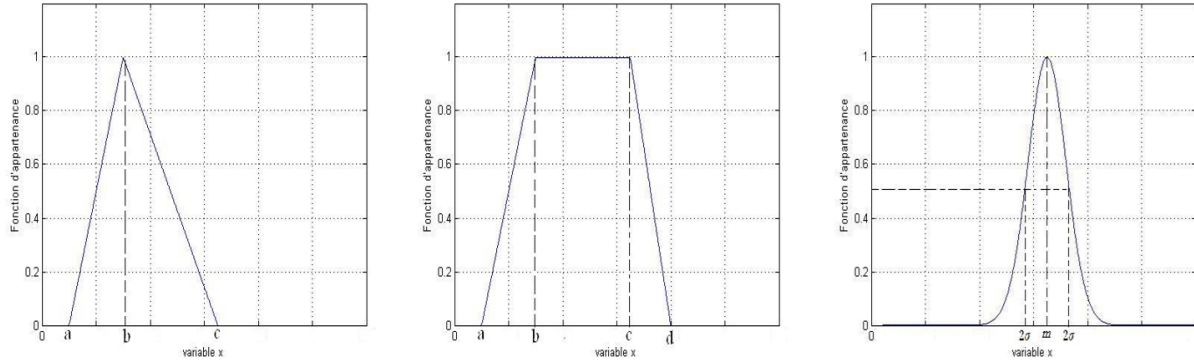


Figure 4.3: Différentes formes des fonctions d'appartenance.

4.2.5 Opérateur floue

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre propositions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir les opérateurs ET, OU, NON. Contrairement aux définitions des propriétés des ensembles classiques qui sont toujours les mêmes, la définition des opérateurs sur les ensembles flous est choisie, à l'instar des fonctions d'appartenance. Voici les deux ensembles d'opérateurs les plus répandus : ceux dits « de Zadeh » et « Probabiliste » [13].

Dénomination	(ET)	(OU)	(NON)
«de Zadeh»	$\min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$	$\max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$	$1 - \mu_A(x)$
«Probabiliste»	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

4.2.6 Raisonnement floue

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. En logique classique, les raisonnements sont de la forme « si p est vrai alors q est vrai ». En logique floue, le raisonnement, également appelé raisonnement approximatif, se base sur les règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques dont nous avons donné la définition précédemment. L'idée est que plus les propositions en prémisses sont vérifiées, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée. Une règle floue aura cette forme [7] :

Si [prémisses] Alors [conclusion]

La prémisse d'une règle floue peut très bien être formée d'une proposition floue ($x \in A$), une conjonction « ET » de plusieurs propositions floues ($x_1 \in A_1$ ET $x_2 \in A_2 \dots$), ou une disjonction « OU » de plusieurs propositions floues ($x_1 \in A_1$ OU $x_2 \in A_2 \dots$). L'ensemble des règles d'un système flou est appelé la matrice des décisions. Le résultat de l'application d'une règle floue dépend du degré de validité des propositions situées en prémisse et de la définition de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de la proposition située en conclusion de la règle floue.

Les bases de règles floues fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Ces règles permettent de relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie à l'aide d'une implication floue. Voici par exemple quelques règles de conduite qu'un conducteur suit en s'approchant d'un feu tricolore :

SI ma vitesse est moyenne ET la position du feu est proche ALORS le freinage est fort

La décision prise par le conducteur (le degré de vérité de la proposition floue «le freinage» doit appartenir à l'ensemble «fort») dépend du degré de validité de la prémisse, autrement dit du degré d'appartenance de la variable «ma vitesse» à l'ensemble flou «moyenne» et du degré d'appartenance de la variable «position du feu» à l'ensemble flou «proche».

A l'instar des autres opérateurs flous, il n'existe pas de définition unique de l'application floue. Le concepteur du système flou devra choisir parmi le large choix d'implication floue déjà définies. Voici les deux définitions de l'implication floue les plus couramment utilisées:

Nom	Valeur de vérité
Mamdani	$\min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$
Larsen	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$

Si nous choisissons l'implication de Mamdani, voici ce que nous obtenons pour la règle floue de l'exemple donné ci-dessus lorsque la vitesse du véhicule est notée 50 km/h et la position du feu est notée 35 mètres. Ainsi que la traduction du ET par min, voici ce que nous obtenons pour la règle floue.

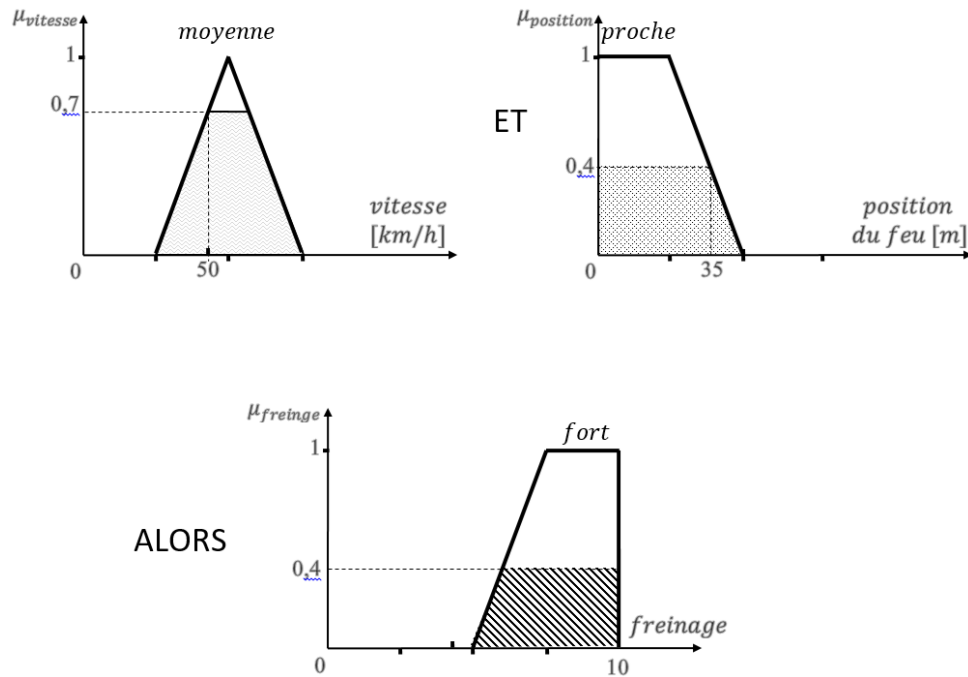


Figure 4.4: Exemple d'implication floue avec conjonction «ET» traduite par un « min »

Comme pour tous les opérateurs flous, le concepteur du système flou doit choisir parmi plusieurs définitions possibles de défuzzification. Nous allons présenter brièvement les deux principales méthodes de défuzzification à savoir la méthode moyenne des maxima et la méthode du centre de gravité.

En général, une base de règles floues est composée d'un ensemble de règles dont la prémisse est généralement formée d'une conjonction de propositions floues, alors que la combinaison de ces différentes règles se fait à l'aide de l'opérateur OU. Voici celui de notre exemple :

« ma vitesse » est « élevée »	OU	« la position du feu » est « proche »
« ma vitesse » est « élevée »	ET	« la position du feu » est « lointaine »
« ma vitesse » est « élevée »	ET	« la position du feu » est « proche »

Nous allons maintenant appliquer l'ensemble des 3 règles de notre matrice des décisions. Pour chacune des règles, nous obtenons une décision intermédiaire (à droite de la figure 4.5). Pour la règle utilisant l'opérateur OU (règles 1), nous utiliserons l'opération max. Pour les deux règles utilisant l'opérateur ET (règles 2 et 3), nous utiliserons l'opération min (cela correspond aux opérateurs de Zadeh). Nous voyons le résultat final en bas à droite sur la figure.

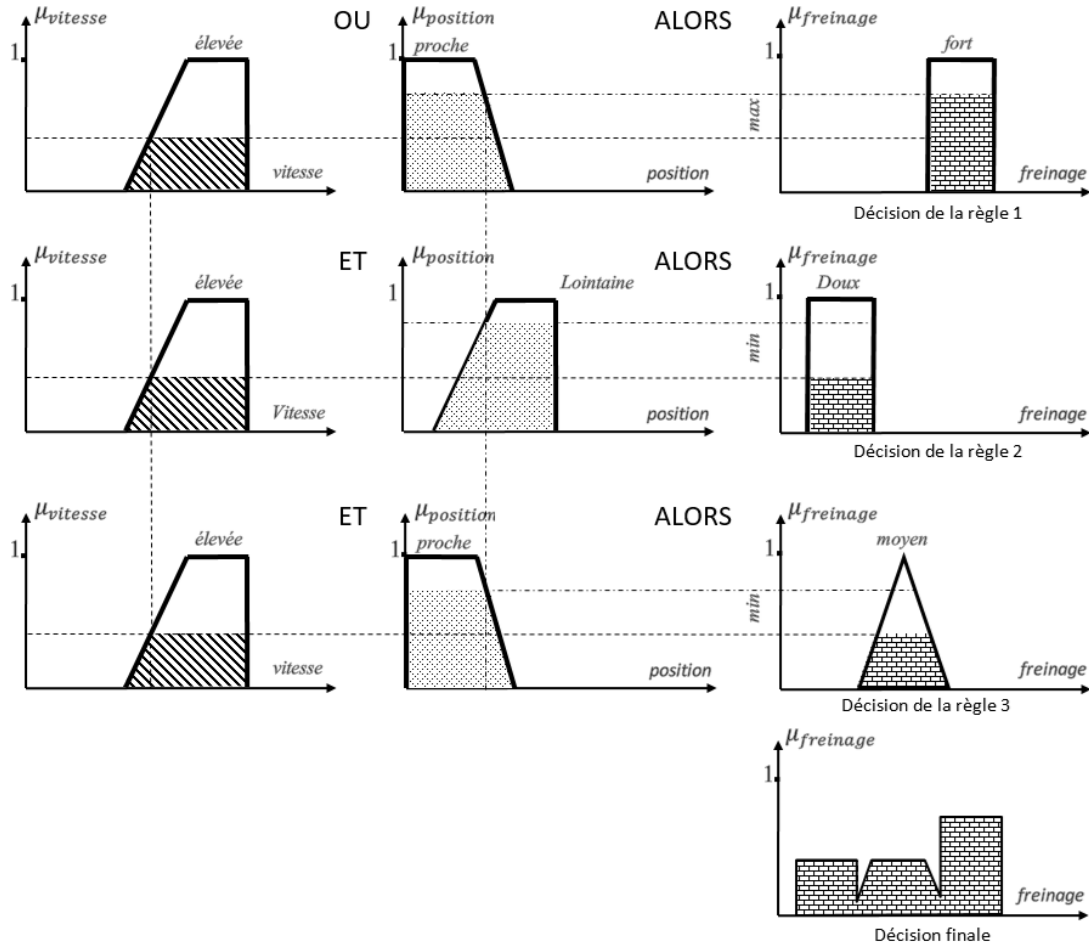


Figure 4.5: Exemple d'application de l'ensemble des 3 règles de notre exemple.

