

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie électrique »

Option :

« Automatique des systèmes de production »

Titre :

Réalisé par :

Encadré par :

**Conception d'un contrôleur flou
pour un système de climatisation**

MOKHTARI Anis

Mr.IKNI Samir

KOLLA Ismail

Année universitaire : 2016-2017

Remerciements

***J**e remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.*

J'adresse mes sincères remerciements à tout mes enseignants de L'université de Djilali bounaama, notamment à mon promoteur Mr.ikni samir d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à Mme Bounif et Mr Benrebaaya, d'avoir bien voulu de me faire profiter pleinement de ces compétences scientifiques et de ses idées pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Mes vives salutations.

Dédicace

A qui puis-je dédier ce travail, à mes très chers parents, dont le sacrifice, la patience ; le soutien ; l'aide et les encouragements sont le secret de ma réussite.

Sans eux je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également à mes chers frères : Rafie, Youcef, Nasrredine.

A tous les membres de la famille Mokhtari.

A mes amis Berdi Aek, Benkhedouma M, Rabahi A, Bouzian N, Touari W, Mazouzi K, Hassani F et à ma

**Classe ASP avec qui j'ai
Partagé des moments inoubliables à l'Université.**

A ceux avec qui je partage de bons souvenirs. A tous ce que j'aime et tous qui m'aiment. A tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.

Et en particulier à mon binôme Ismail et sa famille.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma mère que dieu la protège.

A la mémoire de mon père et mes grands parents.

A toute la famille Kolla

A tous mes amis et mon binôme Anis

A tous mes camarades avec qui j'ai partagé des moments inoubliables à l'Université.

***A ceux avec qui je partage de bons souvenirs. A
Tous ce que j'aime et tous qui m'aiment.***

***A tous ceux et celles dont les noms n'ont pu être
cités***

ملخص:

هذه المذكرة تقدم نتائج دراسة ومحاكاة لنظام التكييف المركزي حيث استخدمنا اثنين من وحدة التحكم في هذه المحاكات.

خلال فترة عملنا هذه كانت لنا الفرصة في التعرف على منظم غامض (تحكم غامض) ومنظم من نوع (متناسب ومتكامل ومشتق).

كما قمنا بعمل بتركيب هذين النظامين على نظام التكييف وقمنا بمحاكاته عن طريق استخدام برنامج مطلب.

وكان الهدف من هذا العمل هو الحفاظ على درجة الحرارة في جميع انحاء المرجعية المختارة ولاحظنا في الاخير ان المنظمين لهما نفس وقت التسوية ولكن وحدة التحكم الغامض لها لديه الكلمات المفتاحية: منظم غامض. منظم من نوع (متناسب ومتكامل ومشتق) برنامج مطلب.

Résume :

Ce mémoire concerne l'étude et la simulation du système de climatisation central où nous avons utilisé deux commandes dans ces simulations.

Au cours de cette période de notre travail, nous avons eu l'occasion d'identifier un commande d'un logique floue (contrôle flou) et régulateur du type (proportionnel et intégral, dérivée).

Nous avons également installé ces deux systèmes fonctionnent sur le système de climatisation et nous simuler en utilisant le programme Matlab.

Le but de ce travail est de maintenir la température autour de la référence choisie et nous remarqué dans ce dernier que les contrôleurs ont le même temps de stabilisation, mais le contrôleur floue a un plus.

Mots-clés : régulateur flou, régulateur PID (proportionnelle, intégrale, dérivée), programme Matlab.

Abstract:

This paper deals with the study and simulation of the central air conditioning system where we used two commands in these simulations.

During this period of our work, we had the opportunity to identify a control of a fuzzy logic (fuzzy control) and regulator of the type (proportional and integral, derivative). We also installed these two systems run on the air conditioning system and we simulate using the Matlab program.

The goal of this work is to keep the temperature around the chosen reference and we noticed in it that the controllers have the same stabilization time, but the fuzzy controller has a plus.

Keywords: fuzzy controller, PID controller (proportional, integral, derivative), Matlab program.

Table de matières

Dédicaces anis	i
Dédicaces Ismail	ii
Liste des abréviations	x
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Remerciements	iii
Résumé :	iv
Table de matières	v
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes de climatisation	3
I.1. Introduction :	3
I.2. Historique :	3
I.3 Définition et principe de fonctionnement d'un système de climatisation :	4
I -4 Climatiseur centralisé	5
I.5. Les avantages de la climatisation centralisée	6
I.6. Les inconvénients de la climatisation centralisée	6
I.7. Conclusion	6
Chapitre II : la Logique Floue	8
II.1. Introduction	8
II.2. La logique floue	8
II.3. Les différents types de la commande à base de la logique floue	13
II.4. Réglage, stabilité et robustesse d'un contrôleur flou	18
II.5. Propriétés d'un réglage par logique floue	21
II.6. Conclusion	21
Chapitre III : la Logique Floue	8
III -1 Introduction	24
III -2 Définition	24
III -3 Principe général	24
III.4 LES DIFFERENTES ACTIONS	26
III.5 Réglage d'un PID	28
III.6 Conclusion	30
Chapitre IV : Simulation sous Matlab d'un système de climatisation	32
IV.1 Introduction	32
IV.2 Présentation du logiciel MATLAB	32
IV.3 Interface graphique	32
IV.4 Simulation	32
IV.5 Les Résultats De simulation	42
IV.6. Conclusion	48

Conclusion : -----	50
Références bibliographiques : -----	52

Liste des figures

Chapitre II :

Figure II -1– Structure de base d’un contrôleur floue	10
Figure II -2– Structure générale d’une commande neuro-floue	16

Chapitre III :

Figure III-1– architecture parallèle d’un correcteur pid	24
Figure III-2– Réponse indiciel d’un régulateur P	26
Figure III.3 - Réponse indiciel d’un régulateur I	27
Figure III.4 - Réponse indiciel d’un régulateur D	28
Figure III.5 – La réponse type d’un procédé stable	29

Chapitre IV :

Figure IV -1– Navigateur de la bibliothèque Simulink	33
Figure IV -2– Le Système de climatisation sous étude	34
Figure IV.3 - Le système de contrôleur floue	35
Figure IV.4 - Modèle de la valve.	35
Figure IV.5 – Le système de contrôleur floue	36
Figure IV -6– Éditeur de fonction d’appartenance pour l’entrée ‘e’	37
Figure IV -7– Éditeur de fonction d’appartenance pour l’entrée ‘ de ’	38
Figure IV.8 - : Éditeur de fonction d’appartenance pour la sortie ‘ s ’	39
Figure IV.9 - Observateur de règles.	40
Figure IV.10 – Observateur de la surface	41
Figure IV -11– le graphe de Modèle de la valve	42
Figure IV -12– le graphe de L’entrée ‘de’ de controleur flou	43
Figure IV.13 - le graphe de L’entrée ‘e’ de contrôleur flou	43
Figure IV.14 - le graphe de Température désirée	44
Figure IV.15 – le graphe de L’entrée du régulateur PID	44
Figure IV -16– le graphe de La Sortie’ de contrôleur Flou.....	45
Figure IV -17– le graphe de Modèle de la valve	45

Figure IV.18 - : le graphe de L'entrée 'de' de contrôleur floue	46
Figure IV.19 - le graphe de L'entrée 'e' de contrôleur floue	46
Figure IV.20– le graphe de la Température désirée	47
Figure IV.21 – le graphe de la sortie de contrôleur pid	48
Figure IV -22– le graphe de la sortie's' de contrôleur floue	48

Liste des tableaux

<i>Numéro</i>	<i>Tableau</i>	<i>Page</i>
Tableau III-1.	La réponse des paramètres du PID	29
Tableau IV-1	Les valeurs d'un contrôleur PID	34

Liste des abréviations

- **IPSOS** : est une société internationale de marketing d'opinion.
- **PID** : proportionnelle, Intégrale, Dérivée.
- **DRV** : début de réfrigérante variable.
- **EDF** : électricité de France.
- **PIR** : Proportionnel Intégral Retard.
- **GPS** : Global position système.

