

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers

*A ma très chère mère, mon père, à mes très chers frères
et mes sœurs*

A toute la famille et à tous mes amis

A tous mes amis de la promotion

A tous qui me sont chères

Remerciements

Pour commencer, merci à Allah de m'avoir donné toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire aboutir ce travail. Un travail portant sur un projet de pompage solaire d'une importance capitale pour mon pays, dont les besoins sont très grands pour son développement futur.

Avant tout je remercie Monsieur KERBOUA Abdelfatah, maître de conférences et responsable de la spécialité Electrotechnique (Energie et environnement) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissant de l'opportunité qu'il m'a donnée. Ses remarques pertinentes et son esprit de synthèse m'ont permis d'avoir une autre vision sur la problématique. Je le remercie pour l'intérêt et le suivi qu'il a porté à mon projet. J'estime avoir énormément appris à son contact. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur BOUKLI HACENE Fouad, maître de conférences, à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, qui a co-encadré ce projet de fin d'études et qui m'a bénéficié de ses compétences et de sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury, monsieur TAHOUR Ahmed professeur à ESSA.Tlemcen, monsieur CHEMIDI Abdelkarim maitre-assistant de classe B à ESSA.Tlemcen et monsieur MEGNAFI Hichem maitre conférence de classe B à ESSA.Tlemcen qui m'ont corrigé et évalué mon travail, je leur exprime toute ma gratitude.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué au bon déroulement de ces travaux en commençant par les techniciens de l'école qui m'ont aidé à la réalisation du projet.

Enfin, Je remercie ma famille et mes chers amis pour leur compréhension et soutien moral, j'espère que ce travail soit la bonne expression de ma gratitude.

RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un cout élevé.

Le but de ce mémoire est d'assurer une commande robuste d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, connecté à un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. L'objectif de cette commande consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système pompage photovoltaïque pour diverses conditions climatiques.

Mots-clés : pompage photovoltaïque, logique floue, commande vectorielle, optimisation, contrôle MPPT, Pompe centrifuge.

المخلص

يعد استخدام الطاقة الشمسية في مواقع معزولة لتطبيقات مختلفة ، مثل ضخ المياه ، من الاهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه آمنة الشرب. لكن المولدات الضوئية لها عيبان رئيسيان هما الكفاءة المنخفضة والتكلفة العالية.

الغرض من هذه المذكرات هو ضمان تحكم قوي في نظام الضخ الكهروضوئي الذي يعمل فوق الشمس. يشتمل تكوين هذا النظام على مولد كهروضوئي ، متصل بعاكس للجهد يوفر آلة غير متزامنة مقرونة بمضخة طرد مركزي. الهدف من هذا التحكم هو ضمان التشغيل الأقصى للطاقة لنظام الضخ الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية.

الكلمات المفتاحية: الضخ الكهروضوئي ، المنطق الضبابي ، مكافحة النواقل ، التحسين ، تحكم MPPT ، مضخة الطرد المركزي.

Abstract

The use of solar energy in isolated sites for different applications, such as water pumping, is of primary interest to people in developing countries who do not have safe access to water drinking. But photovoltaic generators have two major drawbacks that are low efficiency and high cost.

The purpose of this memoir is to ensure a robust control of a photovoltaic pumping system operating over the sun. The configuration of this system comprises a photovoltaic generator, connected to a voltage inverter supplying an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this control is to ensure maximum power operation of the photovoltaic pumping system for various climatic conditions.

Keywords: photovoltaic pumping, fuzzy logic, vector control, optimization, MPPT control, Centrifugal pump.

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1 Principe de la commande vectorielle[9]..... | 5 |
| Figure I-2 Système de commande vectorielle indirecte[4]. | 8 |
| Figure I-3 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse..... | 9 |
| Figure I-4 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de <i>ids</i> | 10 |
| Figure I-5 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de <i>iqs</i> | 11 |
| Figure I-6 : Bloc de simulation global du système de pompage contrôlé par IRFOC. | 11 |
| Figure I-7 La vitesse de la machine asynchrone. | 12 |
| Figure I-8 Le débit d'eau..... | 12 |
| Figure I-9 Le découplage entre le flux rotorique et le couple électromagnétique | 13 |
| Figure II-2-b-Classification des vitesses en trois ensembles selon la logique floue | 20 |
| Figure II-2-a-Classification des vitesses en trois ensembles selon la logique classique..... | 20 |
| Figure II-3 Représentation graphique d'un ensemble classique (à gauche) et d'un ensemble flou (à droite)..... | 21 |
| Figure II-4 Différentes formes des fonctions d'appartenance..... | 24 |
| Figure II-5 Exemple d'implication floue avec conjonction «ET» traduite par un « min » | 26 |
| Figure II-6 Exemple d'application de l'ensemble des 3 règles de notre exemple..... | 28 |
| Figure II-7 défuzzification par «moyenne des maxima» | 29 |
| Figure II-8 défuzzification par «centre de gravité»..... | 29 |
| Figure II-9 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou. | 30 |
| Figure II-10 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou. | 30 |
| Figure II-11 Fonctions d'appartenance de l'erreur et la variation de l'erreur. | 34 |
| Figure II-12 Localisation des points critiques pour la déduction des règles. | 34 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III-1 Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque..... | 41 |
| Figure III-2Allure de la puissance photovoltaïque..... | 41 |
| Figure III-3 Recherche du point MPP sous différent condition météorologique..... | 42 |
| Figure III-4 opération de recherche du point MPP du contrôleur par logique floue..... | 43 |
| Figure III-5 : Bloc de simulation global du système de pompage contrôlé par logique floue. | 44 |
| Figure III-6 Fonctions d'appartenance utilisées..... | 44 |
| Figure III-7La vitesse de la machine asynchrone..... | 45 |
| Figure III-8 Le débit d'eau..... | 45 |
| Figure III-9 L'orientation du flux rotorique..... | 46 |
| Figure III-10 La vitesse du moteur asynchrone obtenue par PI et RLF..... | 46 |
| Figure III-11 Influence de l'ensoleillement sur la vitesse de la MAS à température constante. | 48 |
| Figure III-12 Influence de l'ensoleillement à une température constante..... | 48 |
| Figure III-13 Influence de la résistance rotorique..... | 49 |

Sommaire

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE I. LA COMMANDE VECTORIELLE du groupe machine asynchrone- pompe. 3 | |
| I.1 Introduction | 4 |
| I.2 Principe de la commande vectorielle | 4 |
| I.3 La commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté (IRFOC) | 5 |
| I.3.1 Mise en équation de la commande IRFOC | 6 |
| I.3.2 Estimation de ω_s et θ_s | 7 |
| I.3.3 Expression du couple électromagnétique et le flux rotorique | 7 |
| I.4 Calculs des régulateurs | 8 |
| I.4.1 Boucle de régulation de vitesse | 9 |
| I.4.2 Boucles de régulation des courants | 10 |
| I.5 Simulation du système de pompage contrôlé par IRFOC | 11 |
| I.6 Conclusion | 16 |
| CHAPITRE II. Généralités sur la commande par la logique floue | 17 |
| II.1 Introduction | 18 |
| II.2 Principe fondamentale de la logique floue | 18 |
| II.2.1 Ensembles flous..... | 20 |
| II.2.2 Opérations élémentaires sur les ensembles | 21 |
| II.2.3 Variables linguistiques | 22 |
| II.2.4 Fonction d'appartenance | 23 |
| II.2.5 Opérateur floue..... | 24 |
| II.2.6 Raisonnement floue..... | 24 |
| II.2.7 défuzzification | 26 |
| II.3 Contrôleur flou | 30 |
| II.3.1 Stratégie de fuzzification : | 31 |
| II.3.2 Base de données | 32 |
| II.3.3 Moteur d'inférence floue..... | 36 |
| II.3.4 Défuzzification | 38 |
| II.4 Conclusions | 38 |

CHAPITRE III. Commande par la logique floue D'UN système de pompage photovoltaïque 39

| | | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.1 | Introduction | 40 |
| III.2 | Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque | 40 |
| III.3 | Commande du système de pompage photovoltaïque | 43 |
| III.4 | Comparaison entre la commande classique et la commande floue | 46 |
| III.5 | Testes de robustesse..... | 47 |
| III.5.1 | L'effet de l'éclairement :..... | 47 |
| III.5.2 | L'effet de la température | 48 |
| III.5.3 | L'effet de la résistance rotorique..... | 48 |
| III.5.4 | Interprétation des résultats | 49 |
| III.6 | Conclusion :..... | 50 |
| Conclusion générale | | 52 |

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. En effet, La consommation de ces sources possède des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple l'émission de gaz à effet de serre provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques. Ainsi, la production électrique à partir des combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂ [1].

Par opposition, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition de s'adapter avec leurs fluctuations naturelles ; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles [2].

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable [3].

Afin d'améliorer les performances d'un système de pompage solaire, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. On cite à titre d'exemple la commande adaptative, la commande par mode de glissement, la commande par floue ...etc, l'intérêt récent accordé à ce dernier est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants. Le plan de travail adopté se présente comme suit :

Introduction générale

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle indirecte à orientation du flux rotorique (IRFOC). Ensuite nous avons simulé le système de pompage contrôlé par IRFOC en utilisant la commande classique dans l'environnement MATLAB-SIMULINK.

Le deuxième chapitre est consacré à la commande par la logique floue qui suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels. La logique floue est une technique de traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques qui peut être utilisée dans différents domaines. A la fin du chapitre, nous avons présenté le contrôleur flou qui est un moyen de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes sans la nécessité du modèle mathématique.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique de notre système de pompage photovoltaïque commandé par la logique floue. On s'intéresse dans cette partie à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque via la commande MPPT de type « FLC » et la commande du moteur asynchrone qui entraîne la pompe pour avoir un débit réglable en remplaçant les régulateurs classiques par des régulateurs flous de la commande vectorielle à flux rotorique orienté et enfin nous avons testé la robustesse de la commande du système de pompage photovoltaïque.

CHAPITRE I. LA COMMANDE
VECTORIELLE DU GROUPE
MACHINE ASYNCHRONE-
POMPE.

I.1 Introduction

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa simplicité de construction et de maintenance (moteur sans balais), sa fiabilité, sa robustesse et sa puissance massique élevée. Par contre sa commande est plus difficile à réaliser que pour d'autres machines électriques. Cette difficulté vient du fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une des variables se répercute sur l'autre. Pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut un système de commande extérieur à la machine qui réalise un découplage des grandeurs du couple et du flux.

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur les principes de base de la commande vectorielle classique. Nous présentons ensuite la commande indirecte à orientation du flux rotorique (IRFOC). Aussi nous avons mis une méthode de calcul des coefficients des régulateurs de la chaîne de commande pour ce type de contrôle. Enfin, Nous avons simulé le système de pompage contrôlé par la commande vectorielle indirecte (IRFOC) en utilisant l'environnement MATLAB-SIMULINK.

I.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe de cette commande est d'orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple.

Dans ce travail, on choisit la technique de commande par orientation du flux rotorique (Field Oriented Control (FOC)) qui élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [5]. Dans ce cas le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park (voir figure I-1).

La commande FOC a été initialement proposée en Allemagne à la fin des années 60 et au début des années 70 selon deux méthodes distinctes [5]:

- La méthode directe (DFOC) consiste à déterminer la position et le module du flux. À cet effet deux procédés sont utilisés, à savoir la mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteurs et l'estimation de flux à l'aide de modèles mathématiques.

• La méthode indirecte (IRFOC), elle, n'utilise pas l'amplitude du flux, mais seulement sa position. Dans ce cas, le flux n'est pas contrôlé directement, mais c'est une variable intermédiaire liée au flux par un modèle de référence qui est contrôlée.

La technique IRFOC a été généralement préférée à la DFOC car elle a une configuration relativement simple comparée à la DFOC qui demande des estimateurs, ou des sondes à effet Hall pour la mesure du flux qui sont contraints aux conditions de travail excessives (Température, vibration...etc.), de plus la mesure est entachée de bruits dépendants de la vitesse [4].

En général, la méthode indirecte est plus simple que la méthode directe, mais le choix de méthodes ainsi que les stratégies varient d'une application à l'autre.

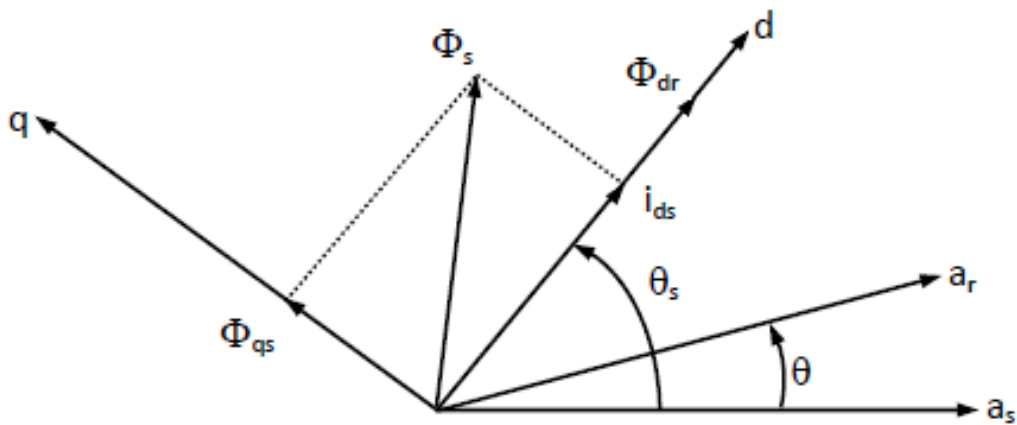


Figure I-1 Principe de la commande vectorielle[9].

I.3 La commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté (IRFOC)

La commande vectorielle utilisée dans cette partie est une commande indirecte par orientation du flux rotorique.

Dans ce cas, le flux n'est pas régulé (donc ni mesuré, ni estimé), celui-ci est donné par la consigne et orienté à partir de l'angle θ_s qui est obtenu à partir de la pulsation statorique ω_s . Cette dernière est la somme de la pulsation rotorique ω_r estimée et la pulsation mécanique $p\Omega$ mesurée. Donc cette méthode élimine le besoin d'utiliser un capteur ou un observateur du flux d'entrefer [2][4].