Comme nous le voyons, il ne nous reste plus qu'à prendre la décision finale, à savoir quelle valeur nous allons réellement donner à la variable « le freinage ». C'est cette étape finale, qui permet de passer de l'ensemble flou à une décision unique, s'appelle la défuzzification.

La défuzzification par « moyenne des maxima » définit la décision comme étant la moyenne des abscisses des maxima de l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions. Il s'écrit ainsi :

$$\text{Décision} = \frac{\int_S y dy}{\int_S dy}$$

Où $S = \{z \in \mathbb{R}, \mu(z) = \sup_{y \in \mathbb{R}}(\mu(y))\}$ Et \mathbb{R} est l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions intermédiaires.

Pour notre exemple, se définit graphiquement ainsi :

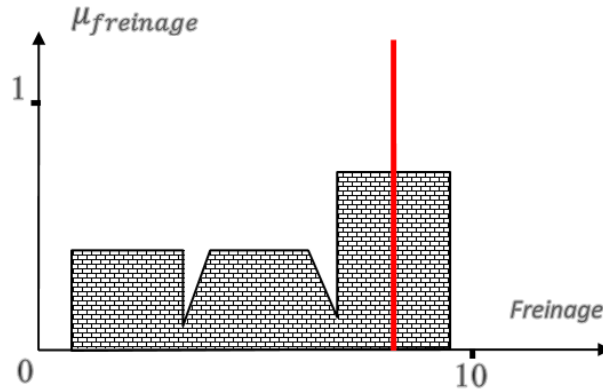


Figure 4.6: Défuzzification par «moyenne des maxima»

La défuzzification par « centre de gravité » est plus couramment utilisée [13, 14]. Elle définit la sortie comme l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance caractérisant l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions intermédiaires. Il s'écrit ainsi :

$$\text{Décision} = \frac{\int_S z \mu(z) dz}{\int_S \mu(z) dz}$$

Pour les systèmes discrets, il s'écrit :

$$\text{Décision} = \frac{\sum_i z_i \mu(z_i)}{\sum_i \mu(z_i)}$$

Où $S = \{z \in \mathbb{R}, \mu(z) = \sup_{y \in \mathbb{R}} (\mu(y))\}$ Et \mathbb{R} est l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions intermédiaires.

Pour notre exemple, cela se définit graphiquement ainsi :

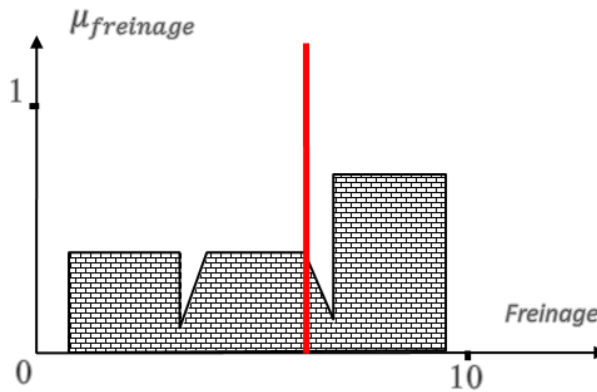


Figure 4.7: Défuzzification par «centre de gravité»

Cette définition de la défuzzification «centre de gravité» permet d'éviter les discontinuités qui pouvaient apparaître dans la défuzzification «moyenne des maxima», mais plus complexe et demande des calculs plus importants. Certains travaux cherchent à améliorer les performances en cherchant d'autres méthodes aussi efficaces mais avec une complexité algorithmique moindre. Comme nous le voyons sur les 2 figures montrant les méthodes de défuzzification appliquées à notre exemple, le choix d'une méthode a un effet important sur la décision finale.

4.3 Contrôleur floue

Les problèmes de réglage peuvent être résolus par la logique floue en conservant une structure proche de la structure des correcteurs classiques (PI par exemple). Seulement, le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie comme les régulateurs classiques ou par contre réaction d'état. Ils utilisent des inférences avec plusieurs règles qui doivent être traitées par des opérateurs de la logique floue. La structure du contrôleur flou est illustrée à la figure (4.8) [15].

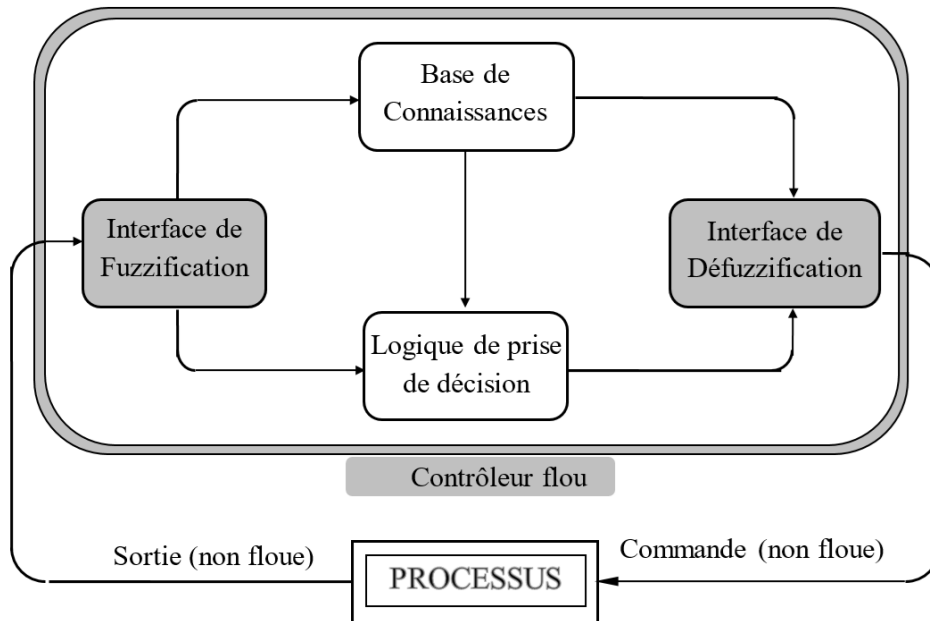


Figure 4.8: Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.

Muni des différents concepts de la théorie des ensembles flous, on peut concevoir les notions importantes des contrôleurs flous. Il est composé de quatre parties importantes :

- Une partie de fuzzification qui a pour rôle le traitement de données préliminaires des entrées (par exemple la formation de l'erreur de réglage et sa variation entre deux instants d'échantillonnage). Ensuite, ces données d'entrée seront converties en valeurs linguistiques convenables pouvant être vues comme des variables floues.
- La base de connaissances comprend une connaissance du domaine d'application et les buts de contrôle prévus.
- La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou. Elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférences en logique floue.
- La partie de défuzzification fournissant une action de contrôle (physique) à partir d'une action de contrôle floue. Selon une cartographie d'échelle, les univers de discours des variables floues seront convertis à des plages des variables de sortie appropriées.

4.3.1 Stratégie de fuzzification

Dans les problèmes de commande, les données mesurées sont habituellement physiques. Alors que le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous. La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier pour les variables d'entrée. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs d'entrées) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent alors être traitées par les inférences. La fuzzification s'articule autour des axes suivants:

- Un opérateur de fuzzification convertit une valeur numérique en un singleton flou à l'intérieur d'un certain univers de discours. Cette stratégie est largement utilisée dans les contrôleurs flous car elle est naturelle et facile à implémenter. Elle interprète une entrée x_o comme un ensemble flou A ayant une fonction d'appartenance $\mu_A(x_o)$ égale à zéro partout sauf au point x_o (égale à 1).
- Les grandeurs physiques sont souvent normalisées entre -1 et 1 par un facteur d'échelle qui doit être choisi sur la base de l'étude du système de sorte que, lors des petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour les grandeurs normalisées ne soit pas dépassé.
- On utilise souvent des fonctions d'appartenance trapézoïdales et triangulaires pour les variables linguistiques d'entrées. On associe à chaque variable d'entrée x_i un univers de discours décomposé en un nombre limité de fonctions d'appartenance.
- Une subdivision plus fine, c'est-à-dire plus de sept ensembles flous associés pour les variables d'entrée, n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du réglage par logique floue [Bühler 94].

4.3.2 Base de données

Les concepts associés à la base de données sont utilisés pour caractériser les règles de contrôle flou et la manipulation des données floues. Ces concepts sont subjectivement définis et basés sur l'expérience et le jugement de l'ingénieur. Dans cet ordre d'idée, il peut être noté que le choix correct des fonctions d'appartenance d'un ensemble de termes joue un rôle essentiel dans la réussite d'une application. On va donc chercher à déterminer les phases importantes de construction d'une base de données dans un contrôleur flou.

- **Base de règles**

Un système flou est caractérisé par un ensemble d'expressions linguistiques (règles) basées sur une connaissance d'expert. Cette connaissance est habituellement représentée sous forme de règles "Si - Alors" simples à implémenter. La collection de ces règles forme ce qu'on appelle une matrice d'inférence.

La plupart des contrôleurs flous multi-entrées et mono-sortie utilisent des règles d'évaluation d'état de la forme [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Règle N}^\circ 1: \text{ Si } x_1 \text{ est } A_{11} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{21} \text{ et } \dots \text{ et } x_m \text{ est } A_{m1} \text{ Alors } y \text{ est } C_1 \\ \text{Règle N}^\circ 2: \text{ Si } x_1 \text{ est } A_{12} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{22} \text{ et } \dots \text{ et } x_m \text{ est } A_{m2} \text{ Alors } y \text{ est } C_2 \\ \text{Règle N}^\circ 3: \text{ Si } x_1 \text{ est } A_{11} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{21} \text{ et } \dots \text{ et } x_m \text{ est } A_{m2} \text{ Alors } y \text{ est } C_3 \\ \vdots \\ \text{Règle N}^\circ n: \text{ Si } x_1 \text{ est } A_{1n} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{2n} \text{ et } \dots \text{ et } x_m \text{ est } A_{mn} \text{ Alors } y \text{ est } C_n \end{array} \right.$$

Où : x_1, \dots, x_m sont des variables linguistiques représentant les variables d'entrées, y est la variable linguistique représentant la variable de sortie, A_{ij} et C_i sont des valeurs linguistiques des variables linguistiques x_1, \dots, x_m et y dans respectivement les univers de discours U_1, \dots, U_n et W .