Introduction

Générale

Introduction générale

La climatisation offre un nouveau confort de vie qui s'apprécie tout au long de l'année. Il s'appuie sur les nouvelles recherches et découvertes en matière de chauffage et de rafraîchissement. Il devient une composante de la construction d'aujourd'hui, un symbole de progrès et le signe d'un nouveau style de vie. Son application au bien être des personnes, dans le résidentiel, est relativement récente et n'a connu un véritable développement qu'au début des années soixante

La climatisation est à présent une technique mûre et sûre. N'oublions pas que ce qui, hier, pouvait être considéré comme un luxe, tend à devenir aujourd'hui une nécessité, une habitude de vie. La climatisation devient un facteur essentiel d'une vraie qualité de vie, c'est la solution de confort du 21ème siècle, que sait choisir l'homme moderne. C'est ce que confirmait déjà en 2010 une enquête IPSOS, montrant que 92 % des personnes interrogées associaient climatisation et modernité.

Dans notre projet on va étudier comment appliquer la commande floue et la régulation PID sur un système de climatisation et on va simuler sur Matlab.

on va commencer par les principes de fonctionnement d'un système de climatisation qui reprisant la solution la plus sophistiquée et la plus confortable et qu'elle permet de climatisé l'ensemble d'un logement , premièrement on va parler sur la logique floue et Nous présentons les concepts de la logique floue et nous décrivons les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension de cette technique en donnant des rappels sur les bases générales de la logique floue et les différents types de la commande en utilisant la logique floue.

Deuxièmes on va voir le principe général d'un régulateur PID et comment fait sa régulation sur un système de climatisation.

Troisièmes on va analyser un system de climatisation avec le command flou avant ce travail en ajoutant un régulateur PID dans ce système cela en utilisant le logiciel Matlab pour la simulation après on commentant les résultats.

Enfin en tire la conclusion de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de climatisation

Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes de climatisation

Dans ce chapitre, on parle essentiellement de deux principaux points à savoir :

- 1- principe de fonctionnement d'un système de climatisation.
- 2- Climatisation maison.

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre en va présenter le système de climatisation en manier générale .en commence par l'historique de climatisation et le principe de fonctionnement et en va simplifier ce dernier et on va présenter aussi la climatisation centralisée et leur réglage et fonctionnement.

I.2. Historique :

Pour le rafraîchissement des boissons, les civilisations grecques et égyptiennes utilisaient l'effet d'évaporation de l'eau à travers les vases et les jarres poreux. C'est au 6ème siècle que sont apparues les premières machines frigorifiques à compression de fluide.

1834 : Jacob PERKINS, de Londres, construit la première machine de réfrigération à compression mécanique avec de l'éther comme réfrigérant ;

1859 : Le Français Ferdinand CARRE réalise la première installation industrielle (machine à absorption d'eau + NH₃= Ammoniac !) ;

1930 : Grâce à l'étude théorique du chimiste belge Frédéric SWARTS, le grand essor de l'industrie du froid s'installe, avec la mise au point par une société américaine d'un nouveau fluide frigorigène « Le DICHLORODIFLUOROMETHANE» (R12).

1950 : Général Motors met en place des glaces teintées sur ses véhicules pour réduire la température intérieure engendrée par rayonnement.

En France, le chauffage de l'habitacle des véhicules se généralise ;

1955 : Les premiers systèmes de conditionnement d'air font leur apparition sur des véhicules américains type Chevrolet. L'ensemble du système était pré

-assemblé par Frigidaire à l'usine de Dayton (Ohio) et mis en place sur environ 3500 véhicules durant la même année ;

1960 : Les concepteurs aboutissent à combiner le système de réfrigération à celui de chauffage ;

1970 : Les constructeurs européens adoptent la climatisation dans leurs véhicules ;

1980 : Apparition des premiers systèmes de climatisation automatisés sur les véhicules

.Au milieu des années 90, près de 90% des véhicules américains sont climatisés, contre seulement 20% en Europe !

Actuellement, près de 80% des véhicules, toutes gammes confondues, sont équipés de série d'un système de climatisation ou d'air conditionné.

Cette croissance ne peut que s'accroître dans les années futures, de par les qualités du bien

-être apporté par le conditionnement de l'air de l'habitacle des véhicules automobiles.

I.3 Définition et principe de fonctionnement d'un système de climatisation :

1.3.1. Définition

La climatisation est une technologie écologique, largement éprouvée et d'une grande fiabilité.

La climatisation repose sur un principe fondamental et pourtant assez simple : produire de l'air froid, et parfois même, nous le verrons, réchauffer notre atmosphère !

Ainsi, dans tous les systèmes de climatisation que l'on peut trouver, le principe de fonctionnement reste le même.

Climatiser un local, au sens le plus large et général, consiste à maîtriser de façon volontaire, les caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère qui y règne afin de rendre celle-ci plus agréable aux occupants ou plus adaptée aux travaux qui y sont effectués.

Ainsi la climatisation peut consister à réchauffer ou à refroidir l'air, à en augmenter ou diminuer l'hygrométrie, à le dépoussiérer...

Le but donc d'un système de climatisation est de traiter l'air dans une pièce afin de contrôler simultanément sa température, son taux d'humidité, sa pureté ainsi que sa distribution optimale.

I -4 Climatiseur centralisé

I -4-1 Introduction

Un système centralisé de climatisation de type Débit de Réfrigérant Variable (DRV) est un système de climatisation qui fonctionne en détente directe et dont la régulation de chaque unité intérieure se fait par variation du débit de réfrigérant.

Les systèmes DRV permettent de transporter les calories/frigories d'une unité extérieure vers plusieurs unités intérieures en régulant le débit de fluide frigorigène utilisé par chaque unité intérieure et nécessaire pour traiter un local à climatiser.

Les systèmes DRV simplifient l'installation de plusieurs unités intérieures sur une seule unité extérieure et sont caractérisés par une grande efficacité énergétique.

I.4.2 Définition :

La climatisation centralisée est la solution la plus sophistiquée et la plus confortable. Elle permet de climatiser l'ensemble d'un logement ou d'un immeuble en toute discrétion.

Si les climatiseurs classiques sont élaborés pour rafraîchir ou chauffer – dans le cas des climatiseurs réversibles – une pièce donnée, les climatiseurs centralisés offrent la possibilité de climatiser plusieurs pièces à partir d'une installation principale. Ceci confère un grand confort d'utilisation et produit une économie d'énergie conséquente puisque le moteur central consomme beaucoup moins que plusieurs climatiseurs classiques indépendants réunis. De plus, **la climatisation centrale est esthétique et discrète, tant que l'installation des divers supports a été bien étudiée.** La climatisation centralisée est idéale pour les grandes résidences, les petits hôtels ou gîtes d'étapes, mais aussi pour les maisons de particuliers qui présentent quelques pièces à climatiser.

I.4.3 Principe de fonctionnement d'un système de climatisation

La solution de la climatisation centralisée est particulièrement confortable dans un logement puisqu'elle permet une climatisation homogène de toutes les pièces.

Il existe trois principaux systèmes donnant accès à la climatisation centralisée.