I.3.1 Mise en équation de la commande IRFOC

On rappelle les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MAS dans le repère du PARK [1]:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d \varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d \varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (I.1)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d \varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d \varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.2)$$

Il faut choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique sera aligné selon l'axe (d) en régime permanent (figure I.1), on aura [5]

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (I.3)$$

Les équations des tensions rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d \varphi_{rd}}{dt} \\ 0 = R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.4)$$

Celles des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \sigma L_s i_{sd} + \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_r \\ \varphi_{sq} = \sigma L_s i_{sq} \end{cases} \quad (I.5)$$

Les composantes des tensions statoriques devient :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d i_{sd}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \frac{d \varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d i_{sq}}{dt} + \omega_s \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s i_{sd} \end{cases} \quad (I.6)$$

$$\text{Avec } \sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_s}$$

I.3.2 Estimation de ω_s et θ_s

Dans la commande IRFOC la pulsation statorique est déterminée indirectement depuis, la mesure de la vitesse mécanique et la relation suivante [2][9] :

$$\omega_r = \frac{M_{sr}}{T_r \varphi_r} i_{sq} \quad (I.7)$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation(I.8), on aura :

$$\omega_s - \omega_r = p\Omega \quad (I.8)$$

$$\omega_s = \frac{M_{sr}}{T_r \varphi_r} i_{sq} + p\Omega \quad (I.9)$$

Avec $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ la constante de temps rotorique, qui est un paramètre influant sur les performances de cette commande.

La position θ_s , est donnée par :

$$\theta_s = \int \omega_s dt$$

I.3.3 Expression du couple électromagnétique et le flux rotorique

Le flux rotorique φ_r est relié avec le courant i_{sd} comme suit [9][5]:

$$\varphi_r = \frac{M_{sr}}{1 + T_r} i_{sd} \quad (I.10)$$

L'expression de couple électromagnétique devient :

$$C_e = p \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_r i_{sq} \quad (I.11)$$

Donc, il est possible d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes du courant statoriques " i_{sd} " et " i_{sq} " respectivement.

Les équations de la machine sont résumées dans le système d'équations suivantes :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d i_{sd}}{dt} &= \left(-\frac{1}{\sigma T_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r M_{sr}} \varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \\ \frac{d i_{sq}}{dt} &= \left(-\frac{1}{\sigma T_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{1-\sigma}{\sigma M_{sr}} \omega \varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{d \varphi_r}{dt} &= \frac{M_{sr}}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_r \\ \omega_s &= \frac{R_r M_{sr}}{L_r \varphi_r} i_{sq} + p \Omega \\ C_e &= p \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_r i_{sq} \end{aligned} \right. \quad (I.12)$$

Le schéma bloc du système de commande de vitesse utilisant la méthode indirecte est illustre a la figure I-2. La composante de flux du courant statorique i_{ds}^* correspondant au flux rotorique φ_r desire est determine a partir de l'équation (I.10). Dans ce cas. Elle est maintenue constante.

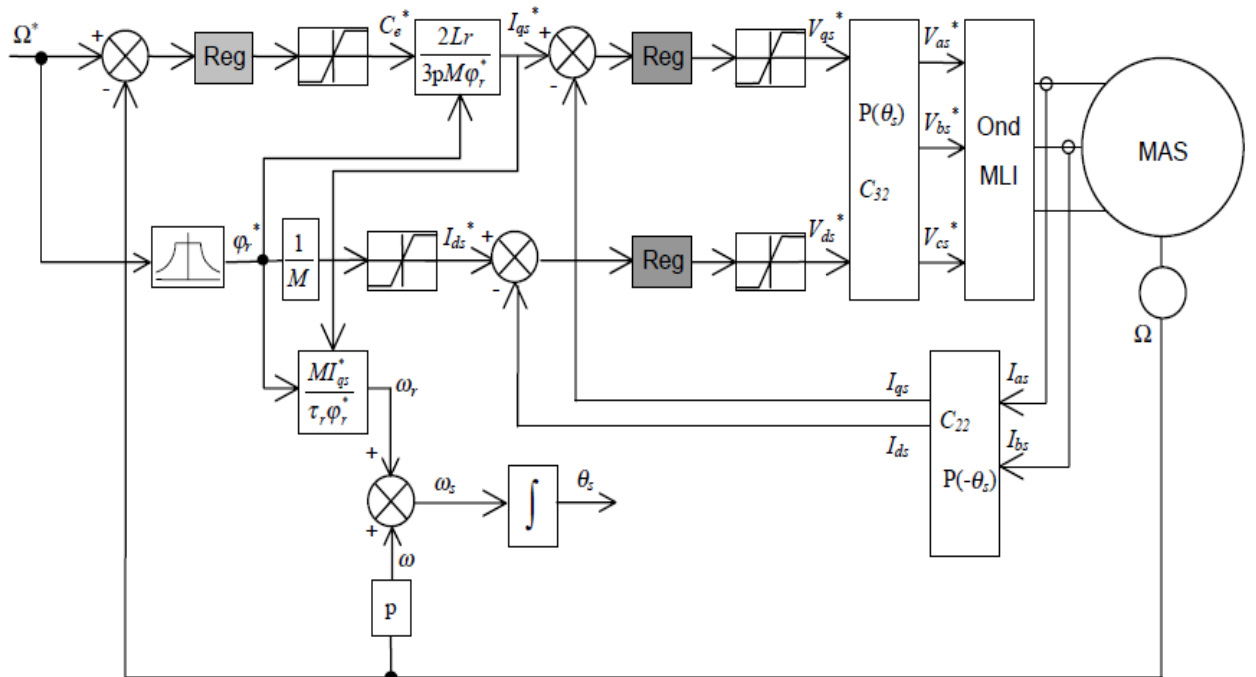


Figure I-2 Système de commande vectorielle indirecte[4].

I.4 Calculs des régulateurs

Les régulateurs utilisés sont de type PI, ils sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action intégral élimine l'erreur statique en régime

permanent, et l'action proportionnelle assure la rapidité de la réponse dynamique. La fonction de transfert de régulateur est donnée par :

$$C(S) = \frac{K_p S + 1}{K_i} \quad (I.13)$$

Le calcul des paramètres du régulateur est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles (placement des pôles).

I.4.1 Boucle de régulation de vitesse

Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse est représenté par la figure (I.13). La fonction de transfert $H(S)$ est donnée par :

$$H(S) = \frac{1}{f + j S} \quad (I.14)$$

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul est donnée par :

$$F(S) = \frac{(K_p S + K_i)/j}{S^2 + \frac{K_p + f}{j} S + K_i/j} \quad (I.15)$$

Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimale, les pôles sont choisis complexes conjugués avec partie réelle égale à la partie imaginaire.

En imposant les pôles $S_{1,2} = -a \mp j a$, et par identification des deux le polynôme caractéristique, on obtient les paramètres suivants du régulateur de vitesse :

$$\begin{cases} K_p = 2 a j - f \\ K_i = a^2 j \end{cases} \quad (I.16)$$

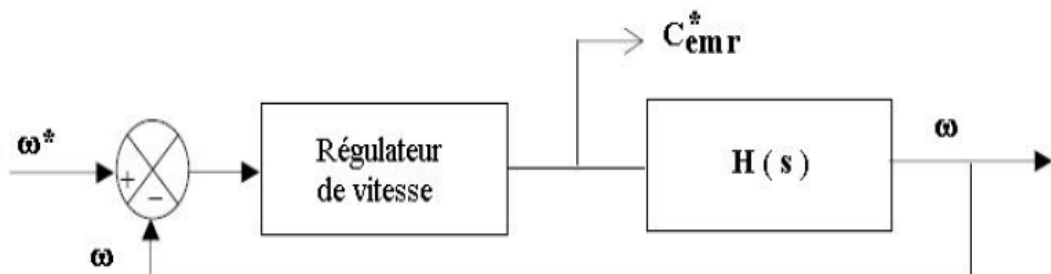


Figure I-3 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse.

I.4.2 Boucles de régulation des courants

Les courants i_{sd} et i_{sq} influent sur les tensions V_{sd1} et V_{sq1} pour reconstitue les tension V_{sd} et V_{sq} respectivement.

Les schémas fonctionnels des boucles de régulation des courants sont donnés par les figures (I.14) et (I.15). Les fonctions de transfert $H_d (S)$ et $H_q (S)$ sont données par :

$$H_d (S) = \frac{1}{R_s + \sigma L_s S} \quad (I.17)$$

$$H_q (S) = \frac{1}{R_s + \sigma L_s S}$$

Les fonctions de transfert en boucle fermée sont données par :

$$F_d(S) = \frac{(K_p S + K_i)/\sigma L_s}{S^2 + \frac{K_p + R_s}{\sigma L_s} S + K_i/\sigma L_s} \quad (I.18)$$

$$F_q(S) = \frac{(K_p S + K_i)/\sigma L_s}{S^2 + \frac{K_p + R_s}{\sigma L_s} S + K_i/\sigma L_s} \quad (I.19)$$

De la même manière en imposant les pôles $S_{1,2} = -b \mp j b$, et par identification des deux le polynôme caractéristique, les paramètres des régulateurs sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_p^{iqs} = K_p^{ids} = 2 b \sigma L_s - R_s \\ K_i^{iqs} = K_i^{ids} = b^2 \sigma L_s \end{cases} \quad (I.20)$$

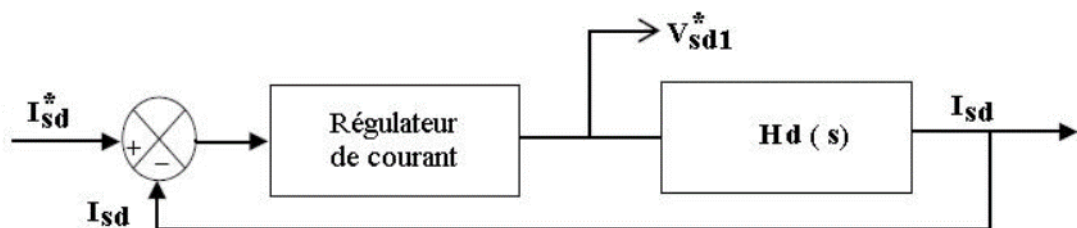


Figure I-4 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de i_{ds} .

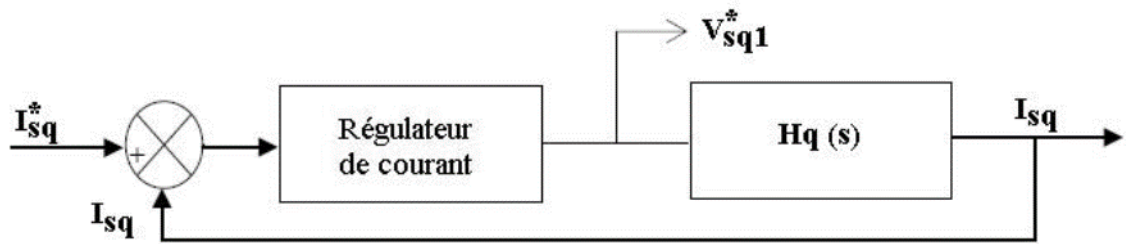


Figure I-5 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de i_{qs} .

I.5 Simulation du système de pompage contrôlé par IRFOC

Le schéma bloc globale du système de pompage contrôlé par la commande vectorielle indirecte est représenté sur l'environnement Simulink comme suit :

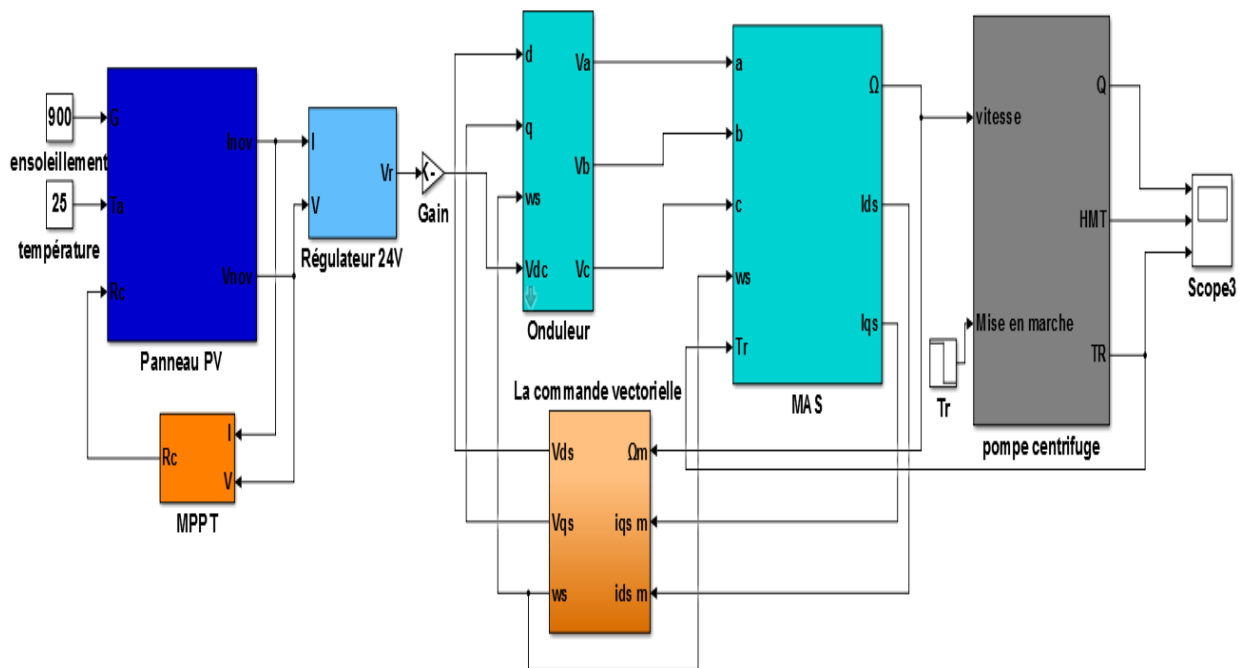


Figure I-6 : Bloc de simulation global du système de pompage contrôlé par IRFOC.

Pour voir les performances du système de pompage contrôlé par IRFOC, on démarre le système à vide. Ensuite à l'instant $t=1s$, on commence l'opération de pompage.

La figure I-7 montre l'évolution de la vitesse de la machine asynchrone avant et après l'opération de pompage. Il est clair que la vitesse s'établit à sa valeur de référence (150 rd/s) après un très court régime transitoire. Au début de l'opération de pompage, le système subit une légère perturbation puis s'établit de nouveau à sa valeur de référence.