Par souci de simplicité, on se limite à présenter un contrôleur à deux entrées et une seule sortie. Pour un tel contrôleur, on peut représenter les règles de contrôle flou par un tableau. Chacune de ses cases représente la conclusion d'une règle dont la prémisse est la conjonction d'une proposition floue de la première entrée x_1 sur la colonne et une proposition floue de la deuxième entrée x_2 sur la ligne.

Table 4.1: Matrice d'inférence pour le cas de deux entrées et une seule sortie

		x_2		
		A_{21}	A_{22}	A_{2n}
x_1	A_{11}	C_1	C_3	\dots
	A_{12}	C_2	\dots	\dots
	\dots	\dots	\dots	\dots
	A_{1n}	\dots	\dots	C_n

• **Justification des règles de contrôle flou**

D'une manière générale, l'écriture des règles d'un contrôleur flou fait appel à l'expertise et l'expérience des opérateurs humains. Dans le cadre de la régulation (asservissement), on utilise fréquemment comme entrées du contrôleur flou l'erreur et la variation de l'erreur. A partir de ces deux mesures traduites sous la forme de variables floues, il est possible de déterminer les règles dans le domaine temporel.

Pour cela, l'univers de discours des variables d'entrée et de sortie du contrôleur est divisé en cinq ensembles flous à savoir «NG» (négatif grand), «NM» (négatif moyen), «EZ» (environ zéro), «PM» (positif moyen) et «PG» (positif grand). Cependant les fonctions d'appartenance sont choisies triangulaires pour «NM», «EZ» et «PM» alors que pour «NG» et «PG» sont choisies trapézoïdales (figure 4.9).

L'analyse temporelle d'une réponse d'un système du deuxième ordre doit conduire à un jeu de règles du contrôleur flou. Pour expliquer la procédure à suivre, on considère les neuf points indiqués sur la réponse à un échelon et pour chacun de ces points, on explicite l'expertise sous la forme suivante [7]:

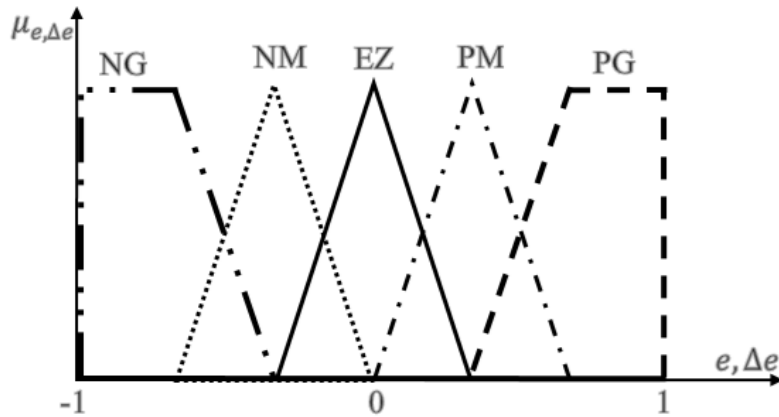


Figure 4.9: Fonctions d'appartenance de l'erreur et la variation de l'erreur

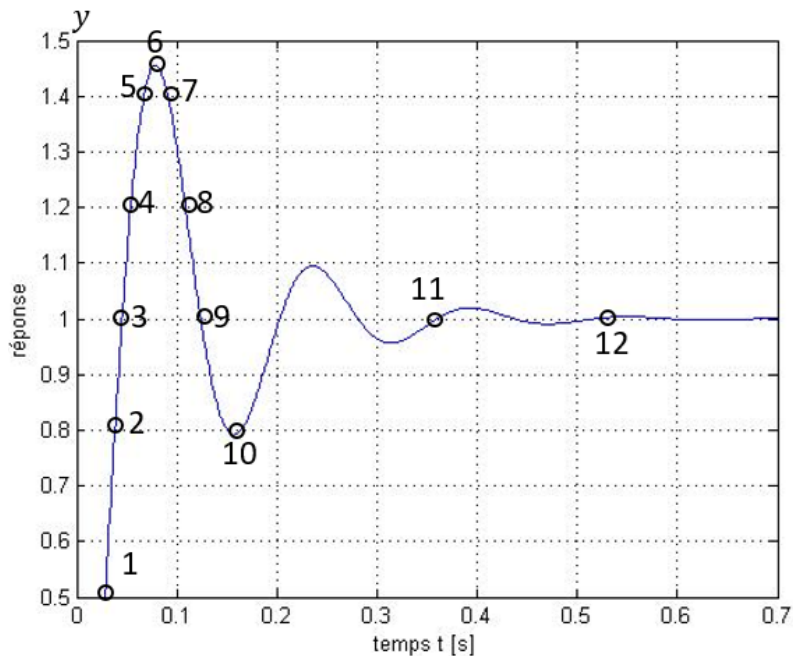


Figure 4.10: Localisation des points critiques pour la déduction des règles

Au départ point 1, l'erreur $e = y^* - y$ est PG et la variation de l'erreur (c'est la variation de y avec signe négatif) est NG, alors la variation de la commande (décision) est EZ.

Au point 2, l'erreur est PM et la variation de l'erreur est NG, alors la variation de la commande est NM.

Au point 3, l'erreur est EZ et la variation de l'erreur est NG, alors la variation de la commande est NM.

Au point 4, l'erreur est NM et la variation de l'erreur est NG, alors la variation de la commande est NG.

Au point 5, l'erreur est NG et la variation de l'erreur est NM, alors la variation de la commande est NG.

Au point 6, l'erreur est NG et la variation de l'erreur est EZ, alors la variation de la commande est NM.

Au point 7, l'erreur est NG et la variation de l'erreur est PM, alors la variation de la commande est NM.

Au point 8, l'erreur est NM et la variation de l'erreur est PM, alors la variation de la commande est EZ.

Au point 9, l'erreur est EZ et la variation de l'erreur est PM, alors la variation de la commande est PM.

Au point 10, l'erreur est PM et la variation de l'erreur est EZ, alors la variation de la commande est PM.

Au point 11, l'erreur est EZ et la variation de l'erreur est NM, alors la variation de la commande est NM.

Au point 12, l'erreur est EZ et la variation de l'erreur est EZ, alors la variation de la commande est EZ. C'est la convergence vers le point d'équilibre.

Ces décisions peuvent être récapitulées dans un tableau comme suit :

Table 4.2: Récapitulation des décisions de 1 à 12

		Δe				
		NG	NM	EZ	PM	PG
e	NG		NG ●	NM●	NM ●	
	NM	NG ●			EZ ●	
	EZ	NM ●	NM ●	●EZ	PM ●	
	PM	NM ●		PM ●		
	PG	●EZ				

En décrivant point par point tous le comportement du processus et l'action de variation de la commande à appliquer, on en déduit la table de base du contrôle flou (Matrice d'inférence) qui correspond en fait à la table de règles très connue de Mac Vicar-Whelan:

- **Contrôleur de type Mamdani**

Dans ce mode de raisonnement, l'opérateur OU est traduit par la relation maximum et l'opérateur ET est traduit par la relation minimum. L'implication est aussi traduite par la relation minimum. Le degré de vérité de la conclusion de la $i^{\text{ème}}$ règle :

$$\mu_{R_i} = \min(\alpha_i, \mu_{C_i}(y)) \quad (4.1)$$

Avec

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_i}(x_o), \mu_{B_i}(x_o)) \quad (4.2)$$

Et pour la conclusion finale de toutes les règles :

$$\mu_{\text{finale}}(y) = \max(\mu_{R_i}, i = 1, \dots, n) \quad (4.3)$$

- **Contrôleur de type Larsen**

Dans ce mode de raisonnement, l'opérateur OU est traduit par la relation maximum et l'opérateur ET est traduit par la relation produit. Alors que l'implication est traduite par la relation produit. Le degré de vérité de la conclusion de la $i^{\text{ème}}$ règle:

$$\mu_{R_i} = \alpha_i \times \mu_{C_i}(y)$$

Avec

$$\alpha_i = (\mu_{A_i}(x_o) \times \mu_{B_i}(x_o))$$

Et pour la conclusion finale de toutes les règles est la même que celle de Mamdani :

$$\mu_{\text{finale}}(y) = \max(\mu_{R_i}, i = 1, \dots, n)$$

- **Contrôleur de type Zadeh**

Dans ce mode de raisonnement, l'opérateur OU est traduit par la relation somme (plus précisément la valeur moyenne) et l'opérateur ET est traduit par la relation produit. L'implication est aussi traduite par la relation produit. Le degré de vérité de la conclusion de la $i^{\text{ème}}$ règle :

$$\mu_{R_i} = \alpha_i \times \mu_{C_i}(y)$$

Avec

$$\alpha_i = \mu_{A_i}(x_o) \times \mu_{B_i}(x_o)$$

Et pour la conclusion finale de toutes les règles :

$$\mu_{\text{finale}}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{R_i}$$

- **Contrôleur de Sugeno**

Dans ce mode de raisonnement, l'opérateur ET est traduit par la relation minimum. La conclusion de chaque règle a une forme polynomiale. La conclusion finale de toutes les règles est la moyenne pondérée des conclusions de chaque règle.

4.4 Défuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire. Le moteur d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultante $\mu_{R_i}(y)$. Il s'agit donc d'extraire de cette dernière un signal de commande u pour commander le processus. Parmi plusieurs stratégies de défuzzification qui existent, on cite brièvement [7]:

- Méthode du maximum : Dans cette méthode, on attribue, à la commande u , l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance de la conclusion finale. Cette méthode présente un inconvénient lorsqu'il y a plusieurs abscisses pour lesquelles la fonction $\mu_{\text{finale}}(y)$ est maximale.
- Méthode de la moyenne des maxima : Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne des abscisses des maximums de la fonction d'appartenance de la conclusion finale.
- Méthode du centre de gravité : Cette méthode consiste à calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la conclusion finale. Cette méthode présente un inconvénient que l'envergure de calcul est très importante surtout pour l'exécution en temps réel.
- Méthode des hauteurs pondérées : Cette méthode n'est qu'un cas particulier de la méthode du centre de gravité. C'est le cas où les fonctions d'appartenance de la sortie sont choisies de formes rectangulaires de largeurs étroites. Ceci simplifie énormément le temps de calcul du centre de gravité.

4.5 Conclusion

La logique floue et les contrôleurs flous ont émergé comme des outils puissants et polyvalents pour la modélisation, le contrôle et la prise de décision dans des systèmes complexes et incertains. Leur capacité à traiter des informations imprécises et à s'adapter à des environnements dynamiques les rend particulièrement adaptés à des situations où les approches traditionnelles basées sur des modèles mathématiques précis sont difficiles ou impossibles à mettre en œuvre. Un domaine d'application particulièrement pertinent de la logique floue est le contrôle des systèmes de pompage solaire au fil du soleil.