Le premier est le système multi-split qui intègre une unité extérieure alimentant jusqu'à huit unités intérieures. Le caisson extérieur abrite le moteur frigorifiant qui est en moyenne composé de quatre compresseurs. Les éléments de climatisation sont reliés à travers les pièces par des raccordements frigorifiques discrets qui s'intègrent dans la décoration intérieure. Ce système est recommandé pour les bâtiments déjà construits.

Le second système est la climatisation centralisée gainée qui a les mêmes principes de fonctionnement que le système multisplit, sauf que les raccords peuvent être dissimulés dans les plinthes ou les faux-plafonds. L'effet est étonnant car seules les grilles de diffusion et d'aspiration sont visibles.

Le dernier système est celui de la climatisation par plancher chauffant ou climatisant. De l'eau circule en permanence sous le plancher pour assurer la régulation thermique et tous les planchers peuvent être raccordés entre eux. L'avantage principal de ce système est qu'il est quasiment invisible, avec une climatisation ambiante très agréable. Ces deux systèmes ne peuvent être installés que sur un bâtiment en construction ou en rénovation, à cause de la complexité des travaux qu'ils supposent.

I.5. Les avantages de la climatisation centralisée

Le principal avantage de la climatisation centralisée est son grand confort d'utilisation. La température peut être gérée globalement sur l'ensemble des pièces raccordées avec une gestion personnalisée possible par pièce. Associée à une pompe à chaleur (géothermie), le système permet de réelles économies d'énergie et bénéficie également d'aide d'EDF et d'un crédit d'impôt équivalent à 50% du prix du matériel hors pose. L'installation est silencieuse à l'intérieur mais bruyante à l'extérieur. L'installation est pérenne.

I.6. Les inconvénients de la climatisation centralisée

Sauf dans le cas d'un système multi-splits, l'installation doit se prévoir en amont de la construction ou à l'occasion de rénovations lourdes du bâti. Le prix de la climatisation centralisée est important. L'installation ne peut se faire qu'avec un professionnel.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les principes généraux de fonctionnement d'un système de climatisation et les techniques de climatisation en fonction générale et en particulier la climatisation centralisée.

Chapitre II

La logique floue

Chapitre II : la Logique Floue

II.1. Introduction

Les méthodes conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles.

Ces techniques de commande ont prouvé leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Les méthodes de commande avancées (Régulateur adaptatif, Commande prédictive, Commande robuste...) permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même créneau que les méthodes de modélisation et de commande floues se positionnent [12].

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de :

- leur non-linéarité,
- la variation de leurs paramètres,
- la qualité des variables mesurables.

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telles que la commande floue particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de forts non linéarités ou imprécisions [13].

Dans plusieurs applications, les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec un algorithme de contrôle conventionnel. En particulier, la méthodologie du contrôle flou apparaît utile quand les processus sont très complexes à analyser par les techniques conventionnelles. Plusieurs travaux dans le domaine de commande ont montré qu'un régulateur par logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel.

Nous présentons dans ce chapitre les concepts de la logique floue et nous décrivons les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension de cette technique en donnant des rappels sur les bases générales de la logique floue et les différents types de la commande en utilisant la logique floue.

II.2. La logique floue

La logique floue suscite actuellement un fervent intérêt de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, mais plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser les modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels capables d'effectuer les tâches habituellement prises en charge par les humains.

Les démarches fondamentales de l'activité industrielle et économique, telles que la conception des produits, la gestion des systèmes ou la prise de décision, posent des problèmes de complexité croissante. Face à cette difficulté, les approches numériques, pourtant bien développées se sont avérées d'une efficacité limitée. Zadeh a fait le lien entre les ensembles flous et la modélisation non probabiliste de l'incertitude grâce à la théorie des possibilités, dans laquelle les fonctions d'appartenance des ensembles flous servent à représenter les idées de valeur incomplètement spécifiée et mal connue. Les ensembles flous et la théorie des possibilités sont à la base d'une méthodologie de représentation et d'utilisation de connaissances imprécises, vagues et incertaines que Zadeh appelle «théorie du raisonnement approché » et qui est plus connue sous le vocable de « logique floue» [13].

Les travaux de Lotfi Zadeh dans les années soixante sur la théorie des ensembles flous et la logique floue, à l'université de Berkeley ont jeté les bases de la commande floue actuelle. Ces travaux ont mis un certain temps avant d'être acceptés par la communauté de l'automatique et l'industrie. En effet la logique floue, de part ses aptitudes pluridisciplinaires (utilisée dans des domaines aussi variés que la gestion de base de données, les systèmes experts, le traitement du signal, la classification de données, la commande de systèmes automatiques), s'est attirée les critiques des scientifiques qui se sentaient attaqués sur leurs positions [12], il fallait attendre les années quatre-vingts dix pour que ces nouvelles théories soit acceptées et utilisées d'une manière générale.

En revanche, dans le domaine de la commande, la première application de la logique floue a été réalisée par Mamdani en 1974. Depuis 1987, date la première application utilisant la logique floue, le métro de Sendai, l'utilisation des techniques de commande floue n'a cessé de s'accroître [12].

Les différentes parties de la commande floue

Un contrôleur flou est un système à base de connaissances particulier, utilisant un raisonnement en profondeur limité, dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses).

On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes à appliquer au processus.

La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles. La base de données regroupe :

- Les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou,
- Les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

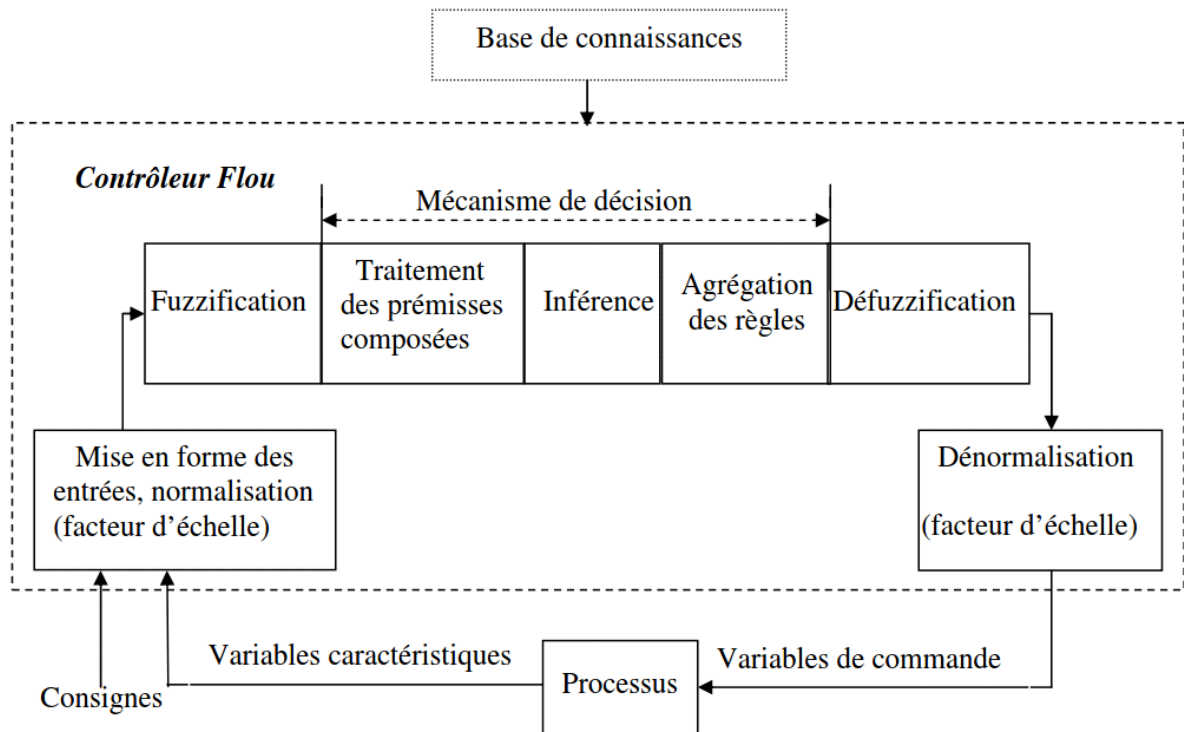


Figure II.1. Structure de base d'un contrôleur flou

La base de règle contient des règles de la forme :

« **Si** X_1 est A_1 et X_2 est A_2 ... et X_n est A_n **Alors** Y est B » (II.1)

Où X_1, X_2, K, X_n et Y sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande. A_1, A_2, K, A_n et B sont des labels linguistiques.