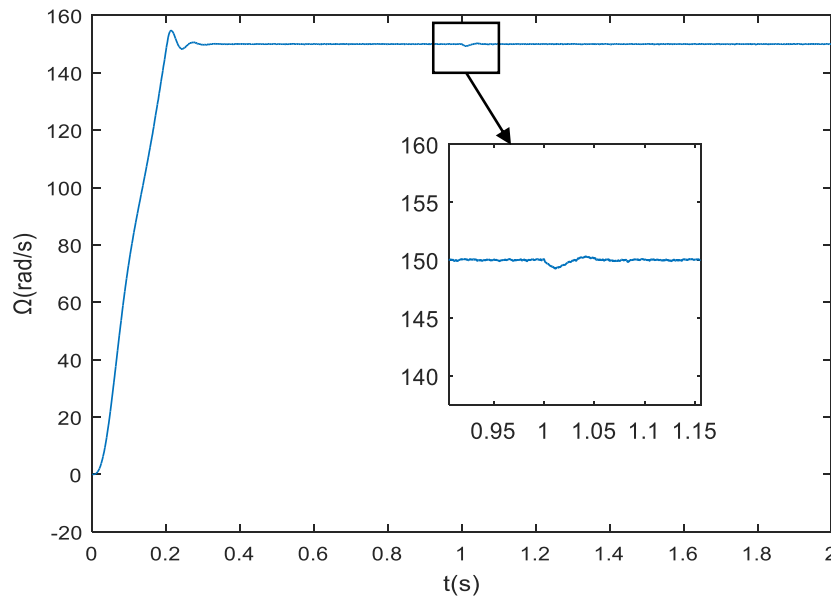


Figure I-7 La vitesse de la machine asynchrone.

L'évolution du débit d'eau pompe est relié directement à la vitesse de rotation du moteur. Puisque la vitesse est bien contrôlée. Ceci permet d'optimiser l'opération de pompage (figure I-8).

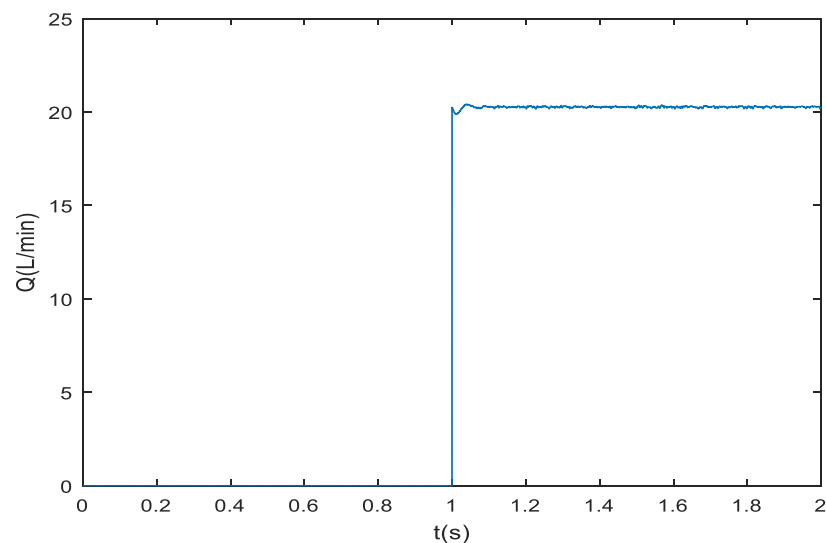


Figure I-8 Le débit d'eau.

Afin de tester que l'orientation du flux rotorique est bien réalisée, nous avons présenté dans les figures suivantes, l'évolution du flux rotorique suivant l'axe directe et de l'axe en quadrature (figure I-9-a). Il est clair que le flux rotorique est réellement orienté selon l'axe directe.

Lorsque l'orientation du flux est réalisée, le couple électromagnétique sera proportionnel au courant i_{qs} . Ceci est remarquable sur la figure I-9-b.

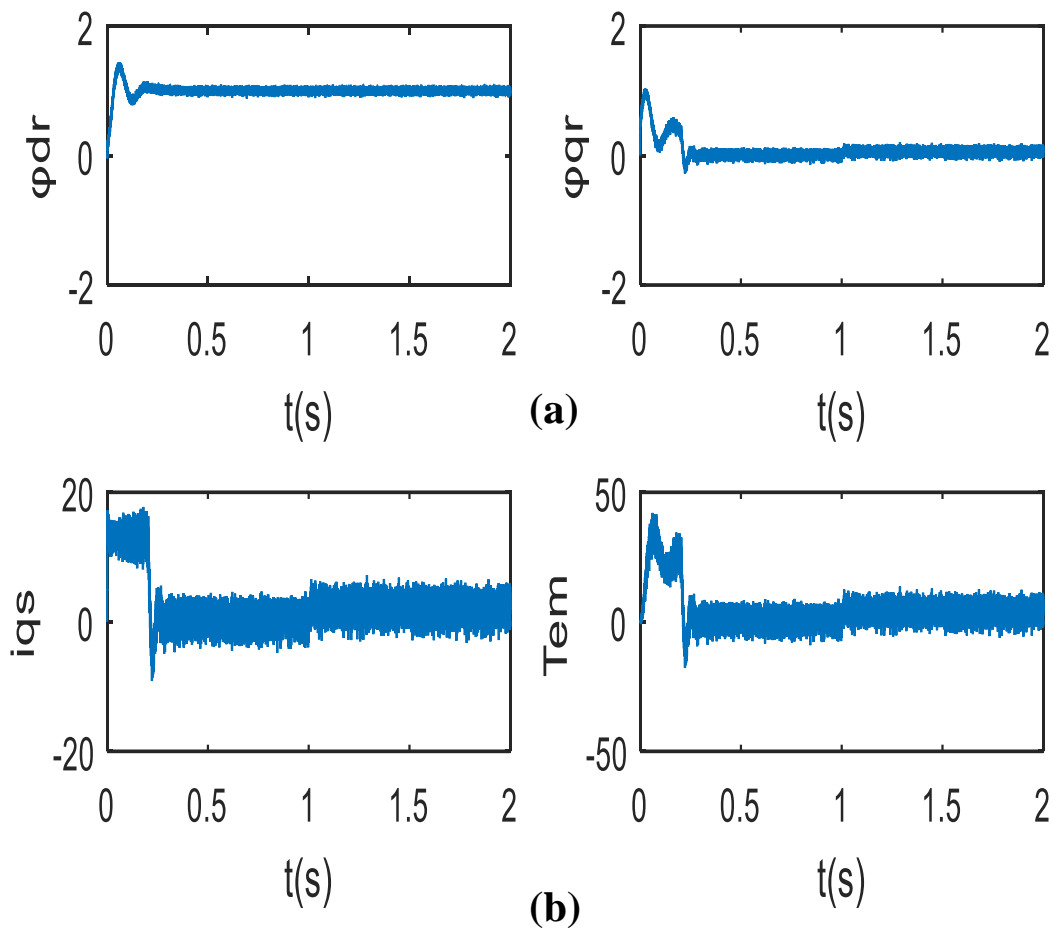


Figure I-9 Le découplage entre le flux rotorique et le couple électromagnétique

Le flux rotorique et le couple présentent des dépassements pendant les régimes transitoires surtout au démarrage ; lorsqu'on essayait de rendre ce régulateur plus rapide, on aboutissait à des dépassements plus importants. Donc nous pensons à d'autres types des régulateurs et l'on compare avec le régulateur classique.

I.6 Testes de robustesse

Nous allons simuler le système de pompage photovoltaïque pour des différentes conditions de fonctionnement.

I.6.1 L'effet de l'éclairement :

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.

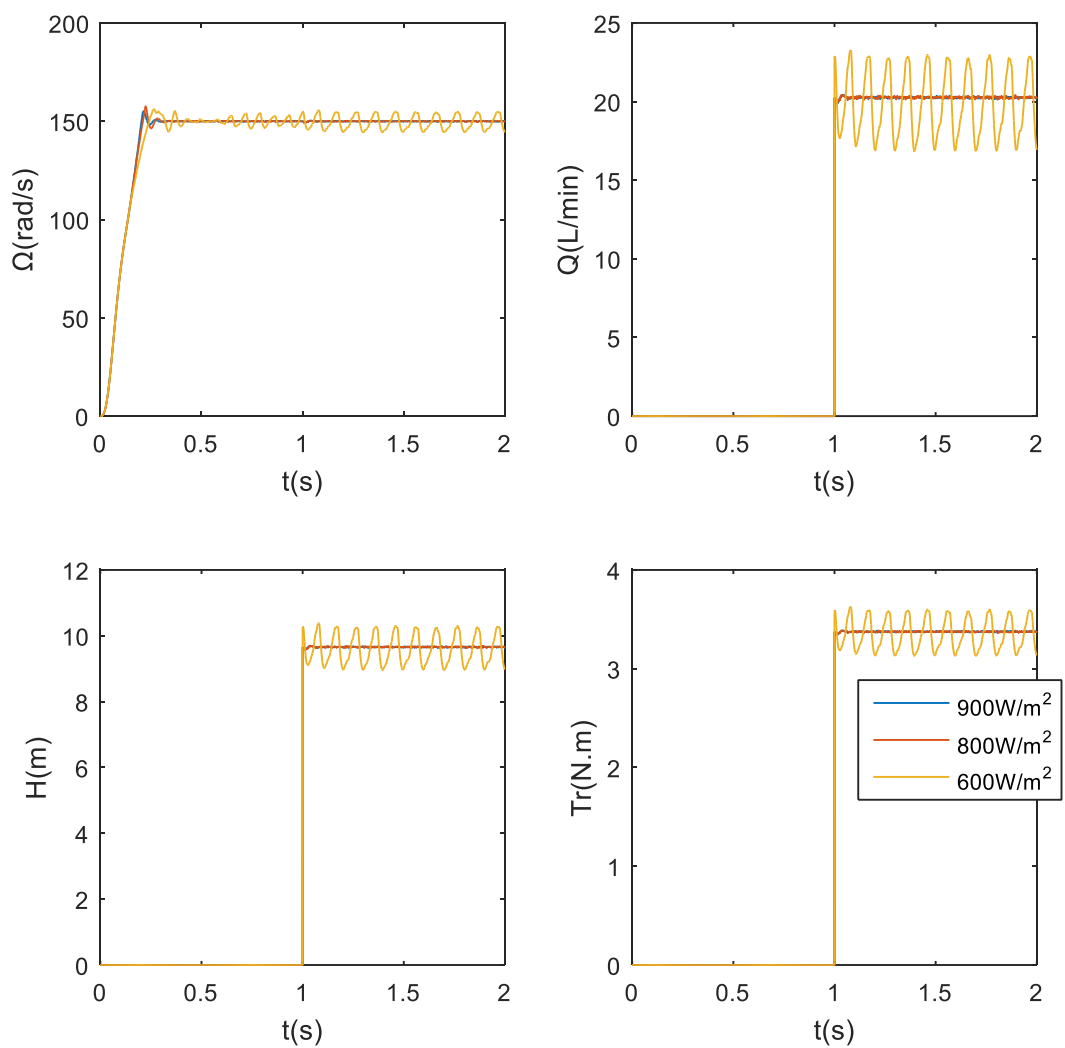


Figure I-10 Influence de l'ensoleillement sur la vitesse de la MAS à température constante.

I.6.2 L'effet de la température

La température est un paramètre très important dans la caractéristique des cellules solaires. Elle a une influence sur le comportement du système de pompage.

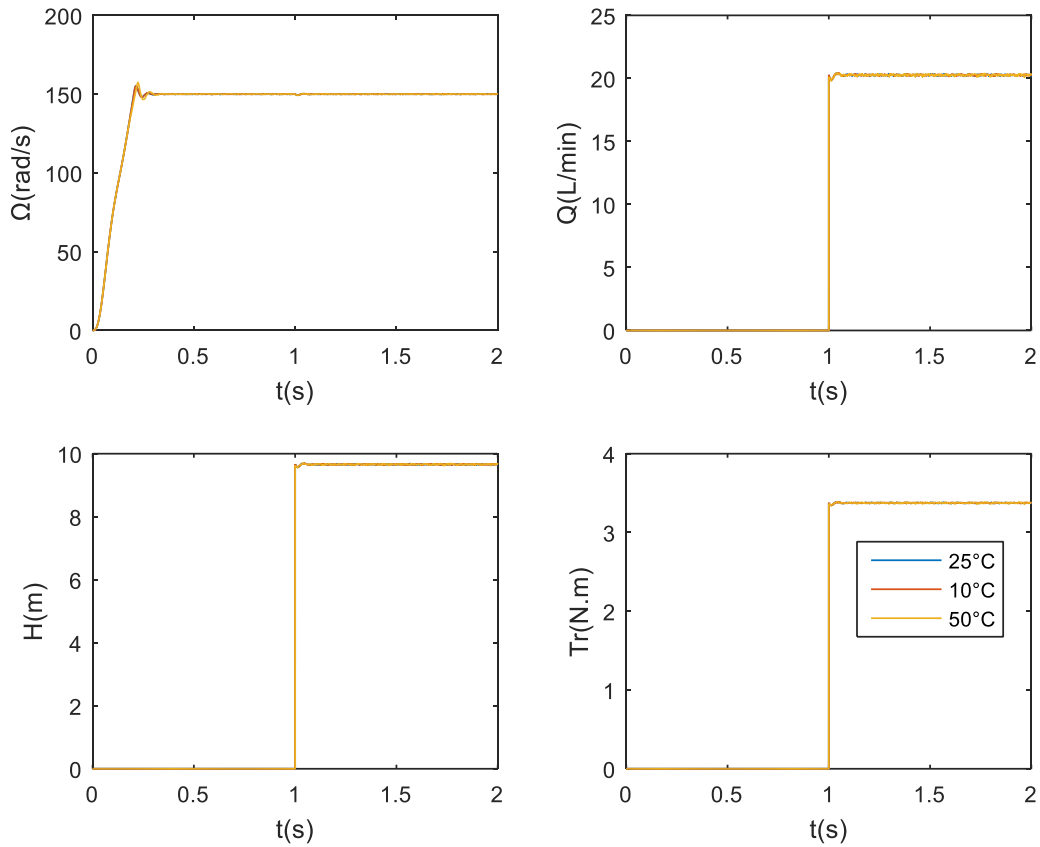


Figure I-11 Influence de la température à l'ensoleillement constante.

I.6.3 L'effet de la résistance rotorique

Pour tester la commande vectorielle aux variations des paramètres, nous avons tester la variation de la résistance rotorique.