Ces systèmes, qui utilisent l'énergie solaire pour alimenter des pompes à eau, sont souvent confrontés à des conditions d'ensoleillement variables et à des changements de demande en eau, ce qui rend le contrôle précis et efficace un défi.

Chapitre 5

Résultats et discussions

Nous avons exploré deux modèles de contrôleur flou pour la commande de notre système de pompage solaire : l'une que nous avons développée sous MATLAB qu'on appelé correcteur fuzzy 1, et l'autre qui est un bloc prêt à l'emploi de MATLAB appelé correcteur Fuzzy 2. L'objectif principal de cette étude est de comparer les performances de ces deux stratégies de contrôle puis les comparer à la commande VFD scalaire, et d'évaluer leur efficacité dans différentes conditions d'exploitation.

Afin d'évaluer plus précisément les capacités de la logique floue dans le contrôle du débit de la pompe, nous avons substitué le correcteur PI de la figure (3.8) par un correcteur flou comme indiqué sur la figure (5.1).

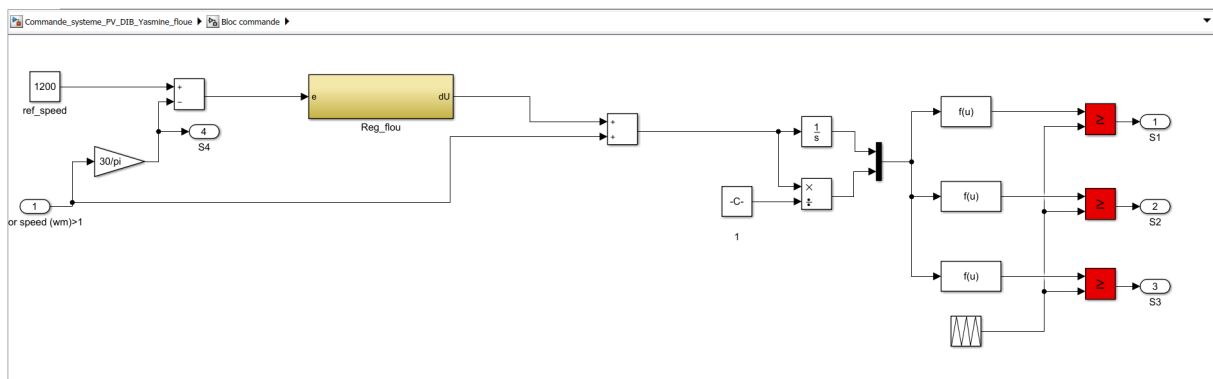


Figure 5.1: Circuit de commande floue.

L'univers de discours de chaque variable d'entrée est défini sur l'intervalle $[-1, 1]$ et est subdivisé en cinq ensembles flous : négatif grand, négatif moyen, environ zéro, positif moyen et positif grand. Le nombre d'ensembles flous dépend de la qualité du réglage désirée. Une subdivision de l'univers en plus de sept ensembles n'apporte généralement aucune amélioration notable à la qualité du réglage.

En revanche, cela complexifie la formulation de la matrice d'inférence et augmente considérablement le temps de calcul de la sortie. Les fonctions d'appartenance de chaque ensemble flou sont choisies trapézoïdales et triangulaires symétriques, comme illustré à la figure (5.2).

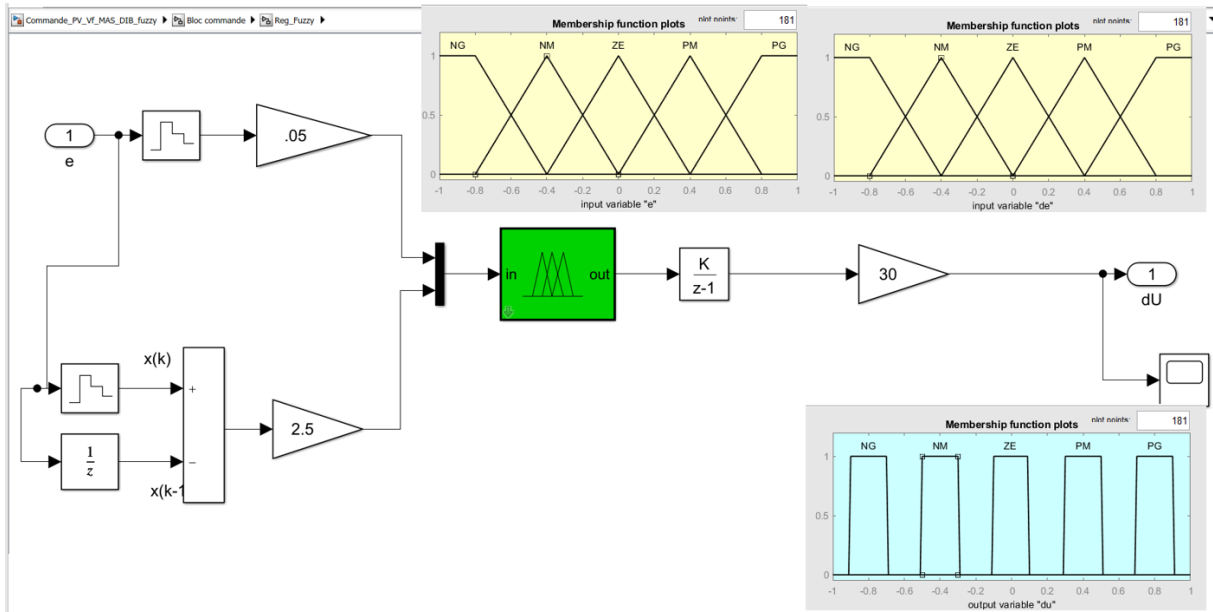


Figure 5.2: Modèle conceptuel du correcteur fuzzy2.

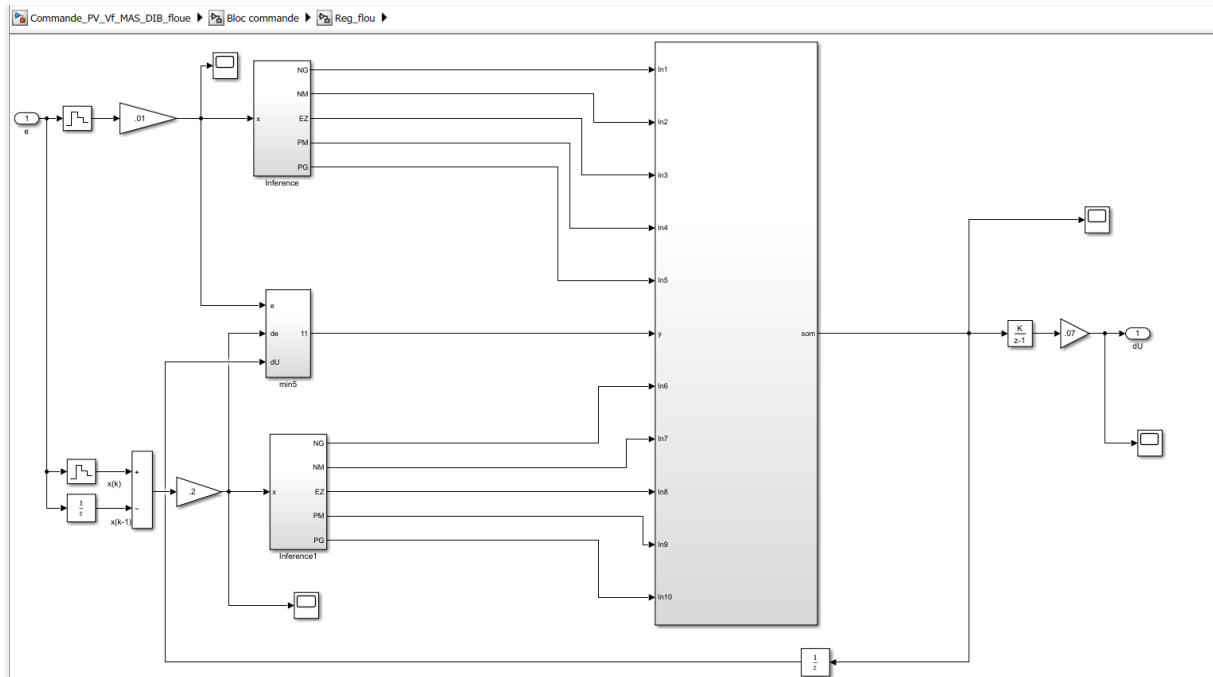


Figure 5.3: Modèle conceptuel du correcteur fuzzy1.

L'établissement des règles d'inférence définissant la sortie découle d'une expertise de fonctionnement. Pour notre application, nous avons utilisé la base de règles de Mac-Vicar Whelan discutée précédemment, qui offre de très bonnes performances dans le domaine des entraînements réglés. La méthode d'inférence utilisée pour ce contrôleur flou est celle de Mamdani, du fait qu'elle est facile à implémenter et présente de bonnes performances dynamiques et une bonne robustesse.

Le bloc de défuzzification convertit la fonction d'appartenance de la sortie floue \tilde{y} en une grandeur normalisée Δu^* qui représente la variation de la commande. L'univers de discours de la variable de sortie est également défini sur l'intervalle $[-1, 1]$ et subdivisé en cinq ensembles flous, exactement comme les variables d'entrée. Pour une réduction significative du calcul nécessaire, nous utilisons la méthode de défuzzification par hauteurs pondérées. Ainsi, les fonctions d'appartenance de chaque ensemble flou de sortie sont rectangulaires et sans chevauchement, comme illustré dans la figure (5.2).

Dans le but d'examiner en détail le comportement des différents composants de notre système de pompage solaire, nous avons effectué des simulations du modèle présenté dans la figure (5.1) pour les deux configurations de contrôleurs flous.

Les résultats de simulation ont également été comparés à ceux obtenus avec un régulateur classique (PI). L'utilisation des mêmes rapports de normalisation pour les deux contrôleurs flous n'a pas permis d'obtenir des performances optimales pour les deux contrôleurs flous. Les rapports de normalisation qui fonctionnaient efficacement pour un contrôleur ont entraîné des performances médiocres pour l'autre. Il a été nécessaire de rechercher de rapports de normalisation spécifiques à chaque contrôleur.

Cette démarche a permis d'identifier des rapports de normalisation différents donnant des performances intéressantes pour les deux contrôleurs.

La figure (5.4) montre la réponse en vitesse du système contrôlé par un correcteur fuzzy1. On observe une convergence rapide de la vitesse vers la consigne de référence, avec des oscillations minimales. Cela indique une bonne performance du correcteur flou en termes de précision et de stabilité.