Suivant la nature de B on parlera de :

- Règles à conclusion symbolique (contrôleur de type Mamdani) : B est une valeur linguistique. Exemple :

Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » **Alors** la commande est « Négatif Petit ».

- Règles à conclusion algébrique (contrôleur de Sugeno) : B est une valeur numérique (singleton) ou une équation mathématique bien précise (non floue). Exemple :

Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est -0.3. Lorsque B est une valeur numérique on parle de règles de Takagi-Sugeno « d'ordre zéro », sinon, de règles à conclusion polynomiale.

Bien que les sorties des contrôleurs flous de type Takagi-Sugeno soient généralement des fonctions non linéaires statiques de leurs entrées, il ne faut pas oublier de mentionner les contrôleurs dits « flous dynamiques » de Takagi-Sugeno, où B est un modèle dynamique, certain ou incertain, à temps continu ou discret. L'utilisation de tels contrôleurs permet d'étendre certains résultats de l'automatique classique à la commande floue.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou : la fuzzification, le mécanisme de décision et la défuzzification.

- La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.
- Le mécanisme de décision permet de calculer les ensembles flous associés à la commande.
- La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont des étapes optionnelles.

II.2.1. Mise en forme des entrées, normalisation

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, par exemple, calcul de l'erreur et des variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés (univers de discours compris entre -1 et 1) nécessite une transformation d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en des valeurs normalisées appartenant à l'intervalle $[-1,1]$.

II.2.2. Fuzzification

C'est l'opération de *projection* des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro.

II.2.3. Traitement des prémisses composées

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « ET », « OU » et « NON ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conormes triangulaires, aux

opérateurs *min* et *max*. Quant à la négation A^C d'un ensemble flou A , elle est caractérisée par:

$$\mu_{A^C}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.2})$$

II.2.4. Inférence floue

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle R de la forme « **Si** X est A et X_2 **Alors** Y est B ».

En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- L'implication de Mamdani (1974) :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.3})$$

- L'implication de Larsen (1980) :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (\text{II.4})$$

II.2.5. Agrégation des règles

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur OU. En pratique, on utilise l'opérateur *max* :

$$\mu_{B'}(y) = \max(\mu_{B_i'}(y)) \quad (\text{II.5})$$

$$i=1, L, N$$

II.2.6. Défuzzification

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes [14], parmi lesquelles :

- La méthode de la hauteur,
- Le premier des maximas,
- Le dernier des maximas,
- La moyenne des maximas,
- Le centre de gravité,

- Le centre des aires,
- Le centre de la plus grande surface,
- Le centre des maximas.

Les méthodes de défuzzification les plus utilisées en commande floue sont le centre de gravité, le centre des aires et le centre des maximas.

II.2.7. Dénormalisation

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en des valeurs appartenant à leur domaine physique respectif.

II.3. Les différents types de la commande à base de la logique floue

En se basant sur les différentes règles de commande floue et de leurs méthodes de génération, les approches de commande en utilisant la logique floue peuvent être classées dans les catégories suivantes :

II.3.1. La commande floue de type Mamdani

Un système flou de Mamdani est basé sur une collection de règles du type :

$$R(i, j, k) : \text{Sx est } A_i \text{ et y est } B_j \text{ alors z est } C_k, \tag{1}$$

où $A_i, i \in I_1$, $B_j, j \in I_2$ et $C_k, k \in I_3$ représentent des termes linguistiques auxquels est attribuée une signification floue que l'on suppose normalisée. Le jeu de règles est donné par la connaissance de l'ensemble I des triplets (i, j, k), il sera dit complet si :

$$\forall (i, j) \in I_1 \times I_2 \quad \exists k \in I_3 / (i, j, k) \in I \tag{2}$$

Pour des entrées numériques précises, x_0 et y_0 , un sous-ensemble flou de sortie, noté F, est généré selon la relation :

$$\mu_F(z) = \max_{(i,j,k) \in I} \min(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0), \mu_{C_k}(z)). \tag{3}$$

L'opération $\max_{(i,j,k) \in I}$ correspond à l'application de l'opérateur max sur l'ensemble des règles définies. La valeur numérique de sortie délivrée par le système flou est obtenue par défuzzification, classiquement implantée par la méthode du centre de gravité:

$$z = \text{MAM}(x_0, y_0) = \frac{\int z \cdot \mu(z) \cdot dz}{\int \mu_F(z) \cdot dz} \tag{4}$$

L'équation (3) repose sur l'utilisation des opérateurs flous min/max préconisés par Mamdani. Elle peut être généralisée en introduisant des opérateurs quelconques de type t-norme/t-conorme (voir par exemple [Dubois87], [Bouchon93]) et devient alors :

$$\mu_F(z) = \perp_{(i,j,k) \in I} T_2(T_1(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0)), \mu_{C_k}(z)), \tag{5}$$

Où T_1 et T_2 représentent des t-normes et \perp une t-conorme. Il est à noter que l'équation (5) correspond à une implantation conjonctive du "Si ... alors ..." et que le cas des graphes implicatifs, formulé dans [Foulloy95a] ou [Foulloy96], n'est donc pas abordé dans ce document.

Dans ce type de systèmes flous, la prémisse et la conclusion sont floues. Après l'inférence, le résultat est un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer il faut passer par une étape de « défuzzification »

Les règles de la commande floue « Si-Alors » sont obtenues à partir de l'expertise d'un opérateur. Quoique la performance d'une telle technique de commande soit généralement satisfaisante en pratique le non garanti de la stabilité du système de commande en boucle fermée est souvent critiquée.

Plusieurs approches ont été proposées pour étudier le problème de stabilité. L'idée principale de ces approches est de considérer le contrôleur flou comme un contrôleur non linéaire et d'utiliser la théorie des systèmes non linéaire pour l'analyse de la stabilité [15].

II.3.2. La commande floue du type PI ou PID

Dans les installations de conditionnement d'air, le fluide à réguler peut être de l'air. Or, n'ayant que peu de capacité thermique, l'air verra sa température varier très rapidement en fonction de la position de la vanne de réglage. Il faut donc ajouter une 3ème composante à la grandeur de réglage : une force dont la valeur est d'autant plus grande que l'écart varie rapidement, c'est-à-dire d'autant plus grande que la "dérivée" de l'écart par rapport au temps est élevée.

La valeur de la "grandeur réglée", la température de l'eau de radiateur (ou ici l'ouverture de la vanne) sera le résultat d'une addition de 3 grandeurs : une composante proportionnelle à l'écart existant (P), une composante proportionnelle à l'intégrale de l'écart dans le temps (I) et une composante proportionnelle à la dérivée de l'écart (D).