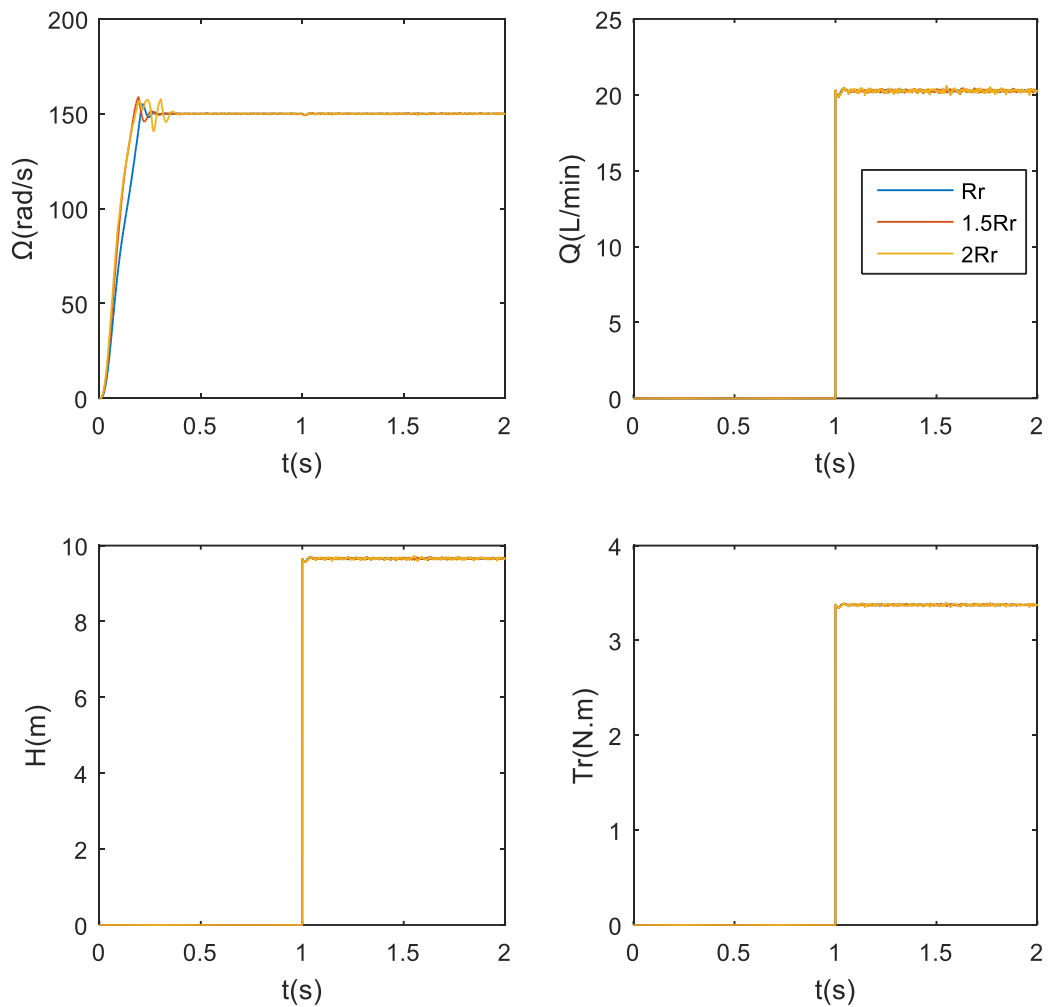


Figure I-12 Influence de la résistance rotorique.

Il est remarquable que la commande vectorielle est très sensible aux variations des conditions de fonctionnement.

I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie la commande vectorielle indirecte appliquée au système de pompage, les régulateurs utilisés pour le contrôle sont classiques à action Proportionnelle-Intégrale. Les performances sont satisfaisantes de point de vue dépassement, temps de réponse et erreur statique.

**CHAPITRE II. GENERALITES SUR
LA COMMANDE PAR LA
LOGIQUE FLOUE**

II.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 laves 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 la 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 mathématique réputés difficiles. Ce n'est qu'en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus 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. A la fin des années 1980, les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « 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, nous définirons les notions de base de la logique floue en les illustrant par des exemples de compréhension. Ensuite nous présentons aussi l'utilisation de cette technique dans la théorie de réglage.

II.2 Principe fondamentale 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 (vrais ou faux). Une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure II-1. Toutes les vitesses moins de 40km/h sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble [lente] et toutes les vitesses plus de 70km/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 69km/h très proche de 70km/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 65km/h, d'autres répondent à 75km/h, encore un autre à 90km/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 65km/h est rapide, 17 personnes trouvent que 75km/h est rapide et 55 personnes trouvent qu'une vitesse est rapide à 90km/h. Donc 65km/h a la valeur de vérité de 5%, 75km/h a une valeur de vérité de 17% et la vitesse de 90km/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 [6].

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} (vrais). A 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 [13].

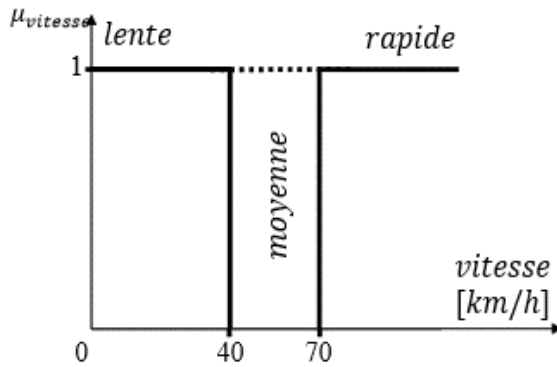


Figure II-2-a-Classification des vitesses en trois ensembles selon la logique classique

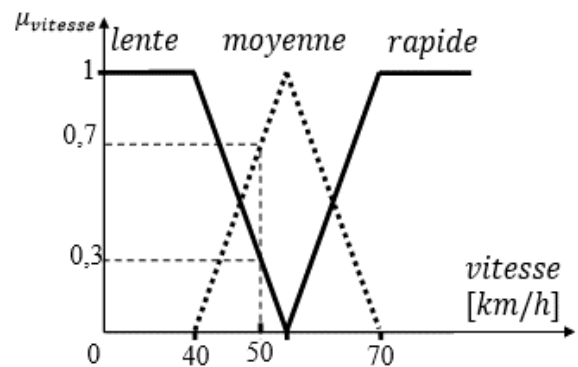


Figure II-2-b-Classification des vitesses en trois ensembles selon la logique floue

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 II-2-b montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci, à l'aide de la logique floue. Ainsi, une vitesse de 50km/h appartient à l'ensemble [lente] avec une valeur de $\mu = 0,3$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble [moyenne] avec $\mu = 0,7$. Evidemment, 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.

II.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 $[0,1]$ [7].

$$\begin{aligned} \mu_F : U &\longrightarrow [0,1] \\ x &\longrightarrow \mu_F(x) \end{aligned}$$

Cet ensemble flou F peut être représenté comme un ensemble de paires (élément générique, degré d'appartenance) ordonnées : $F = \{(x, \mu_F(x)) \text{ tq } x \in U\}$.

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 II-3) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels ».



Figure II-3 Représentation graphique d'un ensemble classique (à gauche) et d'un ensemble flou (à droite)

II.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[3],[13].

- 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 $U_1 * U_2 * \dots * U_n$ 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.

II.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 [6][14].

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 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 $T(\text{vitesse})$ peuvent être lente, moyenne, rapide, ... On peut écrire donc :

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

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 40km/h , rapide est interprété comme une vitesse supérieure ou égale à 70km/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 II-2.

II.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), on associe une fonction $\mu_A(x)$ comprise entre 0 et 1, appelée fonction d'appartenance (dite aussi degré d'appartenance, coefficient d'appartenance ou degré de possibilité)[14].

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des vitesses «moyenne». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les vitesses moyenne sont celles limitées entre 40km/h et 70km/h. donne « 0 » pour les vitesses hors de l'intervalle [40km/h, 70km/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.[6][16]

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites «linéaires par morceaux» car elles sont simples. En plus, elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, 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[18].

- Fonction Triangulaire :

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right]$$

- Fonction Trapézoïdale:

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}, 1 \right), 0 \right]$$

- 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 (Figure 3.) défini sur une variable réelle est la

traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière de cette variable (comme «le feu est rouge»).

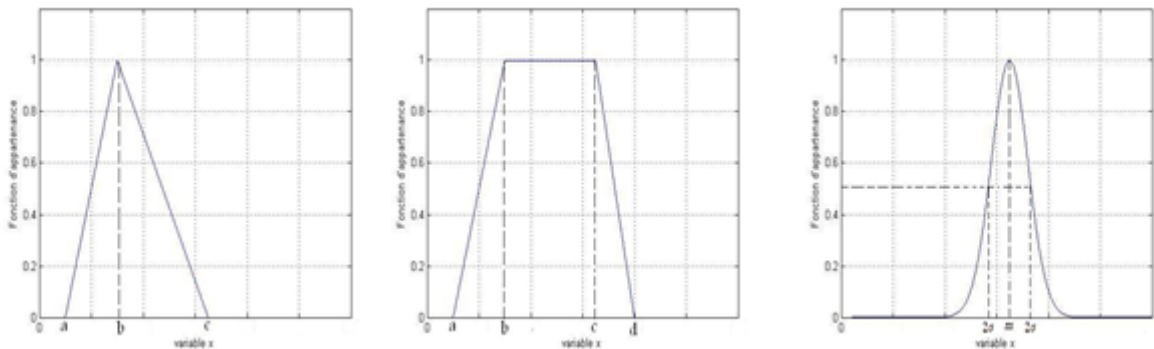


Figure II-4 Différentes formes des fonctions d'appartenance.

II.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» [14][15].

Tableau II-1 Les ensembles d'opérateur

| 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» | $\mu_A(x) \times \mu_B(x)$ | $\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$ | $1 - \mu_A(x)$ |

II.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 ou, 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 prémisse sont vérifiées, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée. Une règle floue aura cette forme [6]:

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 $x_2 \in A_2$...), ou une disjonction «OU» de plusieurs propositions floues ($x_1 \in A_1$ OU $x_2 \in A_2$...). 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 [14] :

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

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 50km/h et la position du feu est notée 35mètre. Ainsi que la traduction du ET par min, voici ce que nous obtenons pour la règle floue.

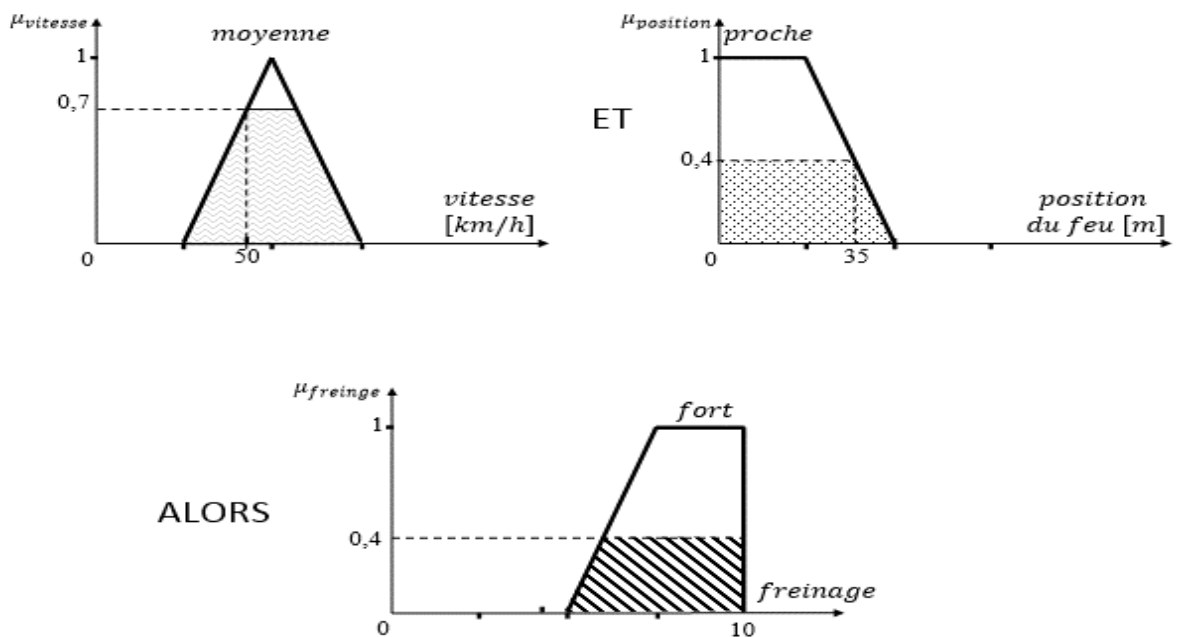


Figure II-5 Exemple d'implication floue avec conjonction «ET» traduite par un « min » .

II.2.7 défuzzification

Comme pour tous les opérateurs flous, le concepteur du système flou doit choisir parmi plusieurs définitions possibles de défuzzifications. 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 des règles floues 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» | «le freinage» est «fort» |
| «ma vitesse» est «élevée» | ET «la position du feu» est «lointaine» | «le freinage» est «doux» |
| «ma vitesse» est «élevée» | ET «la position du feu» est «proche» | «le freinage» est «moyen» |

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 II-6). 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.

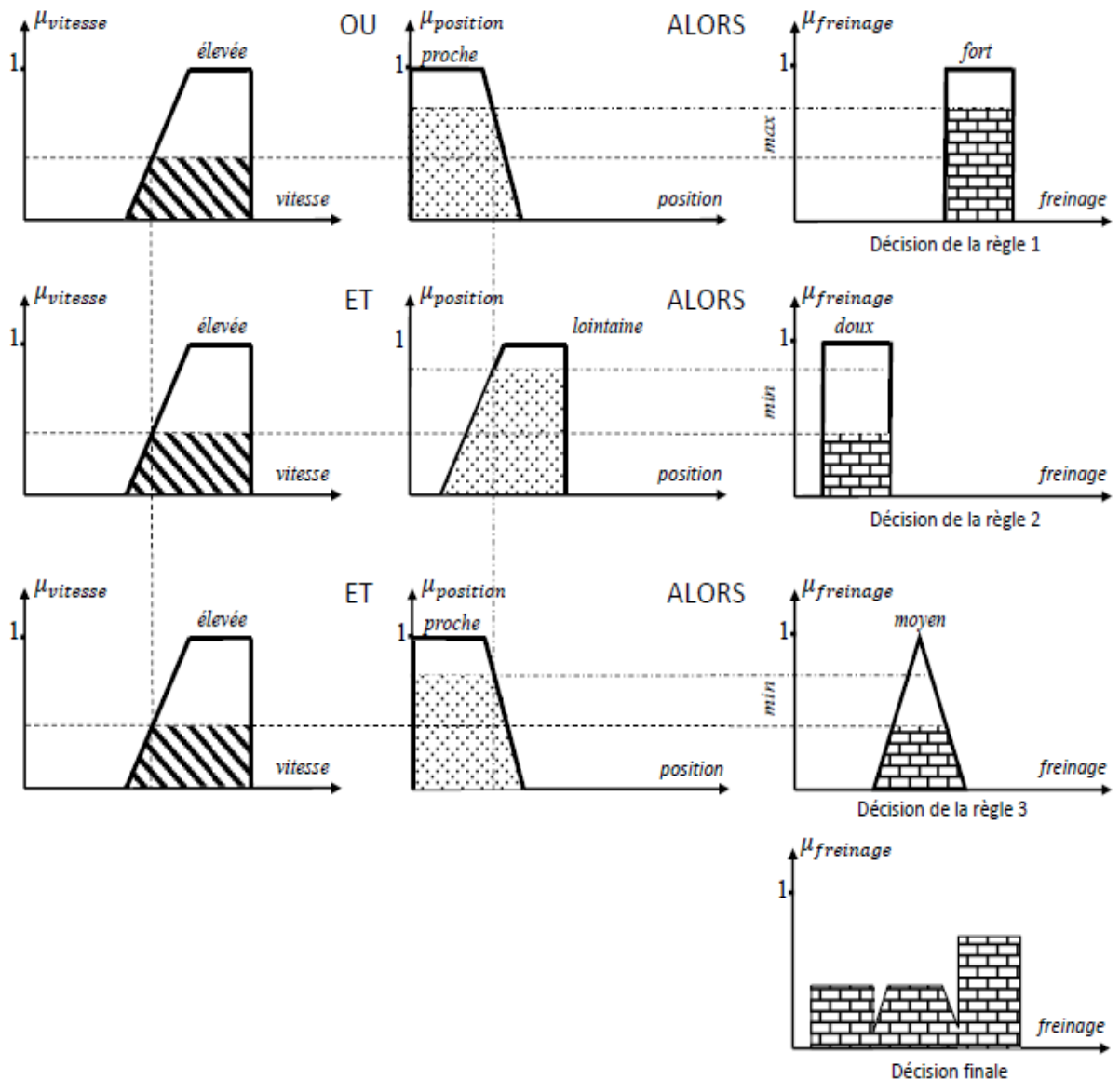


Figure II-6 Exemple d'application de l'ensemble des 3 règles de notre exemple.