La figure (5.4) présente la réponse en vitesse du système contrôlé par un correcteur fuzzy2. On remarque une convergence légèrement plus rapide que dans le cas du correcteur fuzzy1, et avec des oscillations encore plus faibles. Cela suggère que le correcteur fuzzy2 offre une meilleure qualité de régulation en termes de réduction des oscillations.

La figure (5.5) compare les réponses en vitesse du système contrôlé par les trois types de régulateurs (PI, fuzzy1 et fuzzy2). On observe que :

- Le correcteur fuzzy1 et le correcteur fuzzy2 ont des performances similaires en termes de précision et de stabilité, avec une convergence rapide vers la consigne et des oscillations minimales.
- Le correcteur PI présente une convergence plus lente et un dépassement plus important que les correcteurs fuzzy1 et fuzzy2.

La figure (5.6) montre l'évolution du débit pour les trois types de régulateurs. On constate que :

- Le débit est relié directement à la vitesse, suit la consigne de référence de manière satisfaisante pour les trois régulateurs.
- Le correcteur fuzzy1 et le correcteur fuzzy2 présentent un comportement légèrement plus lisse que le correcteur PI, avec des variations de débit moins abruptes.

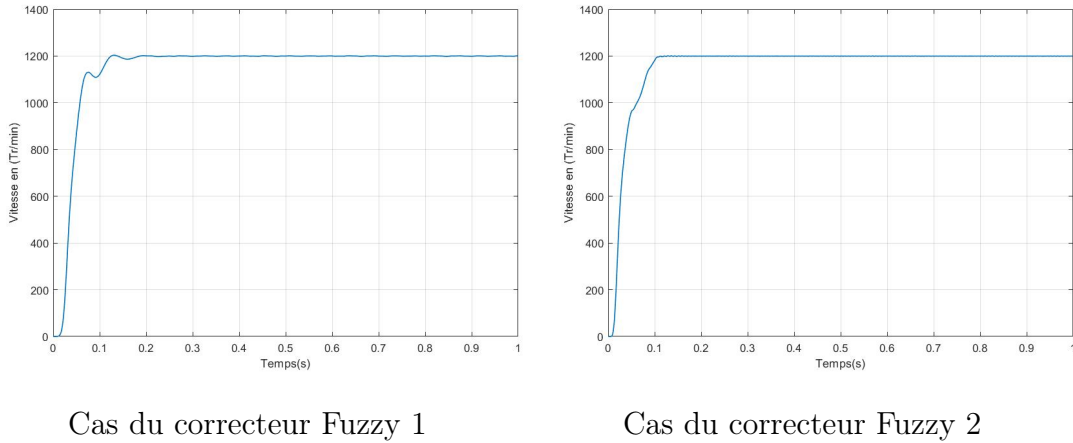


Figure 5.4: L'évolution de la vitesse sous la commande par la logique floue

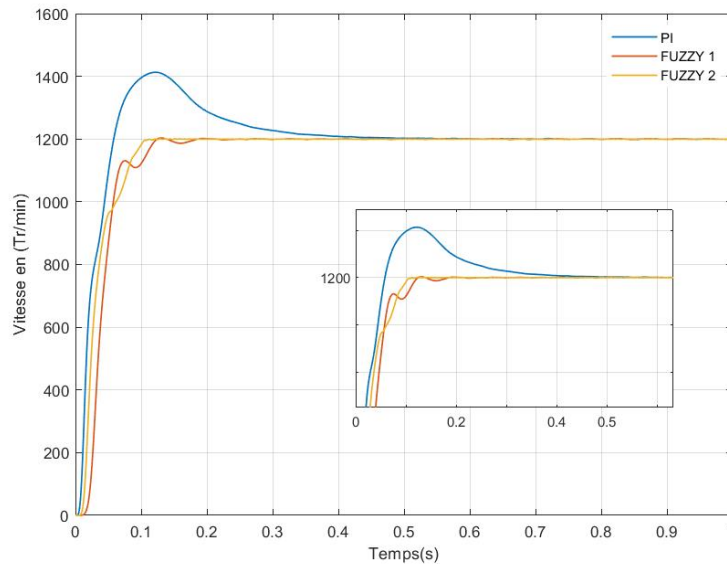


Figure 5.5: Superposition des réponses en vitesse avec les régulateurs PI, fuzzy 1, et fuzzy 2.

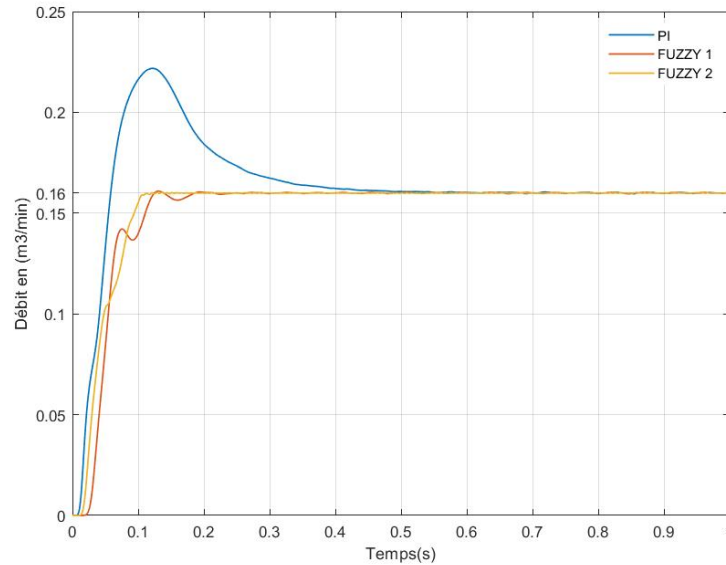


Figure 5.6: Superposition des réponses du débit avec les régulateurs PI, fuzzy1, et fuzzy2.

5.1 Adaptation de la commande aux conditions variables

5.1.1 Influence de l'irradiation

La puissance délivrée par le générateur PV varie pour des différents niveaux de l'irradiation à température constante à cause des variations du courant du module photovoltaïque.

Malgré que l'algorithme de suivie du MPPT, le groupe moto-pompe détient uniquement la puissance électrique nécessaire pour satisfaire le les besoins en puissance hydraulique. Le champ des panneaux photovoltaïque est dimensionné selon la puissance hydraulique maximale et les conditions photovoltaïque les moins favorable.

Les analyses effectuées sur les figures (5.7 et 5.8) révèlent un comportement remarquablement stable de la vitesse de rotation du moto-pompe et du débit d'eau pompé, indépendamment des variations de l'irradiation solaire. Cette observation s'applique aux deux contrôleurs flous étudiés, soulignant leur efficacité dans le maintien de performances stables face aux perturbations externes.

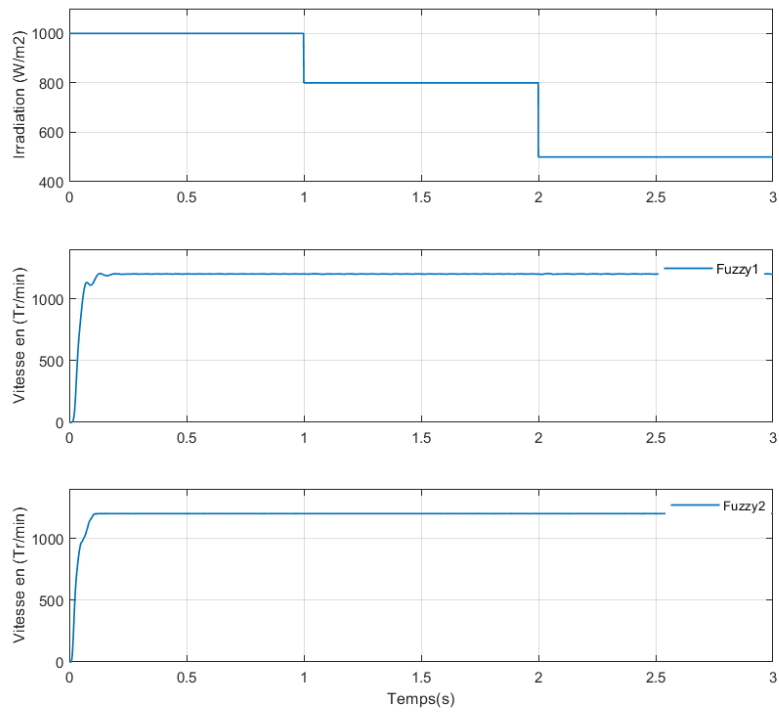


Figure 5.7: Réponse de la vitesse face aux variations brusques de l'intensité d'irradiation

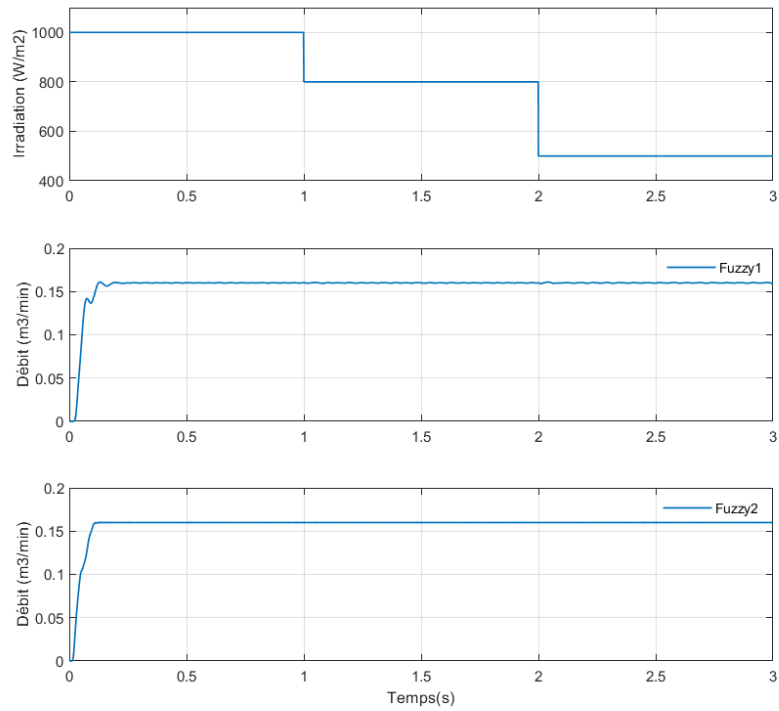


Figure 5.8: Réponse du débit face aux variations brusques de l'intensité d'irradiation

5.1.2 Influence de la température

Les panneaux solaires subissent une diminution d'efficacité avec l'augmentation de la température, réduisant la tension en circuit ouvert et la puissance maximale disponible. En contrepartie, une baisse de température améliore leur efficacité, augmentant ainsi la production d'énergie.