Reste à affiner les bandes proportionnelles, temps d'intégration et temps de dérivation pour adapter l'importance respective de ces 3 composantes. C'est le travail du "metteur au point" de l'installation de régulation qui affine les valeurs de base réglées d'usine.

La principale difficulté des régulateurs PID réside dans le réglage des gains afin d'obtenir de bonnes performances surtout lorsque le procédé à commander est d'ordre élevé et à dynamique non linéaire. En effet, le problème dans le réglage des gains devient plus difficile en présence de variations paramétriques et de perturbations externes.

La nature complexe des procédés industriels et la nécessité de maintenir de bonnes performances exigent un réglage en ligne des gains du régulateur PID ou PI. Cette opération peut être réalisée par des régulateurs numériques autos ajustables. Dans ce cas, l'ajustement en ligne des paramètres de synthèse est, généralement, basé sur un algorithme de réglage qui fait appel, à chaque période, à la fonction de transfert du procédé, souvent difficile à déterminer avec une précision suffisante. Ceci rend ce principe de contrôle assez

sensible aux variations du comportement de procédé industriel. Dans l'objectif de maintenir de bonnes performances face à d'éventuelles variations de la dynamique du procédé, il est évident que le réglage ne peut se faire aisément qu'avec la mesure de l'écart entre les performances réelles et désirées. L'exploitation d'une supervision basée sur la logique floue en vue de l'adaptation des paramètres de synthèse d'un régulateur du type PID ou PI permet d'offrir une alternative très intéressante pour ramener, quelle que soit la situation en ligne, les performances réelles à celles souhaitées [16].

Il est possible d'améliorer les performances du système de commande par la combinaison de la logique floue avec un régulateur PID ou PI ce qui s'appelle un contrôleur PID ou PI flou.

II.3.3. La commande neuro-floue

La commande neuronale et la commande floue sont deux techniques de la commande intelligente les plus populaires. Elles possèdent plusieurs similarités, par exemple, les systèmes flous et les réseaux de neurones ont le même objectif, tous les deux tentent de modéliser le fonctionnement du cerveau humain. Les réseaux de neurones tentent de modéliser l'architecture du cerveau en créant une modélisation de l'entité du cerveau : le neurone. Les systèmes flous eux modélisent le cerveau par son mode de fonctionnement (apprentissage et déduction).

Dans les deux cas le principe est de stocker la connaissance et l'employer pour prendre des décisions (lois) de commande, et la combinaison de ces deux techniques appelée commande neuro-floue est fondamentalement une commande floue augmentée par les réseaux de neurone et permet d'améliorer les caractéristiques comme la flexibilité, la possibilité de traitement de données et l'adaptabilité.

Le processus du raisonnement flou est réalisé par les réseaux neurones dont les poids correspondent aux paramètres du raisonnement flou. En utilisant la méthode de rétropropagation ou n'importe quel algorithme d'apprentissage de réseaux de neurone, un système de commande neuro-floue peut identifier les règles de commande et apprendre les fonctions d'appartenances floues [17].

Il convient de noter que le modèle flou de type Takagi–Sugeno est l'un des systèmes flous les plus employés pour réaliser la commande neuro-floue.

Un des avantages principaux de la commande neuro-floue est qu'elle n'exige pas des informations sur le modèle mathématique du système à commander. Cette classe de commande floue offre une nouvelle voie dans la résolution de plusieurs problèmes de commande où le modèle mathématique du système pourrait être non disponible. Cependant, une de ses limitations principales est l'analyse systématique de la stabilité des systèmes de commande en boucle fermée et la convergence des algorithmes d'adaptation.

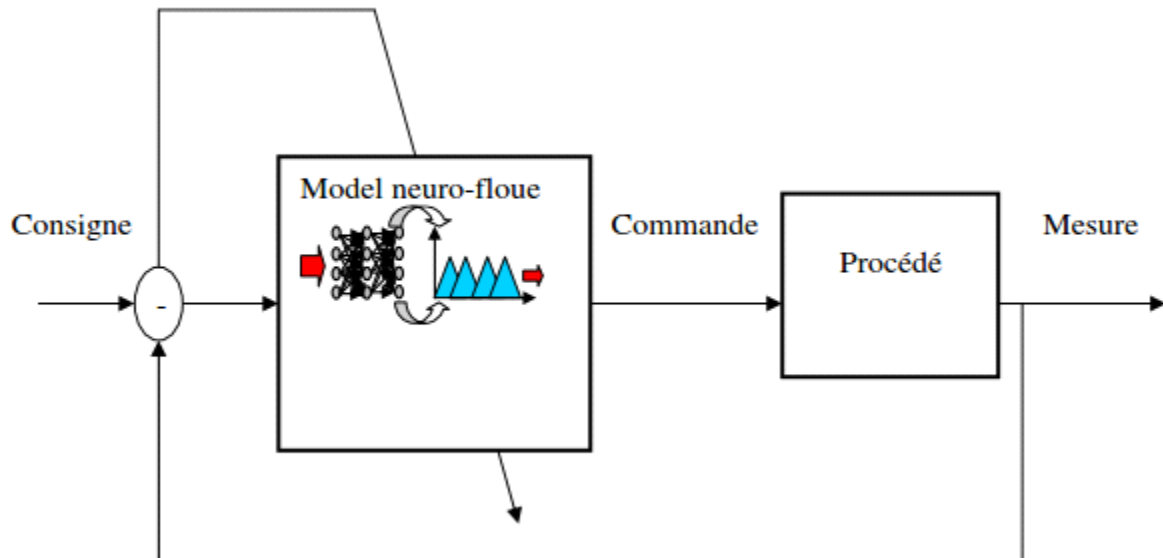


Figure II.2 : Structure générale d'une commande neuro-floue

II.3.4. La commande par mode glissant flou

La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années, cela est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. Elle consiste à définir une surface dite de glissement, la poursuite de la trajectoire désirée se fait en deux phases : l'approche et le glissement. Ainsi, la commande utilisée dans ce cas se compose de deux parties : la première permettant l'approche jusqu'à l'arrivée à la surface, et la deuxième permet le maintien et le glissement le long de cette surface [18].

Bien qu'un contrôleur flou s'avère semblable à un contrôleur par mode glissant modifié, l'idée principale de la commande par mode glissant flou est de combiner ou intégrer la commande floue et la commande par mode glissant de manière à exploiter les avantages des deux techniques. Le principe de base est d'équiper un contrôleur par mode glissant par des possibilités de manipuler l'information qualitative par une linguistique floue. L'avantage direct d'une telle commande est que la logique floue peut éliminer l'effet du broutement par la construction des couches à frontière floues qui remplacent les surfaces de commutation du mode glissant. Une autre approche consiste à concevoir des systèmes de commande flous et d'ajouter un contrôleur par mode glissant pour garantir la stabilité et améliorer la robustesse du système en boucle fermée.

L'avantage important de la commande par mode glissant flou est que le problème d'analyse et de stabilité des systèmes en boucle fermée peut être abordé dans le cadre de la

commande par mode glissant, et les techniques développées pour la commande par mode glissant peuvent être appliquées.

On peut dire aussi que l'objectif de la synthèse d'une loi de commande par mode glissant est la compensation de l'erreur d'approximation floue entre le système non linéaire et le système flou supposé disponible [19].