Comme nous le voyons, il ne nous reste plus qu'à prendre la décision finale, à savoir quel 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 [16] :

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

$$\text{Où } S = \{z \in \mathbb{R}, \mu(z) = \text{SUP}_{y \in \mathbb{R}}(\mu(y))\}$$

Et R est l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions intermédiaires.

Pour notre exemple, se définit graphiquement ainsi :

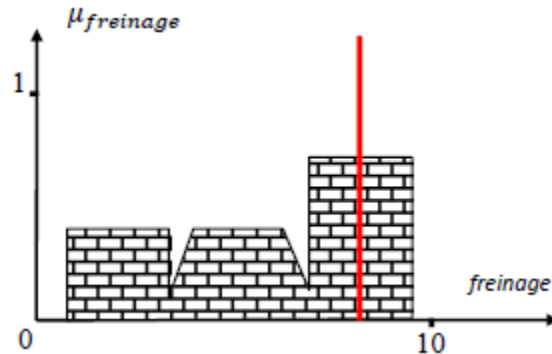


Figure II-7 défuzzification par «moyenne des maxima»

La défuzzification par «centre de gravité» est plus couramment. 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 [16]:

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

Pour les systèmes discrets, Il s'écrit : $Décision = \frac{\sum_i z_i\mu(z_i)}{\sum_i \mu(z_i)}$

Où $S = \{z \in R, \mu(z) = \text{SUP}_{y \in R}(\mu(y))\}$

Et R est l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions intermédiaires.

Pour notre exemple, se définit graphiquement ainsi :

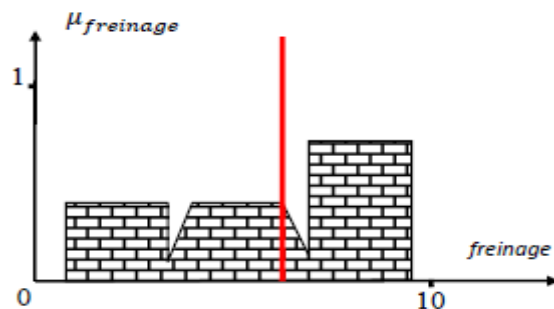


Figure II-8 défuzzification par «centre de gravité»

Cette définition de la défuzzification « centre de gravité » permet d'éviter les discontinuités qui pouvaient apparaître dans la défuzzification « moyenne des maxima », mais est 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.

II.3 Contrôleur flou

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 II-9 [8].

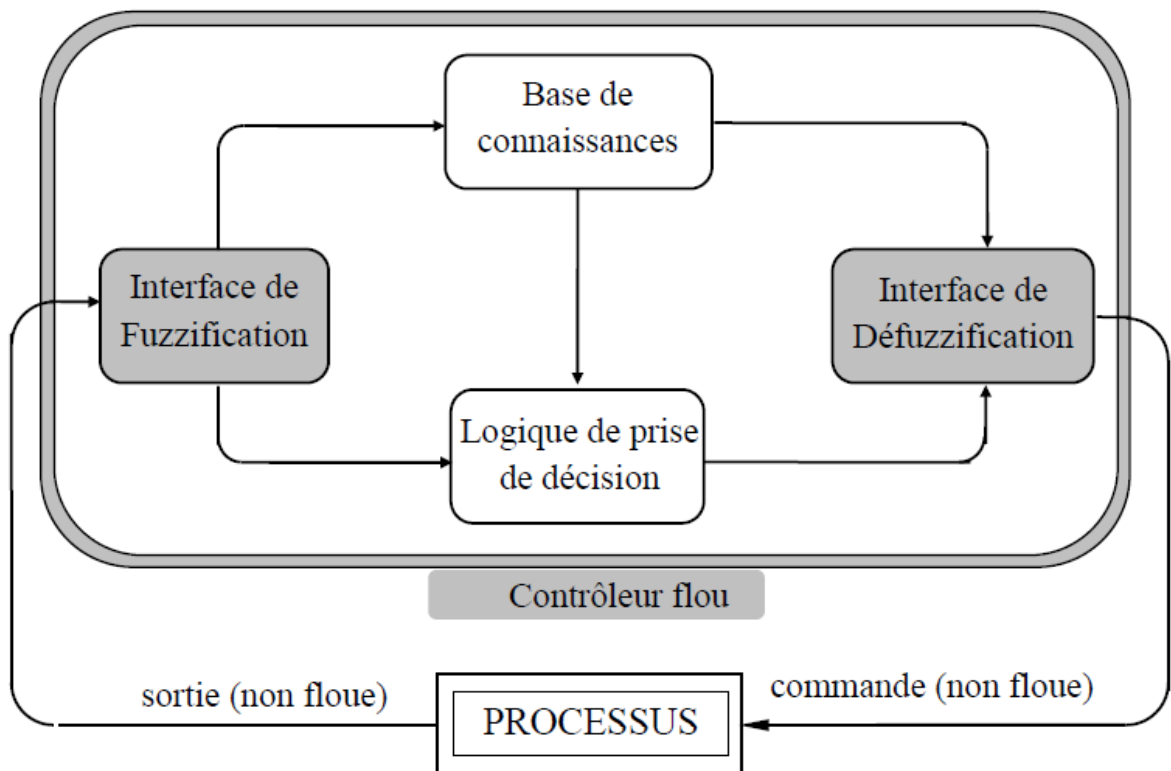


Figure II-9 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.

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 [14]:

- 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 connaissance 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 appropriés.

II.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 [13]:

- 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.

II.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.

II.3.2.1 Base de règles

Un système flou est caractérisé par un ensemble d’expressions linguistiques (règles) basées sur une connaissance d’expert. Cette connaissance est d’habitude représentée sous forme de règles "Si - Alors" simples à implémenter. La collection de ces règles forme ce qu’on appelle matrice d’inférence. La plupart des contrôleurs flous multi-entrées et mono-sorties utilisent des règles d’évaluation d’état de la forme [6] :

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

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 limitait 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.

Tableau II-2 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 | ... | \vdots |
| | A_{12} | C_2 | ... | ... | \vdots |
| | \vdots | ... | ... | ... | \vdots |
| | A_{1n} | ... | ... | ... | C_n |

II.3.2.2 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» (négative grand), «NM» (négative moyen), «EZ» (environ zéro), «PM» (positive moyen) et «PG» (positive grand). Cependant les fonctions d'appartenance sont choisis triangulaires pour «NM», «EZ» et «PM» alors que pour «NG» et «PG» sont choisis trapézoïdales (figure II-11)[15].

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 [6]:

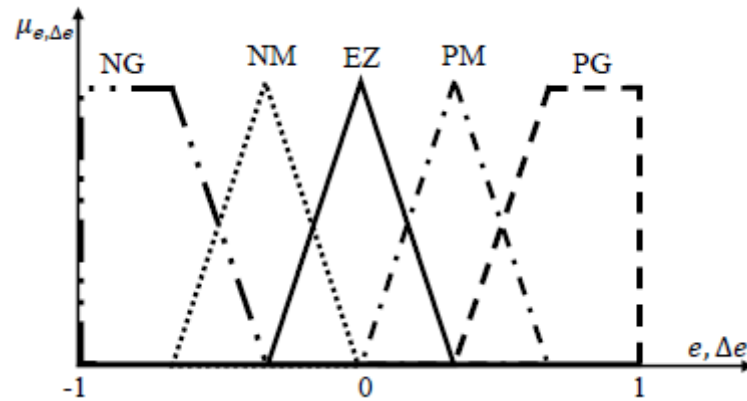


Figure II-11 Fonctions d'appartenance de l'erreur et la variation de l'erreur.

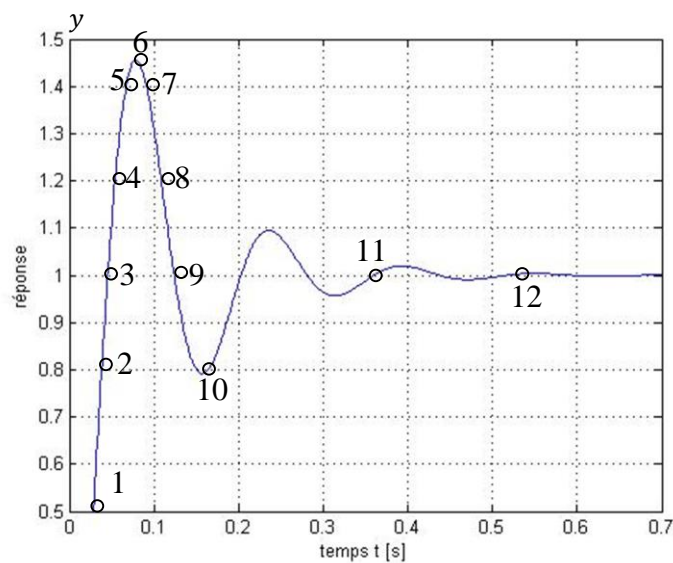


Figure II-12 Localisation des points critiques pour la déduction des règles.

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 :

Tableau II-3 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:

Tableau II-4 Matrice d'inférence de Mac-Vicar Whelan

Δe

| | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|----|
| | NG | NM | EZ | PM | PG |
| NG | NG | NG | NM | NM | EZ |
| NM | NG | NM | NM | EZ | PM |
| <i>e</i> EZ | NM | NM | EZ | PM | PM |
| PM | NM | EZ | PM | PM | PG |
| PG | EZ | PM | PM | PG | PG |

II.3.3 Moteur d'inférence floue

Un contrôleur flou peut être vu comme modèle d'opérateur humain. Plus généralement, prendre une décision d'un être humain avec l'aide de la logique floue et du raisonnement approché. Dans le cas du réglage par logique floue, de prendre une décision finale résultant de plusieurs règles exprimées par des implications floues. Les expressions de la prémisse sont liées par l'opérateur ET. Tandis que les expressions de sortie sont reliées par l'opérateur OU. Afin d'obtenir la variable de sortie de l'inférence, Il existe plusieurs possibilités pour réaliser ces opérateurs qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. Elles déterminent le rôle des différents opérateurs dans une inférence et permettent le traitement numérique de ces relations. Les méthodes d'inférence les plus utilisées dans la régulation floue sont [15][16] :

- Méthode de max-min connue aussi sous le nom Mamdani
- Méthode de max-prod connue aussi sous le nom Larsen
- Méthode de somme-prod connue aussi sous le nom Zdeh

Considérons un ensemble de n règles définies par: { règle $N^{\circ}1$: Si x_1 est A_1 et x_2 est B_1 Alors y est C_1 Règle $N^{\circ}2$: Si x_1 est A_2 et x_2 est B_2 Alors y est C_2 .: Règle $N^{\circ}n$: Si x_1 est A_n et x_2 est B_n Alors y est C_n

Les entrées sont mesurées, estimées ou captées donc elles sont réelles. La valeur réelle de chaque entrée est considérée comme un singleton flou. $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ sont les degrés de confiance des règles R_1, R_2, \dots, R_n . Le i ème facteur est exprimé par: $\alpha_i = \mu_{A_i}(x_o) \nabla \mu_{B_i}(x_o)$

Où:

- $\mu_{A_i}(x_0)$ et $\mu_{B_i}(x_0)$: c'est le degrés d'appartenance de x_i à l'ensemble A_i .
- ∇ : c'est l'opérateur défini selon le type de contrôleur.

II.3.3.1 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 i ème règle : $\mu_{R_i} = \min[\alpha_i, \mu_{C_i}(y)]$

Avec $\alpha_i = \min[\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_i}(x_0)]$

Et pour la conclusion finale de tous les règles : $\mu_{final}(y) = \max(\mu_{R_i}, i=1, \dots, n)$

II.3.3.2 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 minimum. Alors que l'implication est traduite par la relation produit. Le degré de vérité de la i ème règle : $\mu_{R_i} = \alpha_i \times \mu_{C_i}(y)$

Avec $\alpha_i = \min[\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_i}(x_0)]$

Et pour la conclusion finale de tous les règles est la même que celle de Mamdani: $\mu_{final}(y) = \max(\mu_{R_i}, i=1, \dots, n)$

II.3.3.3 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 i ème règle : $\mu_{R_i} = \alpha_i \times \mu_{C_i}(y)$

Avec $\alpha_i = \mu_{A_i}(x_0) \times \mu_{B_i}(x_0)$

Et pour la conclusion finale de tous les règles : $\mu_{final}(y) = \frac{1}{n} \sum \mu_{R_i}, i=1$

II.3.3.4 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 tous les règles est la moyenne pondérée des conclusions de chaque règle.

II.3.4 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 $\mu_R(y)$. 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 [6]:

- 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 $\mu_{final}(y)$ 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.

II.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases nécessaires à la compréhension de la logique floue. Cette dernière est une méthode moderne et connue par sa robustesse, sa rapidité de convergence et ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique.

De nombreuses possibilités d'utilisation de cette technique existent, parmi elles la machine asynchrone et sa commande. Nous la comparerons donc de manière objective aux méthodes classiques.