Les contrôleurs fuzzy1/fuzzy2, capable de gérer les systèmes non-linéaires, offrent une stabilité accrue et des performances constantes sur une large gamme de températures, effectivement on remarque que la vitesse est toujours contrôlée même avec le changement de la température et puisque le débit est lié directement à la vitesse donc ce dernier aussi reste dans le niveau souhaité(figure 5.9 et 5.10).

Seulement, il est remarquable de légères fluctuations du correcteur fuzzy1 lors du changement brusque de la température ce qui n'est pas le cas en pratique. Ceci n'affecte pas les performance du système de pompage mais montre que l'autre correcteur est plus robuste vis-à-vis ce type de changement.

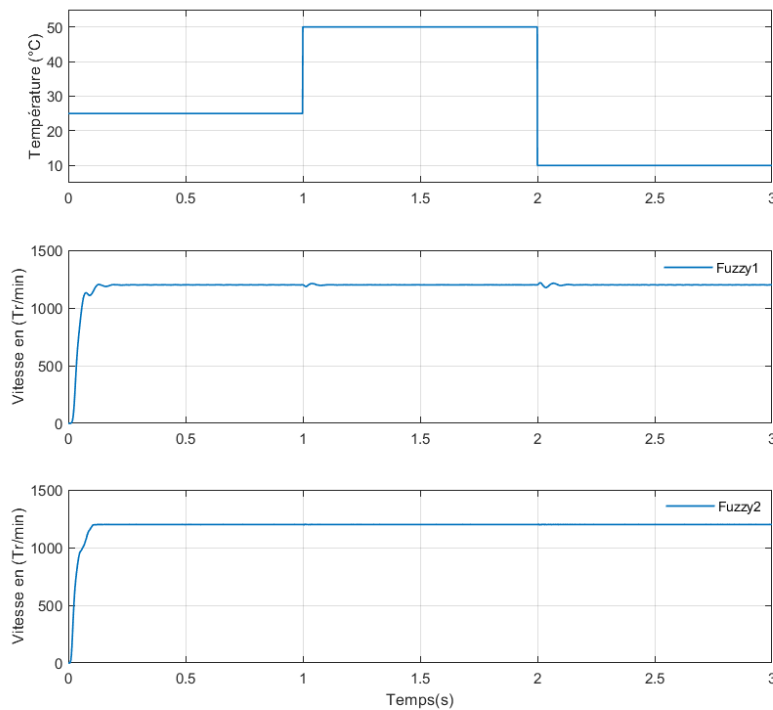


Figure 5.9: Réponse de la vitesse face aux variations brusques de la température

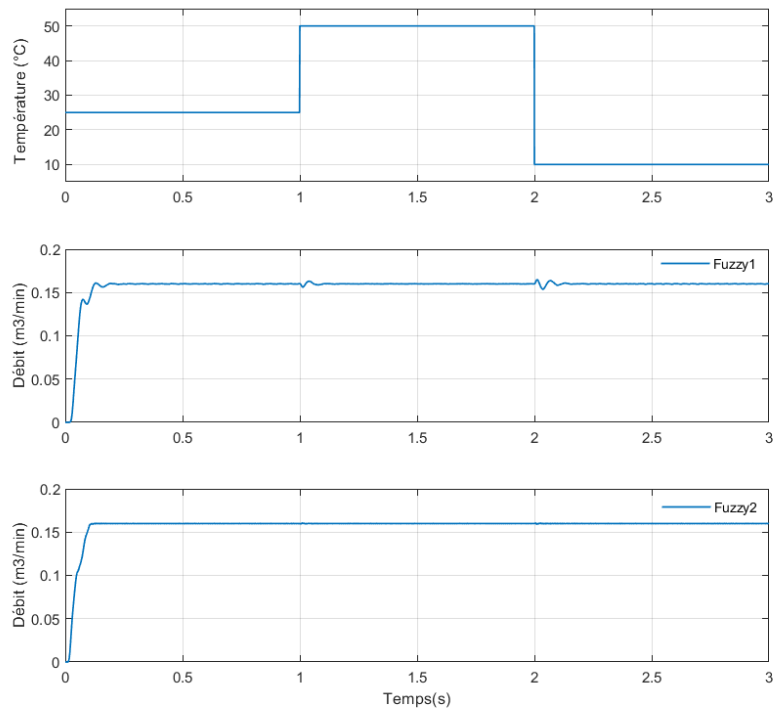


Figure 5.10: Réponse du débit face aux variations brusques de la température

5.1.3 Tests de robustesse

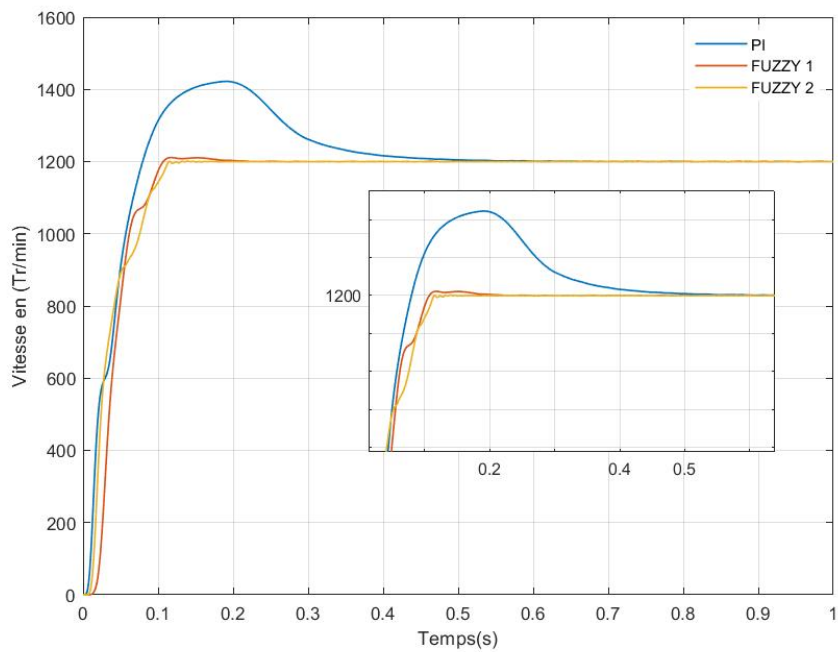


Figure 5.11: Réponse de la vitesse suite à une augmentation de l'inertie de 40% du système

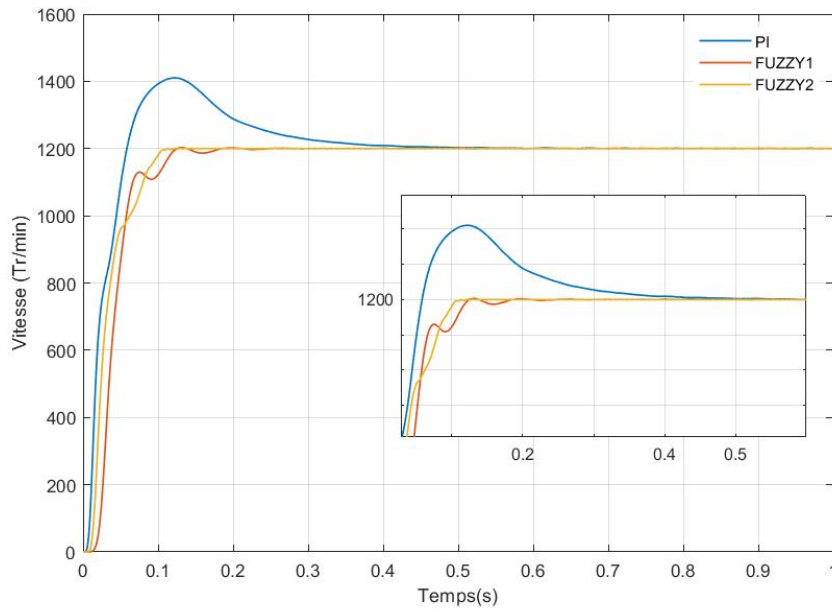


Figure 5.12: Réponse de la vitesse suite à une augmentation du frottement de 40% du système

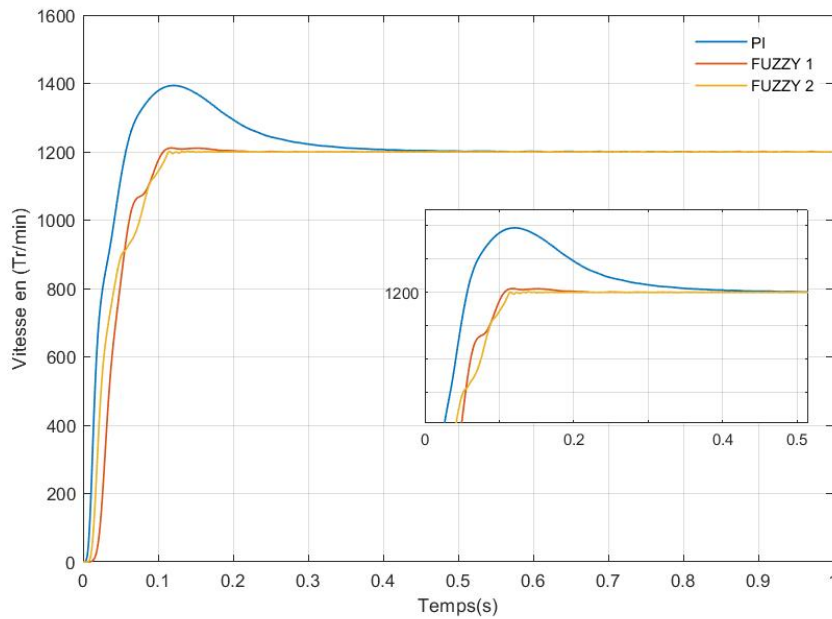


Figure 5.13: Réponse de la vitesse suite à une augmentation de la résistance rotorique R_r