II.3.5. La commande floue adaptative

La commande adaptative est basée sur l'utilisation d'un mécanisme d'adaptation pour la commande des systèmes partiellement connus. La commande adaptative des systèmes linéaires et certaines classes spéciales des systèmes non linéaires a été bien développée depuis les années 70. Alors que la commande adaptative des systèmes non linéaires présente toujours un défi à la communauté de commande. Les modèles mathématiques ne pourraient pas être disponibles pour beaucoup des systèmes complexes en pratique, et le problème de la commande adaptative de ces systèmes est loin d'être résolu d'une manière satisfaisante.

Des systèmes flous basés sur les fonctions floues de base sont employés pour représenter les fonctions non linéaires inconnues des systèmes qui possèdent des variations intrinsèques inconnues. L'objectif est de conserver une bonne performance du système complet en adaptant le régulateur en fonction des variations du système. Les paramètres des systèmes flous tels que les fonctions d'appartenance caractérisées par des limites linguistiques sont mises à jour selon des lois d'adaptation.

L'idée principale de la commande floue adaptative est d'employer les systèmes flous pour rapprocher les comportements non linéaires inconnus des systèmes non linéaires et d'appliquer les techniques bien développées de la commande adaptative. Les régulateurs flous adaptatifs peuvent être divisés en deux classes :

- Les régulateurs adaptatifs directs : les paramètres des régulateurs sont modifiés en ligne afin de minimiser l'erreur entre le modèle de référence et le système réel.
- Les régulateurs adaptatifs indirects : les paramètres du système réel sont estimés et le régulateur est choisi en supposant que les valeurs estimées du modèle sont les vraies valeurs du système réel. Si le modèle du procédé réel utilise un système à base de logique floue on parle alors de régulateur flou adaptatif indirect.

La commande floue adaptative se compose donc d'un régulateur flou adaptatif. La différence principale entre un régulateur flou adaptatif et un régulateur adaptatif conventionnel est que le premier peut utiliser des données linguistiques. Ce qui est très important lorsque le système possède des incertitudes qu'un opérateur humain a appris à anticiper. Cependant, des approches robustes doivent être adoptées pour la commande

floue adaptative à cause des erreurs inhérentes d'approximation des systèmes flous approchant les fonctions non linéaires originales [5] [6].

II.3.6. La commande floue de type T-S

Les contrôleurs flous de Takagi–Sugeno sont, comme ceux de Mamdani, construits à partir d’une base de règles “**Si ... Alors ...**”. Les prémisses sont toujours exprimées linguistiquement et donc similaires à celles utilisées dans un contrôleur flou de Mamdani alors que les conclusions sont de nature numérique.

Un système flou de type Takagi-Sugeno (T-S) utilise des règles écrites de la manière suivante :

$$R_{(i,j,k,...)} : \mathbf{Si } x \text{ est } A_i \text{ et } y \text{ est } B_j \mathbf{ Alors } z = f_k(x) \tag{II.9}$$

Où f_k représente une fonction réelle quelconque.

Les fonctions de sortie f_k , peuvent être en principe des fonctions arbitraires des entrées, mais d’une manière générale elles sont choisies telles qu’elles soient une combinaison linéaire des entrées.

La particularité d’un modèle T-S est que la logique floue est seulement utilisée dans la partie prémisses des règles. La partie conclusion est décrite par des valeurs numériques.

Pour les valeurs d’entrée précises x_0 et y_0 , la sortie z est évaluée selon le mécanisme suivant [15]:

$$z = \frac{\sum_{(i,j,k) \in I} w_{i,j} f_k(x_0, y_0)}{\sum_{(i,j,k) \in I} w_{i,j}} \quad \text{Avec} \quad w_{i,j} = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_j}(y_0) \tag{II.10}$$

Ce type de modèle est aussi très intéressant pour la représentation de systèmes non linéaires tels que les systèmes mécaniques ou chaotiques.

II.4. Réglage, stabilité et robustesse d’un contrôleur flou

II.4.1. Réglage

Un contrôleur flou possède de nombreux paramètres de réglage, ce qui peut, à priori, effrayer ses utilisateurs potentiels. En effet, contrairement aux contrôleurs classiques, le contrôleur flou possède un nombre plus conséquent de paramètres, et offre, un nombre de degrés de liberté plus élevé.

On peut distinguer parmi les choix et les réglages à faire :

- L’expression des règles,

- La définition des variables et des valeurs linguistiques, avec leurs fonctions d'appartenance associées,
- La méthode d'implication,
- La méthode d'inférence,
- La méthode de défuzzification,
- Les facteurs d'échelle sur les entrées et les sorties du contrôleur.

Cependant, on constate une certaine insensibilité du résultat au choix des méthodes d'implication, d'inférence et de défuzzification. Pour les autres paramètres, un réglage séquentiel est possible :

- Fonctions d'appartenance,
- Règles.

Le réglage par essais successifs de ces nombreux paramètres étant assez long et fastidieux, diverses techniques d'autoréglage, d'optimisation et d'apprentissage ont été développées ces dernières années. On peut citer, à titre d'exemple, les techniques de la programmation mathématique, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

II.4.2. Stabilité

L'analyse de la stabilité est a priori difficile dans une approche de type « *système à base de connaissances* » dont l'objectif est d'éviter l'utilisation de modèle mathématique du procédé. Une modélisation floue du système bouclé est alors nécessaire pour l'analyse de la stabilité. Toutefois, si une caractérisation mathématique du processus à commander existe, le contrôleur flou étant, en général, un contrôleur non linéaire, certains résultats de la théorie des systèmes non linéaires peuvent être utilisés. On distingue alors deux grandes familles d'approches :

$$\frac{dV(x,t)}{dt}$$

- *La méthode directe de Lyapunov* : cette méthode permet d'affirmer la stabilité asymptotique d'un état d'équilibre si une fonction de Lyapunov $V(x, t)$ définie positive dont la dérivée est définie négative existe.
- *L'approche entrée sortie* : cette approche permet d'affirmer la stabilité d'un système si la sortie de celui-ci, en réponse à une entrée bornée, est elle-même bornée.

Nous choisissons ici de distinguer les différentes méthodes d'analyse de la stabilité selon que l'on dispose du modèle mathématique du processus ou non. La liste des méthodes citées ici est non exhaustive [20].

a. Non disponibilité d'un modèle mathématique du processus

Dans ce cas, le système en boucle fermée est modélisé par un système flou.

Les méthodes d'analyse de la stabilité dépendent alors du type du modèle.

- Si le modèle du système en boucle fermée est un modèle symbolique (de type Mamdani ou modèle aux relations floues) à temps discret, la stabilité n'est pas étudiée au sens classique du terme et de nouvelles définitions de la stabilité sont introduites. On parle alors de la stabilité d'un symbole flou.

- Dans le cas où le système en boucle fermée est modélisé par un système flou de type Takgi-Sugeno, des propriétés de stabilité asymptotique peuvent être démontrées à partir de l'utilisation de fonctions de Lyapunov quadratiques.

- Dans le cas où le modèle du système en boucle fermée est un modèle hybride [20] on utilise également des fonctions de Lyapunov quadratiques pour étudier la stabilité. Les modèles linguistiques et modèles de Takgi-Sugeno sont deux cas particuliers de modèles hybrides.

b. Disponibilité d'un modèle mathématique du processus

Dans ce cas, on peut faire appel à diverses méthodes d'analyse de la stabilité issues de la théorie des systèmes non linéaires. Ces méthodes diffèrent selon que le contrôleur flou a une expression mathématique simple ou pas.

- Si le contrôleur flou peut facilement se mettre sous forme analytique on est ramené à l'étude de la stabilité asymptotique d'un système en boucle fermée non linéaire et on peut alors utiliser la méthode directe de Lyapunov.