**CHAPITRE III.COMMANDE PAR LA
LOGIQUE FLOUE D'UN
SYSTEME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE**

III.1 Introduction

L'objectif de ce dernier chapitre est d'appliquer la commande par la logique floue à notre système de pompage photovoltaïque. Notre système est constitué d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV). Deux stratégies de commande ont été mises en œuvre. La première est basée sur le contrôle de courant et de tension photovoltaïque pour assurer le fonctionnement du GPV à sa puissance maximale via la commande MPPT de type « CLF ». La deuxième, utilise le concept de la logique floue pour contrôler le moteur asynchrone qui entraîne la pompe pour avoir un débit réglable. Nous avons effectué une comparaison entre deux méthodes MPPT à savoir la méthode P&O et la méthode à base de logique floue. Enfin nous avons testé la robustesse de la commande du système de pompage photovoltaïque.

III.2 Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque

Dans cette partie on s'intéresse à l'optimisation d'un système photovoltaïque par logique floue. Nous allons présenter une méthode de MPPT qui utilise la théorie de la logique floue, pour remédier au problème d'oscillation de la méthode perturbation et observation. L'algorithme flou proposé optimise l'amplitude de la perturbation pour minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide et sans oscillations.

Le schéma de principe pour l'optimisation du système, est représenté par la figure (III-1). Il reçoit comme entrées la variation de la tension et de la puissance de générateur photovoltaïque ΔV_{pv} , ΔP_{pv} CE(k) du système ; pour la sortie le contrôleur flou détermine l'incrément ou le décrement optimal qui doit être ajouté à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal MPP.

Nous allons simuler maintenant la méthode de recherche de la puissance maximale par la logique floue en la comparant avec celle obtenue par la méthode (P&O) [19].

La figure suivante montre comment les deux contrôleurs MPPT convergent vers le point à puissance maximale. Il est remarquable que le contrôleur "CLF" converge sans oscillations à l'inverse du contrôleur "P&O". Ce dernier provoque des oscillations à fréquence élevée qui peuvent influencer sur le fonctionnement du système de pompage

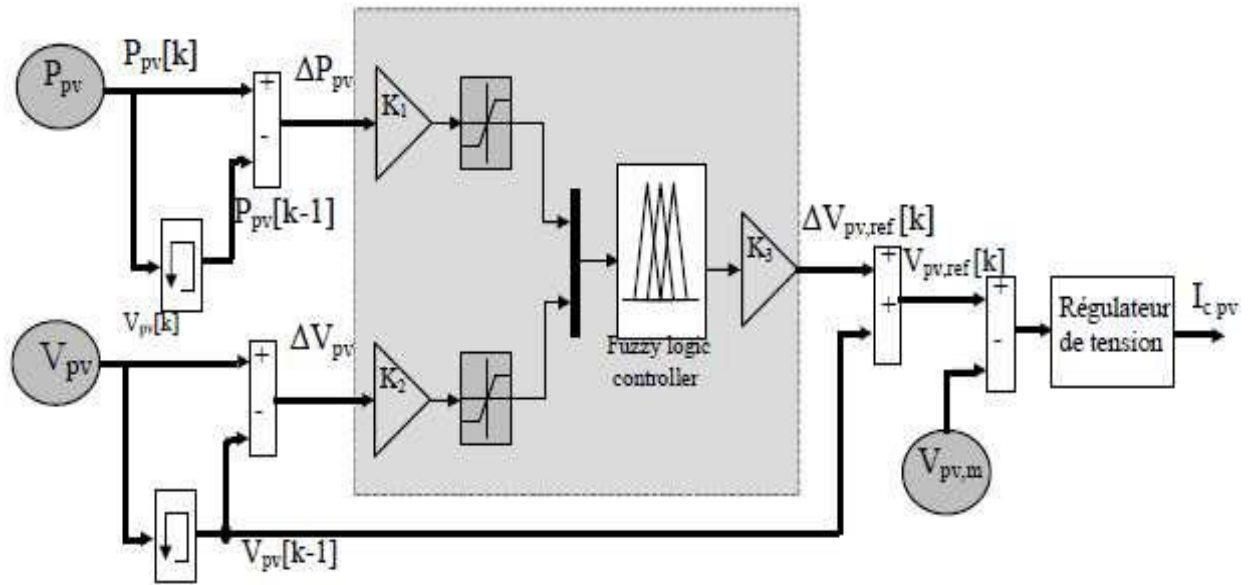


Figure III-1 Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.

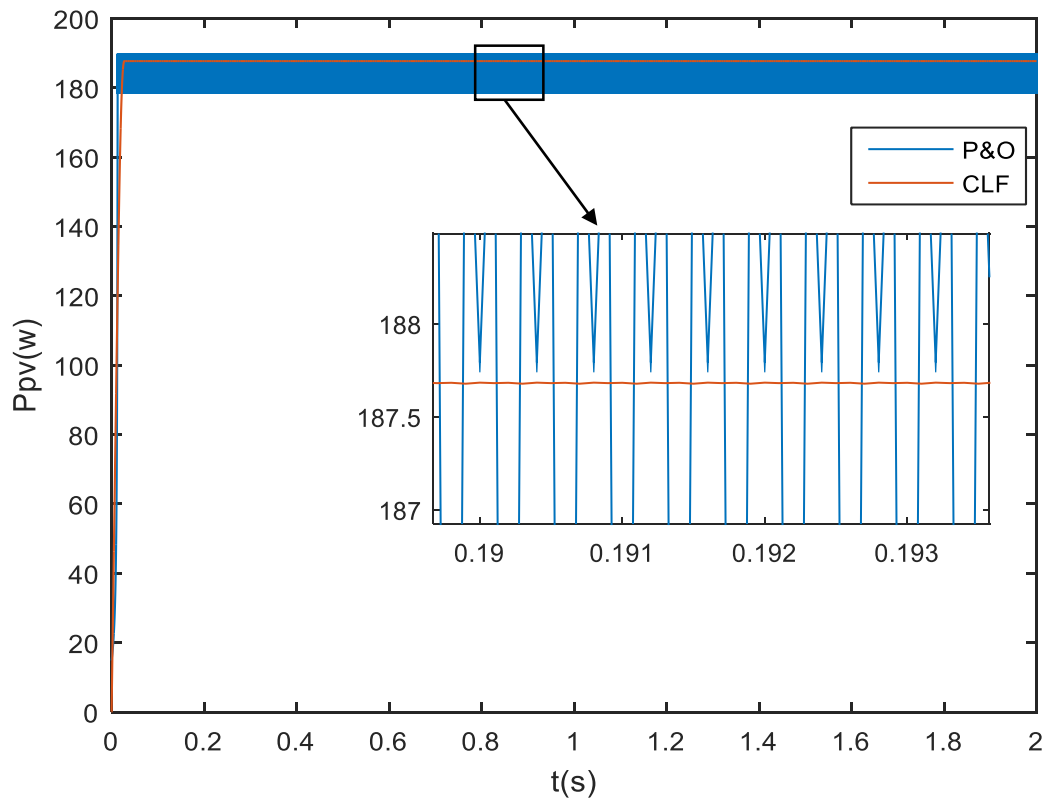


Figure III-2 Allure de la puissance photovoltaïque..

La figure (III-3) montre que les deux contrôleurs convergent vers le point MPP correspondant aux conditions météorologique.

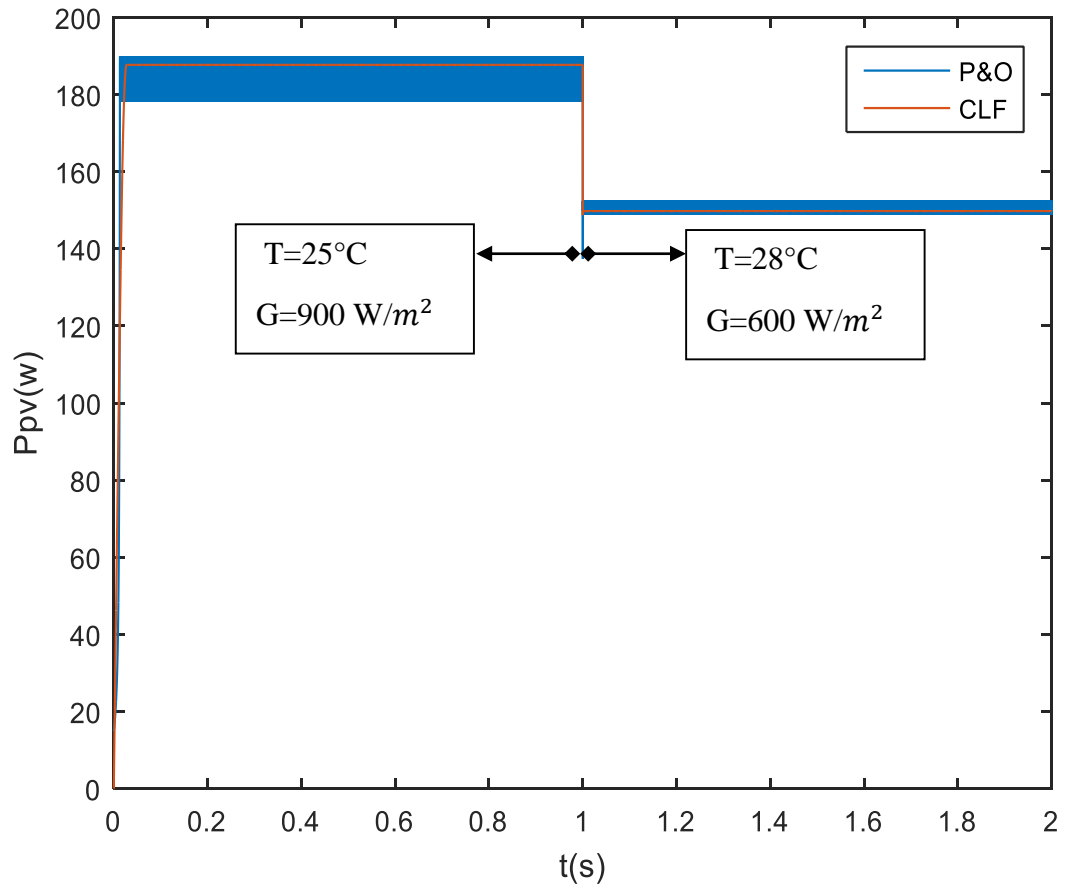


Figure III-3 Recherche du point MPP sous différent condition météorologique.

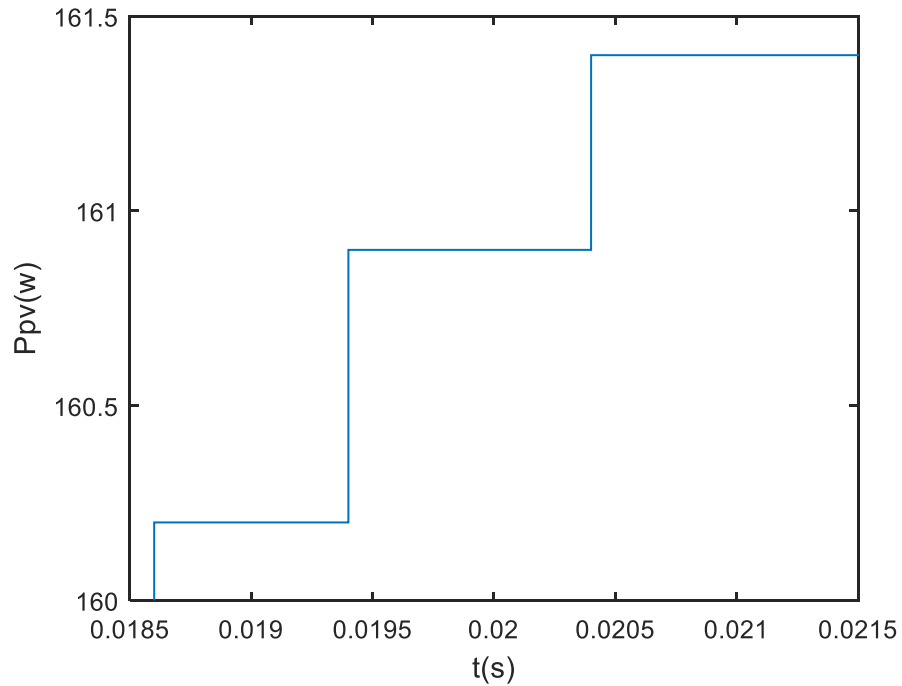


Figure III-4 opération de recherche du point MPP du contrôleur par logique floue

Comme il est clairement présenté dans les figures (III-4). Le contrôleur flou détermine à chaque instant l'incrément optimal nécessaire pour un fonctionnement au point de puissance maximale.

III.3 Commande du système de pompage photovoltaïque

Afin de mieux tester les performances de la logique floue pour le contrôle du débit de la pompe, nous avons remplacé les correcteurs PI de la figure I-2 par des correcteurs de la logique floue. Le schéma de principe est le même que celui utilisé au premier chapitre.

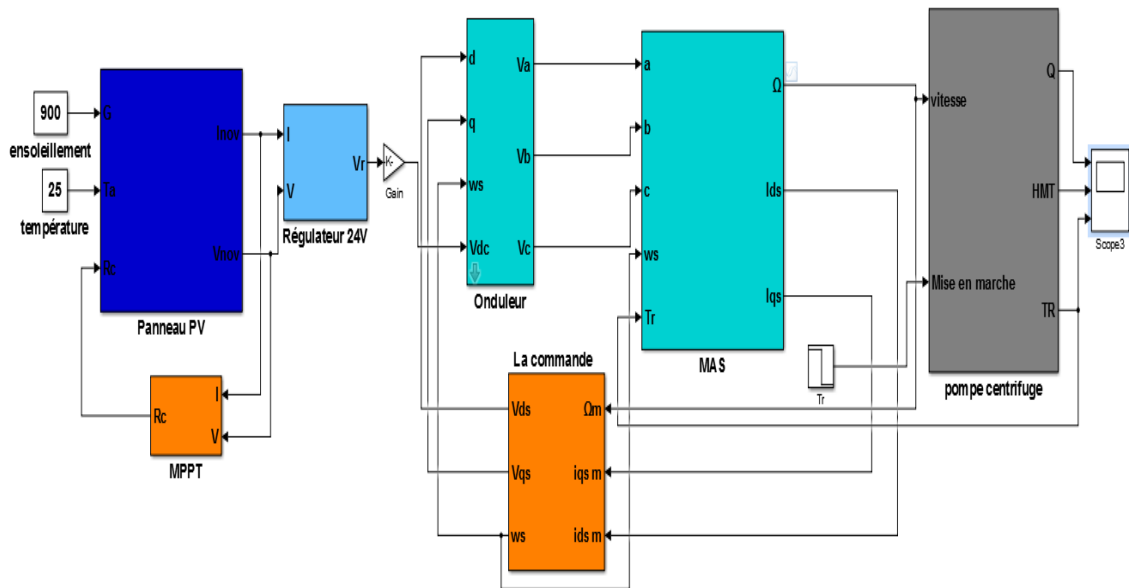


Figure III-5 : Bloc de simulation global du système de pompage contrôlé par logique floue.