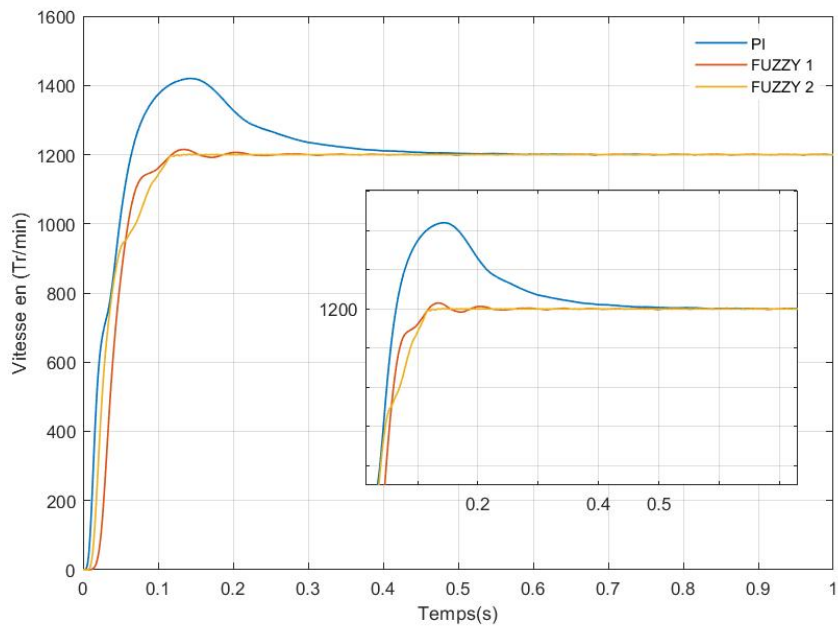


Figure 5.14: Réponse de la vitesse suite à une augmentation de la résistance statorique R_s

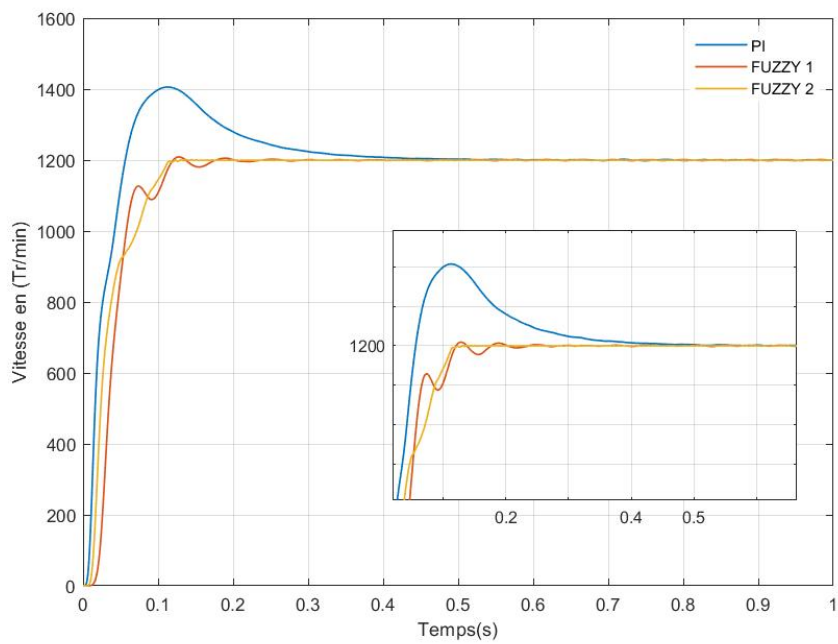


Figure 5.15: Réponse de la vitesse suite à une diminution de l'inductance rotorique L_r

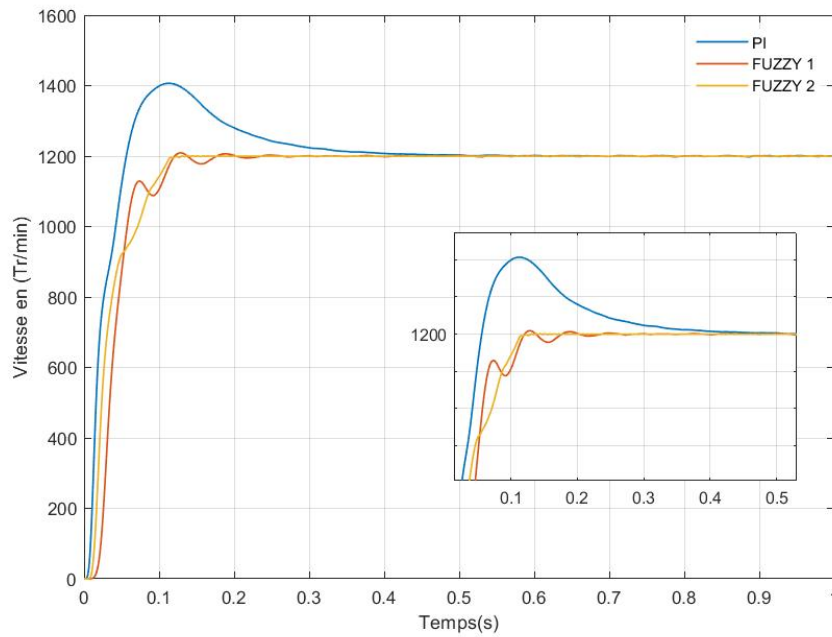


Figure 5.16: Réponse de la vitesse suite à une diminution de l'inductance statorique L_s)

Hypothèse	Interprétation
Variation paramétrique de l'inertie J	La présence d'une inertie plus importante ralentit la réponse du moteur aux commandes. Le contrôleur PI, étant un régulateur linéaire simple, peut être plus sensible à ce changement de dynamique et cela peut être traduit par un temps de dépassement plus long (figure 5.11), et une erreur résiduelle plus importante. Le contrôleur PI, en raison de sa nature intégrative, peut être capable de compenser partiellement cet effet en réduisant l'erreur résiduelle, mais cela peut se faire au détriment de la stabilité. Contrairement aux contrôleurs flou (FUZZY1)/fuzzy (FUZZY2) qui ne sont pas affectés par ces changements.
variation paramétrique du coefficient de frottement f	Le frottement, quant à lui, peut affecter le temps de réponse dans le comportement du moteur, ce qui peut également compliquer la tâche du contrôleur. Le contrôleur flou, avec sa capacité à traiter des systèmes non-linéaires, est mieux adapté pour gérer cette situation (figure 5.12).

Augmentation de la résistance rotorique et statorique	Impact sur le couple et la vitesse : Une augmentation de la résistance rotorique et statorique entraîne une augmentation du couple et une réduction de la vitesse du moteur. Cela est dû à l'augmentation des pertes joules dans les enroulements du stator et du rotor, ce qui dissipe davantage d'énergie sous forme de chaleur. Impact sur la stabilité : L'augmentation des résistances peut également affecter la stabilité du système de commande. Le contrôleur, qu'il soit PI ou flou (figure 5.13 et 5.14), peut avoir plus de mal à maintenir la vitesse et le couple souhaités du moteur.
Diminution de l'inductance rotorique et statorique	L'effet de saturation, est un phénomène non linéaire qui se produit lorsque le flux magnétique dans le moteur atteint une valeur élevée. Cette saturation entraîne une diminution de l'inductance, ce qui affecte les performances du moteur de plusieurs façons: Le couple produit par le moteur diminue avec la saturation car la force magnétomotrice diminue. Le courant absorbé par le moteur augmente pour maintenir le flux magnétique souhaité, ce qui peut entraîner une surchauffe et une diminution du rendement. Le facteur de puissance du moteur se dégrade en raison de l'augmentation du courant réactif. La relation entre le couple, la vitesse et le courant devient non linéaire, ce qui complique la commande du moteur. Le contrôleur PI, en tant que régulateur linéaire simple, est sensible aux non-linéarités introduites par la saturation. Le contrôleur flou, avec sa capacité à traiter les systèmes non-linéaires et à s'adapter aux variations des paramètres, est plus robuste face à l'effet de saturation. Il offre de meilleures performances sur une large plage de fonctionnement du moteur (figure 5.15 et 5.16).

5.2 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné l'adaptation de la commande des systèmes photovoltaïques (PV) aux conditions variables, en particulier l'influence de l'irradiation, de la température, et la robustesse face à diverses variations paramétriques. Voici les points essentiels :

- **Influence de l'Irradiation:** Les figures (5.7 et 5.8) montrent que les deux contrôleurs flous assurent des performances stables malgré les variations d'irradiation, prouvant leur efficacité dans des conditions externes changeantes.
- **Influence de la Température:** Les contrôleurs flous gèrent efficacement les variations de température, maintenant une vitesse et un débit constants (figures 5.9 et 5.10). Bien que le contrôleur fuzzy1 présente de légères fluctuations lors des changements brusques de température, cela n'affecte pas significativement les performances du système de pompe, contrairement au contrôleur fuzzy2 qui se montre plus robuste.

- **Influence des variations paramétriques:**

1. Inertie (J) : Une inertie plus élevée ralentit la réponse du moteur, ce qui peut affecter la stabilité du système. Le régulateur PI est plus sensible à ces variations, nécessitant des ajustements pour maintenir la stabilité, tandis que les contrôleurs flous ne sont pas affectés de manière significative.
2. Coefficient de Frottement (f) : Les changements dans le coefficient de frottement affectent le temps de réponse du moteur. Les contrôleurs flous, grâce à leur capacité à gérer des systèmes non-linéaires, s'adaptent mieux à ces variations.
3. Résistances Rotorique et Statorique : L'augmentation de ces résistances réduit la vitesse du moteur et augmente les pertes joules. Les contrôleurs flous montrent une meilleure capacité à maintenir la stabilité et les performances du moteur comparé au régulateur PI.
4. Inductance Rotorique et Statorique : La saturation magnétique entraîne une diminution de l'inductance, affectant le couple et la performance du moteur. Les contrôleurs flous gèrent mieux ces non-linéarités, offrant des performances supérieures sur une large plage de fonctionnement du moteur.

La comparaison entre les performances du système de pompage contrôlé par les deux contrôleurs flous révèle des différences de comportement notables, bien que les mêmes règles floues et les mêmes fonctions d'appartenance aient été utilisées dans les deux cas. L'analyse approfondie a permis d'identifier deux facteurs principaux contribuant à ces différences :

1. Différences dans les rapports de normalisation : L'utilisation de rapports de normalisation distincts pour les fonctions d'appartenance dans les deux contrôleurs flous a entraîné des interprétations différentes des entrées et des sorties floues, conduisant à des comportements de contrôle distincts.
2. Différences dans le calcul de la sortie : Étant donné que le bloc flou de MATLAB est une "boîte noire", il est possible que ses mécanismes internes de calcul de la sortie diffèrent de ceux du contrôleur flou personnalisé. Cela pourrait expliquer des écarts supplémentaires dans les décisions de contrôle et les performances du système.

L'impact combiné de ces deux facteurs peut expliquer les différences observées dans le comportement du système de pompage. Il est important de noter qu'il est difficile de quantifier précisément la contribution de chaque facteur sans une analyse plus approfondie des mécanismes internes du bloc flou de MATLAB.