- Pour des contrôleurs flous plus complexes, l'expression mathématique étant inexploitable, on doit alors se contenter d'une propriété de secteur géométrique [20] : le contrôleur flou est considéré comme une fonction mathématique non linéaire évoluant dans un secteur géométrique bien défini. On cherchera alors les conditions de stabilité absolue correspondantes à ce secteur, qui peuvent être exprimées soit dans un formalisme d'état soit dans un formalisme entrée sortie.

Les conditions les plus générales de stabilité peuvent être obtenues sans aucune hypothèse sur la nature du système (linéaire, non linéaire, variant, invariant, de dimension finie ou infinie). Cependant, bien que générales, ces conditions sont uniquement suffisantes et difficilement exploitables. C'est pourquoi le système est généralement supposé linéaire invariant de dimension finie bouclé par une non linéarité (ici, contrôleur flou). Selon les propriétés géométriques de ce non linéarité, différents critères de stabilité sont obtenus :

Critère de cercle, critère de conicité, lemme borné réel, lemme positif réel.

II.4.3. Robustesse

La robustesse, bien que maintes fois constatée, ne possède aucune démonstration rigoureuse. Son explication est à chercher dans l'aspect non linéaire de cette commande qui peut apparaître comme contrôleur de type P.I.D à gains variables ou préprogrammés, selon le point de fonctionnement.

Toutefois, si le modèle du système en boucle fermée est un modèle « *flou dynamique* » de Takagi-Sugeno, on peut se reporter aux travaux de l'automatique classique.

II.5. Propriétés d'un réglage par logique floue

Les propriétés essentielles d'un réglage par logique floue peuvent être résumées de la manière suivante :

- Aptitude à régler convenablement les systèmes avec un comportement dynamique compliqué, dont la modélisation est difficile, voire impossible. A noter que dans le cas du réglage par logique floue, il n'est pas nécessaire d'établir un modèle. Si, pour un certain système à régler, il existe tout de même un modèle mathématique convenable, on peut l'utiliser pour tester et modifier la stratégie de réglage à l'aide d'une simulation numérique. Cela facilite évidemment la mise en service sur l'installation réelle.
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuits intégrés (processeurs, fuzzy processors, solution matérielle).

Malgré certains inconvénients tels que :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- La précision de réglage souvent peu élevée etc...

On peut affirmer que le réglage par logique floue présente une alternative valable aux réglages conventionnels. Cela est confirmé non seulement par un fort développement dans beaucoup de domaines d'application, mais aussi par des travaux de recherche sur le plan théorique.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de la logique floue et la composition d'un système de commande floue. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou et les différents types de commande en utilisant la logique floue.

Retenons que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistique facilement interprétables.

Malheureusement la manipulation de règles non précises peut générer un nombre d'erreurs non négligeable. La mise en place d'un système flou nécessite donc une attention particulière lors de la phase de test de manière à détecter les éventuelles aberrations du système.

Chapitre III

Le régulateur PID

III -1 Introduction

Ce chapitre présente les régulateurs de rétroaction les plus employés ainsi que quelques techniques efficaces pour les régler.

Le régulateur utilisé dans plus de 90% des asservissements est du type Proportionnel-Intégrale – Dérivée (PID). L’histoire de ces régulateurs remonte au début du vingtième siècle, Les applications du PID sont extrêmement nombreuses et variées. Ce compensateur est utilisé en commande des procédés industriels et des moteurs, dans le monde de l’aéronautique et de l’automobile, en robotique, dans plusieurs appareils courants. Il est donc inévitable de bien étudier le régulateur PID.

III -2 Définition

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur ou proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle, permettant d’effectuer un asservissement en boucle fermée d’un système industriel ou « procédé ». C’est le régulateur le plus utilisé dans l’industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques.

III -3 Principe général

Un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

Le correcteur PID agit de trois manières :

- action **proportionnelle** : l’erreur est multipliée par un gain G ;
- action **intégrale** : l’erreur est intégrée et divisée par un gain T_i ;
- action **dérivée** : l’erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici une architecture parallèle :

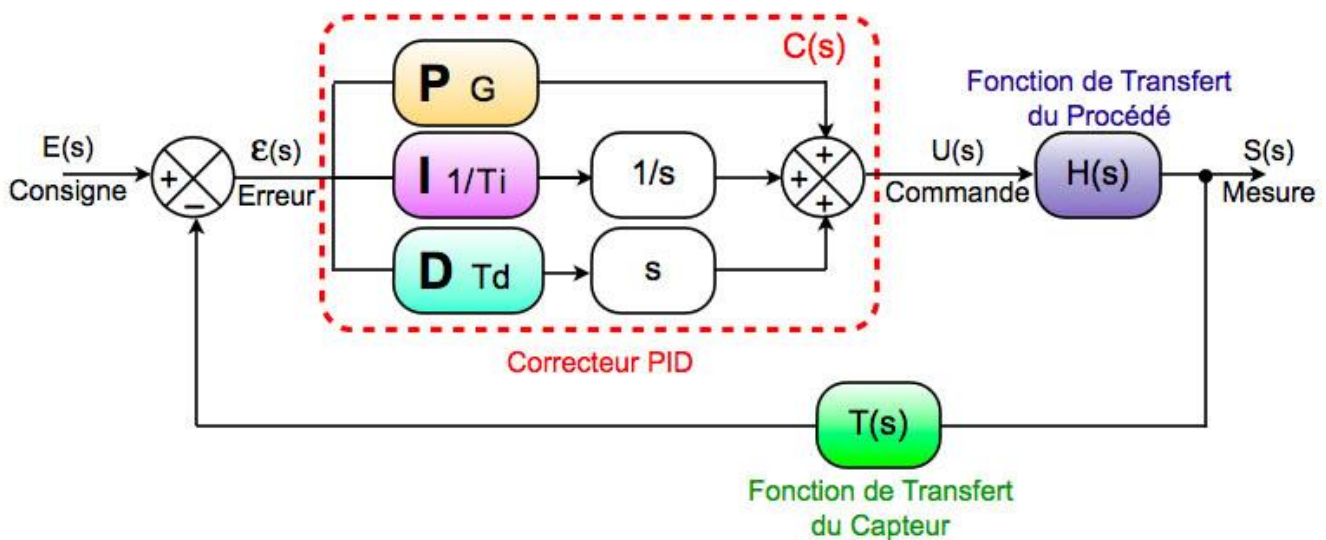


Figure III.1: architecture parallèle d’un correcteur PID

Sur le schéma ci-dessus, la fonction de transfert exprimée dans le domaine de Laplace (où s désigne la variable de Laplace, de dimension $[T^{-1}]$, dans la suite de l'article cette notation anglo-saxonne est remplacée par p) du régulateur PID parallèle est la somme des

$$C(p) = G + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{p} + T_d \cdot p$$

trois actions :

En régulation des procédés, on préfère implanter la fonction de transfert du PID sous la forme mixte :

$$C(p) = G \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot p} + \tau_d \cdot p \right)$$

Où τ_i et τ_d sont des constantes de temps (différentes de T_i et T_d dans la formulation précédente) et G est le gain de la partie proportionnelle.

Les différents paramètres à trouver sont G, τ_i et τ_d pour réguler la grandeur physique du procédé ayant pour fonction de transfert $H(s)$. Il existe de nombreuses méthodes pour trouver ces paramètres. Cette recherche de paramètre est communément appelée *synthèse*.