L'univers de discours des variables d'entrées et de sortie du contrôleur est divisé en cinq sous-ensembles (NG, NM, EZ, PM, PG) de forme triangulaire et trapézoïdale (figure III-6).

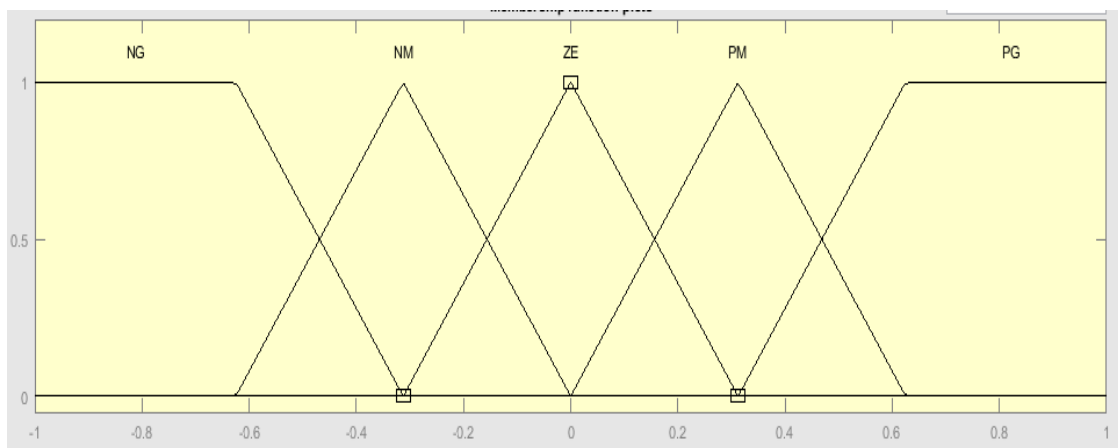


Figure III-6 Fonctions d'appartenance utilisées

Pour voir les performances du système de pompage contrôlé par la logique floue, on commence l'opération de pompage. La figure III-7 montre l'évolution de la vitesse de la machine asynchrone au-cours du pompage. Il est clair que la vitesse s'établit à sa valeur de référence (150 rd/s) après un très court régime transitoire.

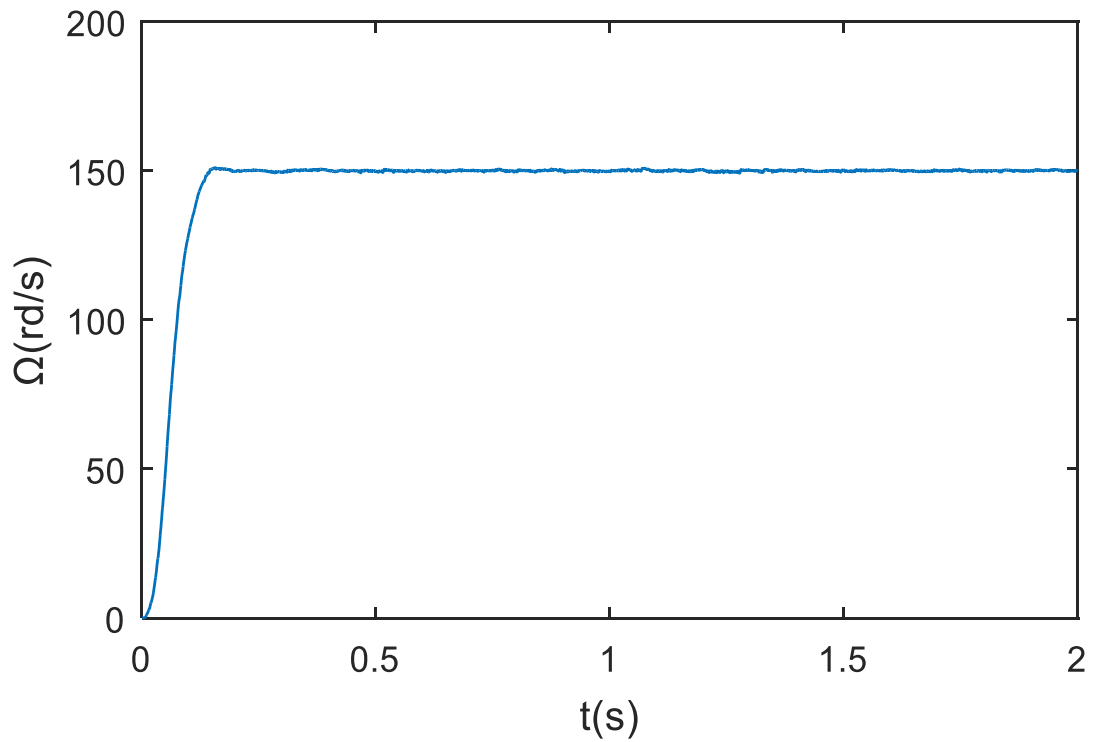


Figure III-7 La vitesse de la machine asynchrone

L'évolution du débit d'eau pompe est relié directement à la vitesse de rotation du moteur. Puisque la vitesse est bien contrôlée. Ceci permet d'optimiser l'opération de pompage.

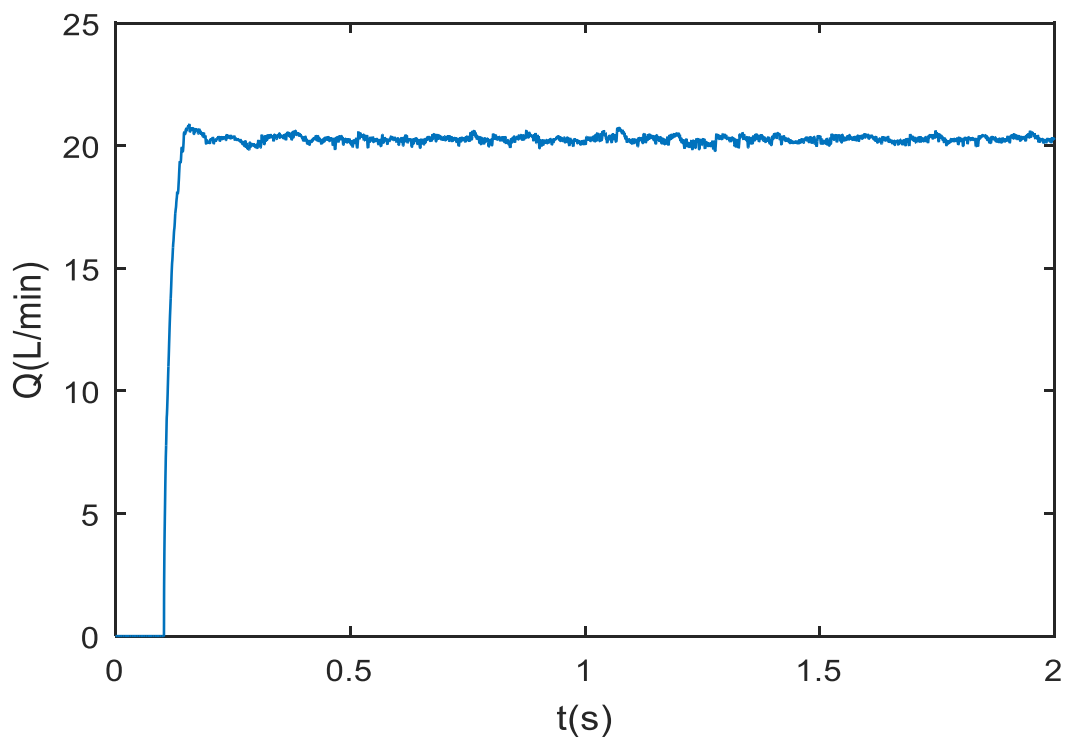


Figure III-8 Le débit d'eau.

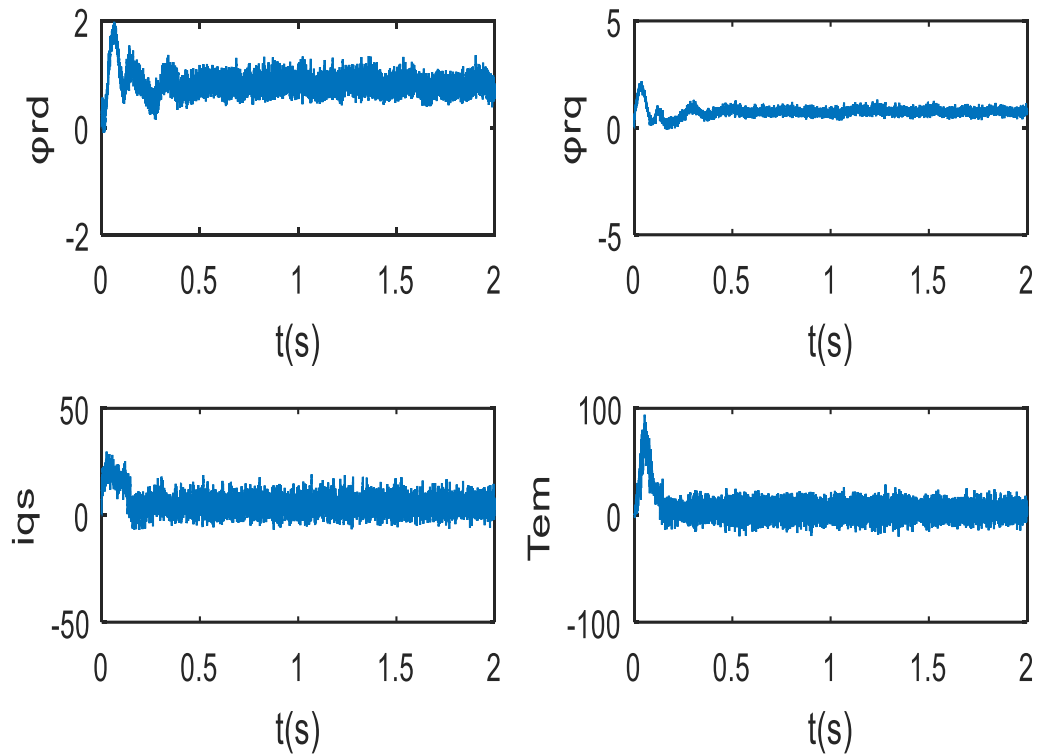


Figure III-9 L'orientation du flux rotorique

III.4 Comparaison entre la commande classique et la commande floue

La figure suivante montre l'évolution de la vitesse pour les deux cas de commande classique et un contrôleur flou (RLF)

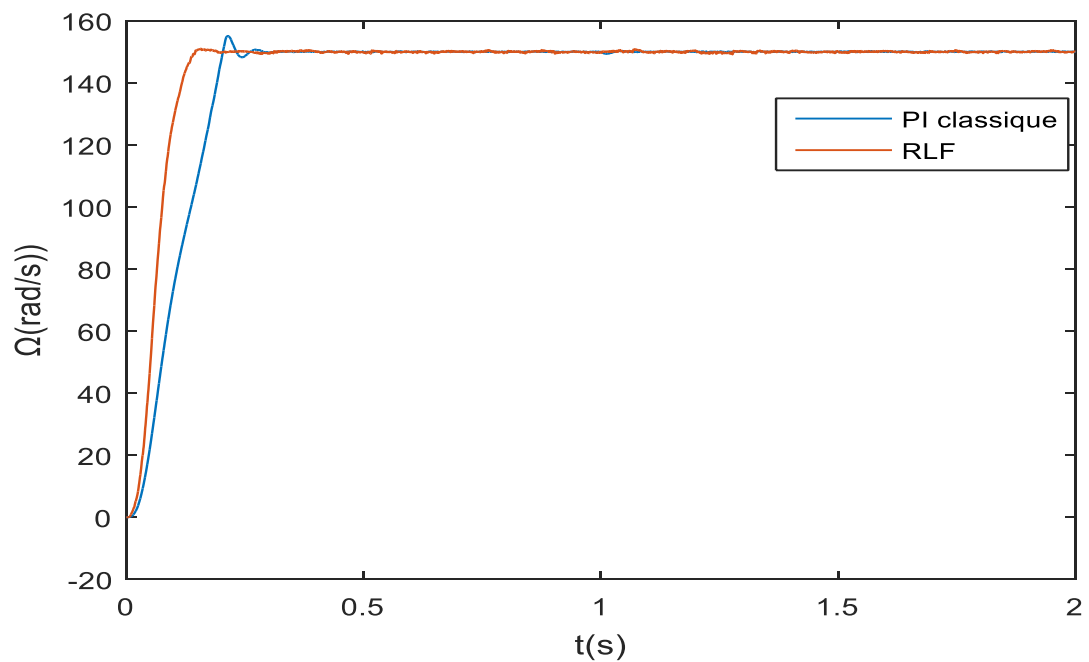


Figure III-10 La vitesse du moteur asynchrone obtenue par PI et RLF.

On constate aussi que le réglage conventionnel à base de régulateur proportionnel intégrateur (PI) donne des performances inférieures, par rapport au régulateur flou vis-à-vis de la rapidité et le dépassement. Donc un RLF est plus performant qu'un régulateur classique de type PI.

III.5 Testes de robustesse

Pour tester la robustesse de la commande par logique floue, nous allons simuler le système de pompage pour des différentes conditions de fonctionnement.

III.5.1 L'effet de l'éclairement :

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.

Ici intervient le rôle de batteries du système photovoltaïque. La réduction de l'irradiation entraîne une diminution de la puissance MPPT extraite du panneau. Ainsi pour garder le même débit, le manque de puissance doit être comblé du système de stockage.