En conclusion, l'étude démontre que les contrôleurs flous sont plus efficaces pour gérer les variations de conditions et les non-linéarités inhérentes aux systèmes PV, assurant ainsi une meilleure stabilité et des performances optimales comparées aux contrôleurs PI.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons exploré en profondeur les principes fondamentaux de la commande par logique floue et son application spécifique dans le domaine du pompage photovoltaïque au fil du soleil. Nous avons détaillé les différentes étapes de cette approche, à savoir la fuzzification, la base de connaissances, la logique de prise de décision et la défuzzification. Chacune de ces étapes joue un rôle important pour produire une commande efficace et parfaitement adaptée aux besoins spécifiques du système.

Ce type de commande permet de prendre en compte les imperfections et les incertitudes inhérentes aux données, ce qui en fait une technique particulièrement adaptée aux systèmes de commande nécessitant une grande flexibilité et une capacité à gérer des situations imprévisibles.

L'application de la commande par logique floue a été démontrée en utilisant deux approches de contrôle flou pour ce système de pompage solaire : l'une que nous avons développée sous MATLAB, appelée correcteur Fuzzy1, et l'autre qui est un bloc prêt à l'emploi de MATLAB nommé correcteur Fuzzy2. Ces deux stratégies de contrôle ont été évaluées pour leur efficacité dans la commande de la vitesse de la machine asynchrone, influençant ainsi le débit de la pompe. Cette approche double permet d'adapter dynamiquement le système aux conditions variables de fonctionnement.

En premier lieu, nous avons présenté les principes de base de la commande scalaire V/f constant. Cette technique, relativement simple, consiste à maintenir un rapport constant entre la tension et la fréquence appliquée au moteur asynchrone pour assurer une performance stable et efficace. Mais en introduisant des changements de paramètres du moteur cette méthode reste limitée et ses résultats sont moins satisfaisants par rapport aux résultats de la commande floue.

L'introduction de la logique floue pour améliorer les performances du système de pompage. En plus de minimiser les oscillations du régulateur, la logique floue a rendu notre système presque insensible aux perturbations et aux variations paramétriques.

La capacité des contrôleurs flous à maintenir une vitesse de rotation et un débit d'eau pompés constants malgré les fluctuations de l'irradiation solaire démontre leur robustesse face aux changements environnementaux. Cette caractéristique est particulièrement importante dans les applications pratiques où les conditions d'ensoleillement peuvent varier de manière significative.

La stabilité observée de la vitesse de rotation et du débit d'eau pompé constitue une preuve tangible de l'efficacité des contrôleurs flous mis en œuvre. Leur capacité à maintenir des performances stables face aux perturbations externes démontre leur aptitude à piloter le système de pompage de manière fiable et précise.

Les résultats obtenus montrent que la commande par logique floue est une approche prometteuse pour améliorer la performance et la fiabilité des systèmes de commande. Par conséquent, nous recommandons cette méthode pour les applications où la flexibilité et la capacité à gérer les incertitudes sont essentielles. La logique floue permet une adaptation dynamique aux changements des conditions de fonctionnement, offrant ainsi une meilleure efficacité et une réduction des risques de dysfonctionnement.

Ainsi, la commande par logique floue offre des opportunités considérables pour l'amélioration et l'innovation dans les systèmes de commande, rendant les technologies comme le pompage photovoltaïque plus efficaces et fiables face aux défis de l'énergie renouvelable. En intégrant cette approche, les systèmes de commande peuvent atteindre une nouvelle dimension de performance et de résilience, essentielle pour répondre aux exigences croissantes des applications modernes.

Perspectives: Cependant, l'étude présentée dans ce mémoire n'est pas exhaustive et laisse place à de futures perspectives. Nous suggérons notamment :

- **La réalisation pratique de notre système :** La mise en œuvre pratique permettra de valider les résultats théoriques et d'identifier d'éventuels ajustements nécessaires pour une performance optimale.
- **L'intégration de l'Internet des Objets (IoT) :** L'application de la commande par logique floue dans un système de pompage photovoltaïque connecté à internet permettrait une surveillance et un contrôle en temps réel. Cela améliorerait non seulement l'efficacité énergétique mais offrirait également des diagnostics prédictifs et une maintenance préventive, augmentant ainsi la fiabilité et la durée de vie du système.

Bibliographie

- [1] **Kerboua, A., Mohamed, A.** Hybrid fuzzy sliding mode control of a doubly-fed induction generator in wind turbines. *Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. et Energ.*, Vol. 57, pp. 412-421, Bucarest, (2012).
- [2] **Zaïem, K., & Kamar, A.** Commande par logique floue d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. Université Annaba, Algérie. Disponible sur: <https://scholar.google.com/citations?user=ms9SM9IAAAAJ&hl=fr>(2019).
- [3] **Benkhelifa, A., & Belfodil, M.** Commande par logique floue adaptative d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/profile/Imane-Benkhelifa-3>(2018).
- [4] **Sebbah, M., & Fadel, M.** Commande par logique floue d'un système de pompage photovoltaïque à moteur asynchrone. Université de Béjaïa, Algérie. Disponible sur: <https://www.pnst.cerist.dz/detail.php?id=26336>(2017).
- [5] **Fekrouni, M., & Kraa, F.** Fuzzy logic control of a photovoltaic water pumping system using an improved hybrid Harris hawks-whale optimization algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130226. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/378534373_Fuzzy_Logic-Based_Energy_Optimization_in_Water_Pumping_Towards_Sustainable_Development_Goals(2022).
- [6] **Boualleg, A., & Khedher, A.** Fuzzy logic-based control of a photovoltaic water pumping system using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 106934. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722024258>(2021).
- [7] **Aissaoui, A.G., Abid, H., Abid, M., Tahour, A.** Commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée. *Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. et Energ.*, Vol. 52, pp. 89-103, Bucarest, (2007).
- [8] **Aissa, M., & Bekkouche, A.** Fuzzy logic control of a photovoltaic water pumping system using metaheuristic algorithms. *Solar Energy*, 207, 243-254. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719301878> (2020).
- [9] **Chikhi, A.** Commande directe du couple du moteur asynchrone - apport de la logique floue. *Mémoire Magister*, Université de Batna, Algérie, (2008).

-
- [10] **Dernoncourt, F.** Introduction à la logique floue. Disponible sur: <https://franck-dernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logique-floue/>,(2011).
- [11] **Kaufmann, A.** Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs. Tome 1. Edition Mascon, Paris, New York, Barcelone, Milan, (1977).
- [12] **Zhao, J., & Bose, B. K.** Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled inductive motor drive. *Proceeding Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Spain, Vol. 4, pp. 229–234, (2002).
- [13] **Zadeh, L. A.** The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. *Information Sciences*, Vol. 9, pp. 43-80, (1976).
- [14] **Meunie, B. B. et al.** Logique floue : principe, aide à la décision. *Edition Hermes Science*, Lavoisier, (2003).
- [15] **Tacao, M.** Commandes numérique de machines asynchrones par logique floue. Thèse de doctorat, Université de Laval, Faculté des sciences et de génie, Québec, (1997).
- [16] **Caron, J. P., and Hautier, J. P.** "Modélisation et commande de la machine asynchrone." Ed Technip, 1995, 279p.
- [17] **Sturtzer, G., and Smigielski, E.** "Modélisation et commande des moteurs triphasés. Commande vectorielle des moteurs synchrones, Commande numérique par contrôleurs DSP." Ellipses, 2000, 244 p. ISBN: 2-7298-0076-X.
- [18] **Bitsi, K., Wallmark, O., and Bosga, S.** "An Induction Machine with Wound Independently-Controlled Stator Coils." 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-5.

Résumé

Le mémoire examine en profondeur l'application de la commande par logique floue dans le domaine du pompage photovoltaïque. Il met en lumière les étapes clés de cette approche. La commande floue s'avère particulièrement efficace pour gérer les imperfections des données, en offrant une solution adaptée aux besoins spécifiques du système tout en prenant en compte les incertitudes inhérentes. Cet outil essentiel permet d'optimiser les performances des systèmes de pompage photovoltaïque en assurant; stabilité et la robustesse, même dans des conditions variables. Des tests de robustesse démontrent que les contrôleurs flous surpassent les méthodes traditionnelles en gérant efficacement les variations des paramètres, renforçant ainsi la fiabilité globale du système. Dans des environnements solaires souvent imprévisibles, la logique floue maintient des performances stables et constantes, soulignant son efficacité pour garantir un fonctionnement optimal du système.

Mots clés: Commande, panneaux photovoltaïque, pompage solaire photovoltaïque, efficacité, fiabilité, logique floue.

Abstract

This thesis examines the application of fuzzy logic control in the field of photovoltaic pumping. It highlights the key steps of this approach, namely fuzzification, knowledge base construction, and defuzzification. Fuzzy control proves to be particularly effective in managing data imperfections, offering a solution tailored to the specific needs of the system while considering inherent uncertainties. This essential tool optimizes the performance of photovoltaic pumping systems, ensuring stability and consistency even under variable conditions. Robustness tests demonstrate that fuzzy controllers outperform traditional methods by effectively managing parameter variations, thereby enhancing overall system reliability. In often unpredictable solar environments, fuzzy logic maintains stable and consistent performance, underscoring its effectiveness in ensuring optimal system operation.

Keywords: control, photovoltaic panels, photovoltaic solar pumping, efficiency, reliability, fuzzy logic, fuzzification, defuzzification, MPPT.

ملخص

تلقي هذه الأطروحة نظرة متعمقة على تطبيق التحكم المنطقي الضبابي في مجال الضخ الكهروضوئي. وتسلط الضوء على المراحل الرئيسية لهذا النهج، وهي الضبابية وبناء القاعدة المعرفية وإزالة الضبابية. ويثبت التحكم الضبابي فعاليته بشكل خاص في إدارة عيوب البيانات، حيث يقدم حلاً مصمماً خصيصاً لتلبية الاحتياجات المحددة للنظام. وتساعد هذه الأداة الأساسية على تحسين أداء أنظمة الضخ الكهروضوئية من خلال ضمان الاستقرار والاتساق، حتى في ظل ظروف متغيرة مثل درجات الحرارة المختلفة. تُظهر اختبارات المتانة أن وحدات التحكم الضبابية تتفوق في الأداء على الطرق التقليدية من خلال إدارة تغيرات المعلمات بفعالية، وبالتالي تعزيز موثوقية النظام بشكل عام. في البيئات الشمسية التي لا يمكن التنبؤ بها في كثير من الأحيان، يحافظ المنطق الضبابي على أداء مستقر ومتسق، مما يؤكد فعاليته في ضمان التشغيل الأمثل للنظام.

الكلمات المفتاحية: التحكم، الألواح الكهروضوئية، الضخ الشمسي الكهروضوئي، الكفاءة، الموثوقية، المنطق الضبابي، إزالة الضبابية.