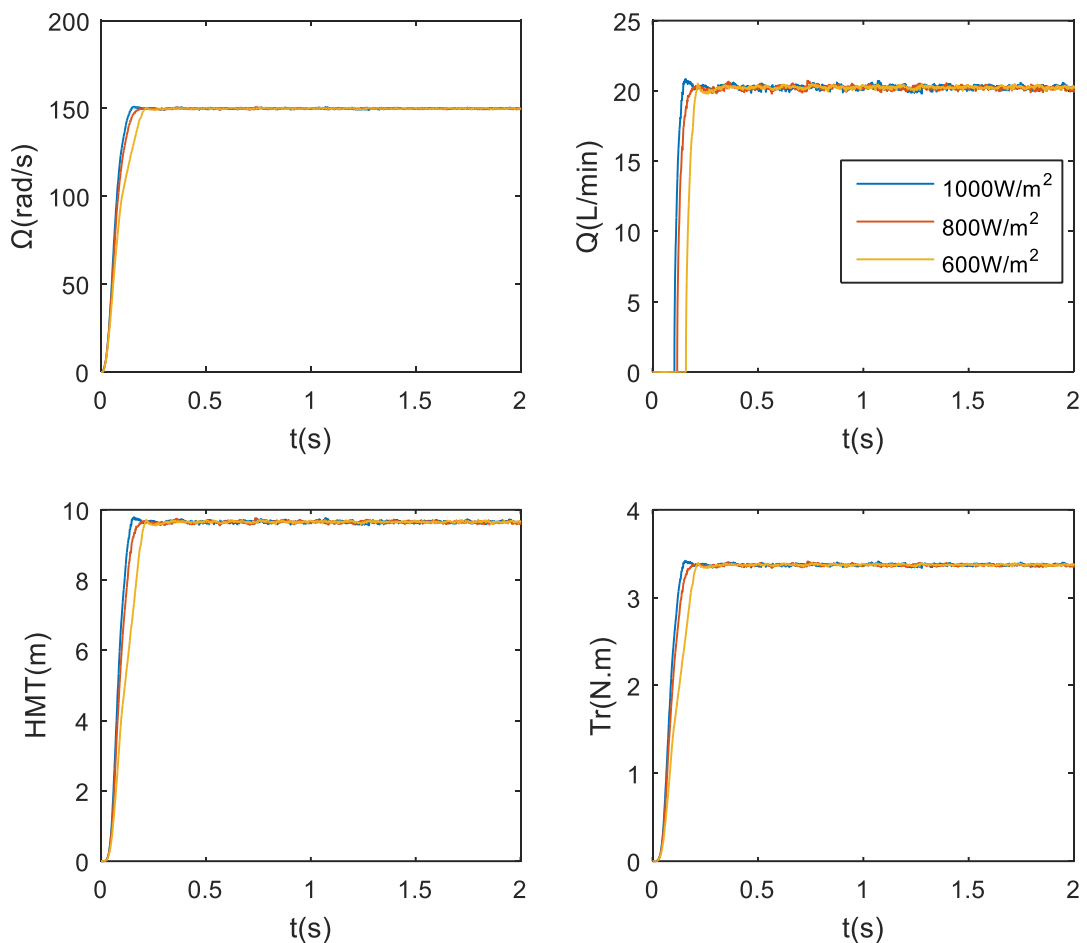
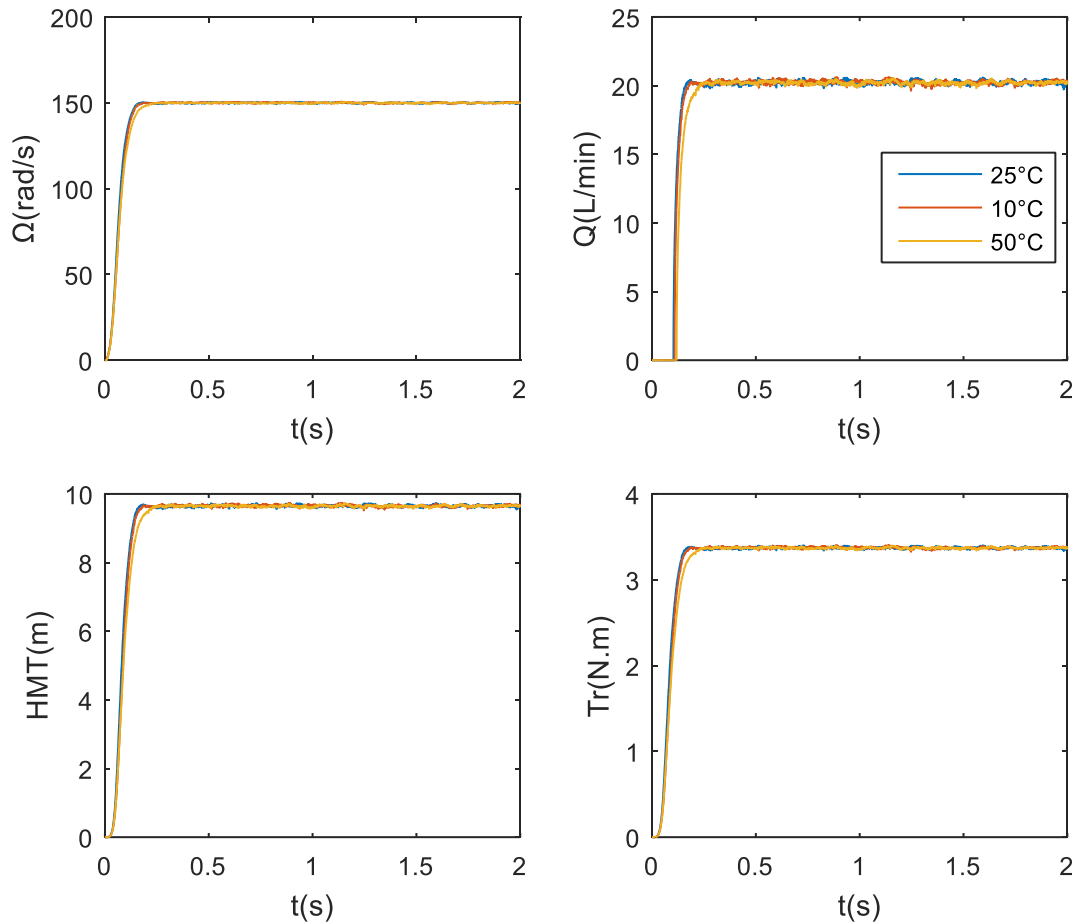


Figure III-11 Influence de l'ensoleillement sur la vitesse de la MAS à température constante.

III.5.2 L'effet de la température

La température est un paramètre très important dans la caractéristique des cellules solaires. Elle a une influence sur le comportement du système de pompage.

*Figure III-12 Influence de la température à l'ensoleillement constant.*

III.5.3 L'effet de la résistance rotorique

Pour tester la robustesse de cette commande aux variations des paramètres, nous avons tester la variation de la résistance rotorique.

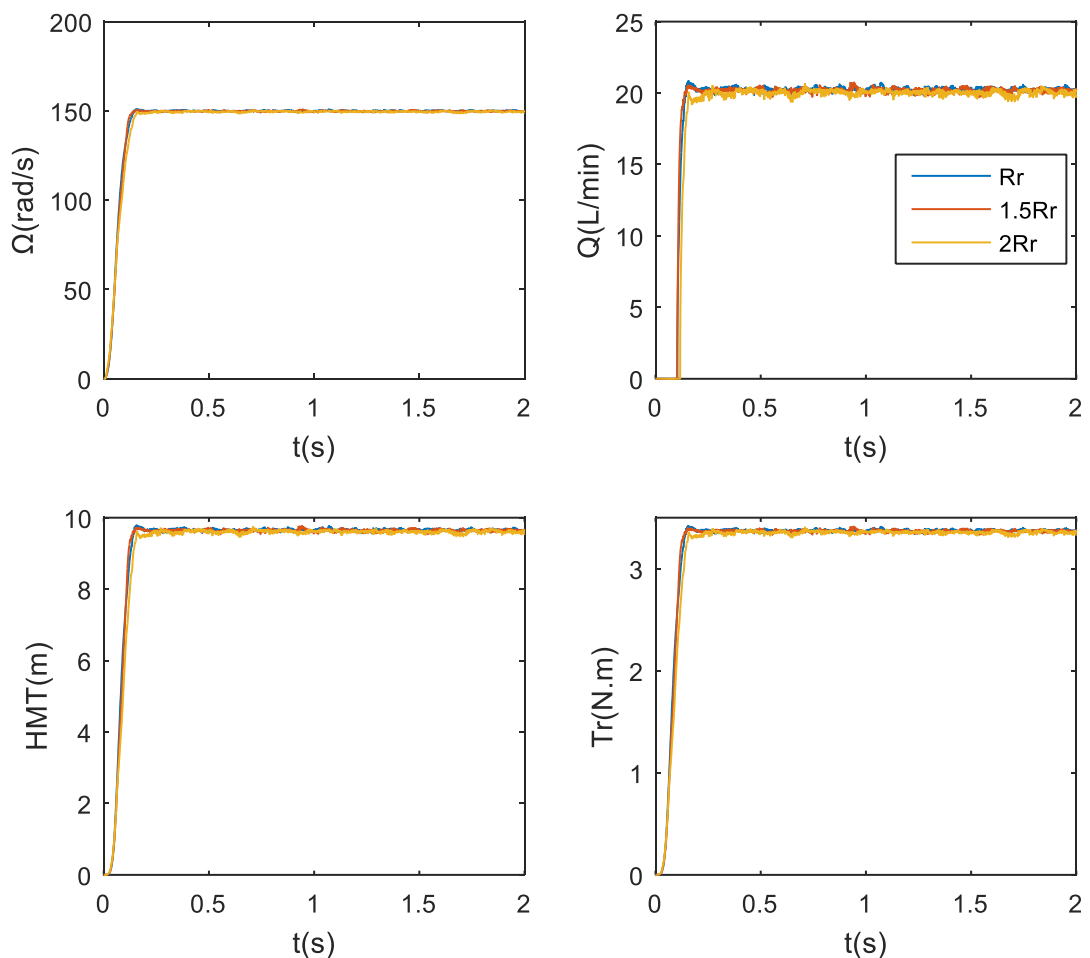


Figure III-13 Influence de la résistance rotorique.

Il est remarquable que les performances du système sont presque insensibles à la variation de la résistance rotorique. Ceci est due à la non nécessité du modèle mathématique pour les systèmes flous.

III.5.4 Interprétation des résultats

Les tests de robustesse ont prouvé que la commande permet de faire fonctionner la machine avec de bonnes performances dynamiques et statiques face aux variations des conditions de fonctionnement.

Ces résultats de simulation ainsi montrent clairement une meilleure robustesse de la commande floue par rapport à la commande classique vis-à-vis de la variation de la résistance rotorique R_r et de la perturbation externe.

III.6 Conclusion :

Au cours de ce chapitre la commande par la logique floue du système de pompage photovoltaïque a été appliquée et simulée par le logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons utilisé une technique MPPT pour extraire la puissance maximale du GPV par contrôleur de la logique floue. Cette dernière est aussi appliquée en vue d'améliorer les performances de pompage solaire. La logique floue s'adapte mieux avec les systèmes de pompage photovoltaïque et présente de très bonnes performances vis-à-vis la rejet de perturbation et la poursuite de référence.

Conclusion générale

Conclusion

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons appliqué la commande robuste à base de la logique floue à un système de pompage photovoltaïque, deux contrôleurs floue ont été utilisés, l'un pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque extraite des panneaux PV et l'autre pour la commande de la vitesse de la machine asynchrone et ainsi le débit de la pompe.

En premier lieu nous avons donné les principes de bases de la commande vectorielle directe par orientation de flux rotorique, qui permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique de la machine asynchrone. Ceci a rendu le moteur asynchrone se comporte exactement comme un moteur à courant continu ou le flux est contrôlé par la composante du courant statorique selon l'axe directe et le couple est contrôlé par l'autre composante du courant. Ceci permet par conséquent de contrôler le débit quel que soit la hauteur manométrique totale de la station de pompage photovoltaïque. Cette technique est relativement robuste vis-à-vis de la perturbation extérieure et la variation paramétrique.

L'introduction la technique de la logique floue pour maximiser la puissance extraite du panneau PV et pour contrôler le débit de la pompe, a énormément amélioré les performances du système de pompage. En plus d'éviter les oscillations du régulateur MPPT, la logique floue a rendu notre système presque insensible aux perturbations et aux variations paramétriques.

L'étude abordée dans ce travail et loin d'être achevée. Nous pouvons propose comme perspectives :

- La réalisation pratique de notre système.
- L'application de la commande étudiée pour un système de pompage au fil du soleil.

Références bibliographiques

1. M.A. Khalfa, "Commande vectorielle indirecte d'une pompe centrifuge photovoltaïque au fil de soleil," *Revue des énergies renouvelables CICME'08 Sousse* (2008) 163 – 175.
2. L.Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones, et des algorithmes génétiques », thèse de doctorat en génie électrique, université Henri Poincaré, Nancy-I, 1999.
3. L. BOUDRAHEM, L. DJOUADI « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire Master université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012.
4. *S.REZGUII* , " TECHNIQUES DE COMMANDE AVANCÉES DE LA MACHINE ASYNCHRONE : ÉTUDE COMPARATIVE ET APPLICATIONS," *THÈSE Doctorat en sciences de l'université DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE, 2015.*
5. B. K. Bose, Ed., *Power Electronics and Variable Frequency Drives*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996.
6. A.G. Aissaoui, H. Abid, M. Abid, A.Tahour « Commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée », *Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. et Energ*, Vol. 52, p 89-103, 2007, Bucarest.
7. A. Chikhi « Commande direct du couple du moteur asynchrone-apport de la logique floue ». Mémoire Magister université Batna, 2008.
8. M. Tacao, "Commandes numérique de machines asynchrones par logique floue", these de PHD, Université de Lava- faculte des science et de genie Quebec, 1997.
9. *R.AMROUCHE ,S.BEDJOU* , " Contrôle d un système de pompage photovoltaïque," *Mémoire de master de l'université de Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2015.*
10. G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector controlled induction motor drive," in *Proc. IEEE-IECON Conf.*, Maui, HI, pp. 1168–1174, Nov. 1993
11. Eltamaly AM, Alolah AI, Basem MB (2010) Fuzzy Controller for Three Phases Induction Motor Drives. In: *International conference on Autonomous and Intelligent Systems (AIS)*, pp 1-8.
12. V. Chitra, and R. S. Prabhakar, "Induction Motor Speed Control using Fuzzy Logic Controller", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006.
13. *H.BOUZID, S.BENMERIEM* , " *Application de la technique de la logique floue pour la prédiction de l'amorçage des intervalles d'air pointes-plans,*" *Mémoire de master de l'université de Ourgla, 2013.*
14. *I.Laghouag* , " *Commande par logique floue type -2-appliquée à la machine asynchrone,*" *Mémoire de master de l'université de M'SILA, 2016.*
15. *N.KHENGAOUI , N.KHENGAOUI* , " *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation,*" *Mémoire de master de l'université de Ouargla, 2015.*

Références

16. *M. Laamayad Tahar* , “ Commande Optimale d’une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue, ” *Mémoire de magister de l’université de Batna, 2008.*
17. M. N. Uddin, T. S. Radwan, and M. A. Rahman, “Performances of fuzzylogic-based indirect vector control for induction motor drive,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 1219–1225, Sep. 2002
18. Zhao, J., & Bose, B. K. (2002). Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled inductive motor drive. *Proceeding Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Spain*, 4, 229–234.
19. *S.MOHAMMED BELHADJ* , “ Etude et réalisation d un système de pompage photovoltaïque, ” *Mémoire d’ingénieurs de L’Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, 2019.*