La fonction de transfert du contrôleur PID présenté est idéale. En fait, elle est irréalisable car le degré du numérateur est supérieur au degré du dénominateur. Dans la réalité, on filtre toujours l'action dérivée comme suit :

$$\tau_d p \mapsto \frac{\tau_d p}{1 + \frac{\tau_d}{N} p}$$

Avec $N > 1$ On obtient alors une nouvelle fonction de transfert réalisable pour notre régulateur. Le choix de N résulte d'un compromis : pour N très grand, l'action dérivée n'est pratiquement plus filtrée, ce qui se traduit par une grande sensibilité du signal de commande par rapport au bruit de mesure. Si l'on prend N trop petit, l'effet de l'action dérivée devient quasiment inexistant. Une étude théorique permet de préciser que

$$3 < N < 10$$

III.4 LES DIFFERENTES ACTIONS

III.4.1 Action Proportionnelle

Cette action est la plus classique. Elle consiste à appliquer une correction en rapport avec la différence instantanée entre la mesure et la consigne courante, Le rapport Erreur/Commande s'appelle le gain.

La limite de cette commande arrive à partir du moment où l'erreur devient petite ou si la consigne n'est pas constante ; en effet l'annulation de l'écart considère que la consigne à l'instant T+1 sera le même qu'à l'instant T.

On a donc l'équation :

$$u = Kp(Uc - y).$$

Dans le cas d'un régulateur inverse, l'équation sera

$$u = -Kp(Uc - y).$$

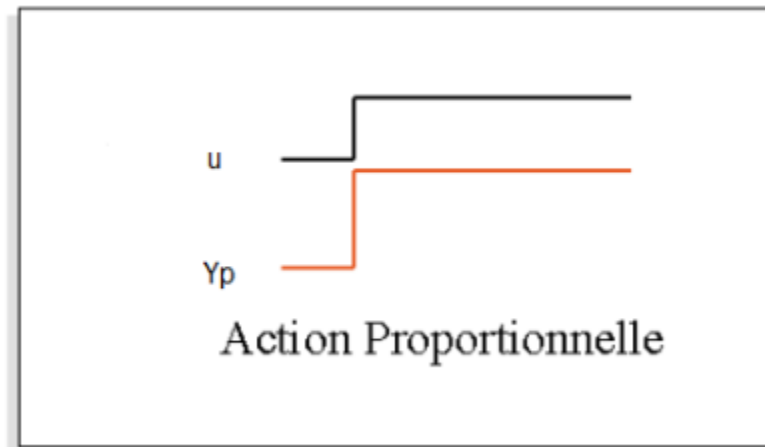


Figure.III.2 : Réponse indiciel d'un régulateur P

III.4.2 Action Intégrale

Le régulateur I intègre l'écart de réglage en fonction du temps. Cependant, dans Le domaine des régulateurs discrets, l'intégration est remplacée par une sommation de l'écart de réglage discret e

*(t).En toute rigueur, on devrait donc parler de régulateur sommateur...

Cette action calcule sa contribution à la commande en n'utilisant pas L'écart instantané mais une mémoire des écarts intervenus lors des précédents échantillonnages. Ceci permet d'éliminer à la fois les erreurs statiques trop petites pour que l'action proportionnelle les Contre et les erreurs de suivi de consignes en pente.

La limite de cette commande intervient à partir du moment où le système ne réagit plus à la commande passée (blocage d'organe, limitation de sécurité, etc.). Dans ce cas précis, le régulateur va amplifier à l'infini sa contribution intégrale. On parle de saturation D'intégrale. La résolution de problèmes passe de l'utilisation d'un PID à intégrale externe.

La contribution intégrale se calcule en ajoutant tous les T_i secondes la valeur de l'entrée de l'intégrateur à l'ancienne valeur.

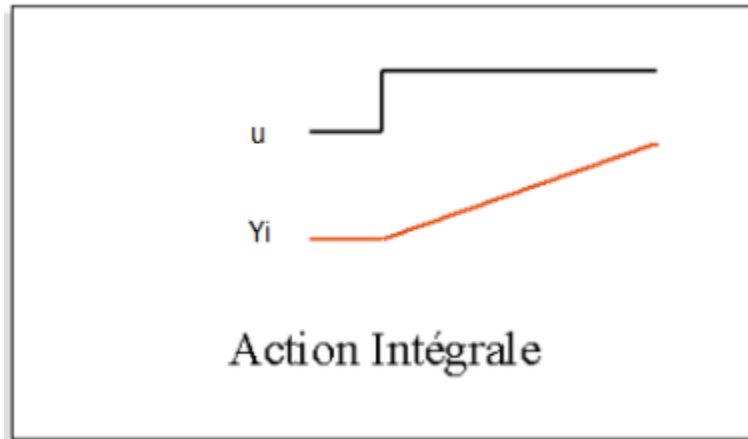


Figure.III.3 : Réponse indiciel d'un régulateur I

III.4.3 Action dérivée D

L'action dérivée se traduit par un terme proportionnel à la différence des écarts de réglage aux instants d'échantillonnage nT et $(n-1) T$.

Cette action surqualifiée la commande à passer en la calculant à partir de la variation de l'erreur. Sur variation de l'erreur, l'action dérivée va intervenir mais s'annulera pour une Erreur constante. L'utilisation de l'action dérivée impose d'éliminer tous les bruits entachant la mesure sous peine de voir son système en mouvement permanent.

L'action dérivée peut se calculer soit sur l'écart mesure consigne, soit sur la mesure. Le calcul sur la mesure se prête au cas de maintien et évite d'avoir une réaction trop grande en cas de variation de consigne.

Le réglage de la dérivée se fera en donnant T_d qui est un coefficient de multiplication de la valeur de la dérivée instantanée. La commande sera donc :

T_d est exprimé en $y^d = T_d \frac{de}{dt}$ unité de temps.

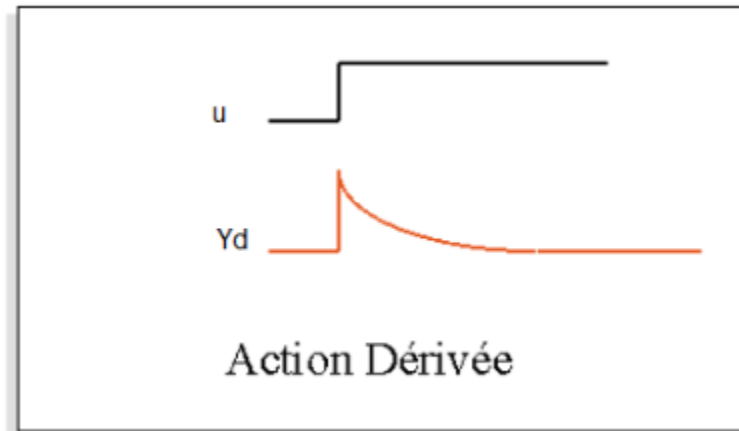


Figure.III.4 : Réponse indiciel d'un régulateur D

III.5 Réglage d'un PID

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients G , τ_i et τ_d afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. Les objectifs sont d'être **robustes**, **rapide** et **précis**. Il faut pour cela :

- dans le cas d'un fonctionnement en mode de régulation (consigne fixe) choisir des réglages permettant à la grandeur réglée de retourner dans un temps raisonnable à sa valeur de consigne ;
- dans le cas de fonctionnement de la boucle en mode d'asservissement (consigne variable), choisir des réglages permettant de limiter le ou les éventuels **dépassements** (*overshoot*) de la grandeur réglée ;
- la robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante ou de l'hygrométrie ambiante relativement à la loi de Pascal. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus/testés (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...) ;
- la rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire ;
- le critère de précision est basé sur l'erreur statique (ou de statisme).

La réponse type d'un procédé stable est la suivante :

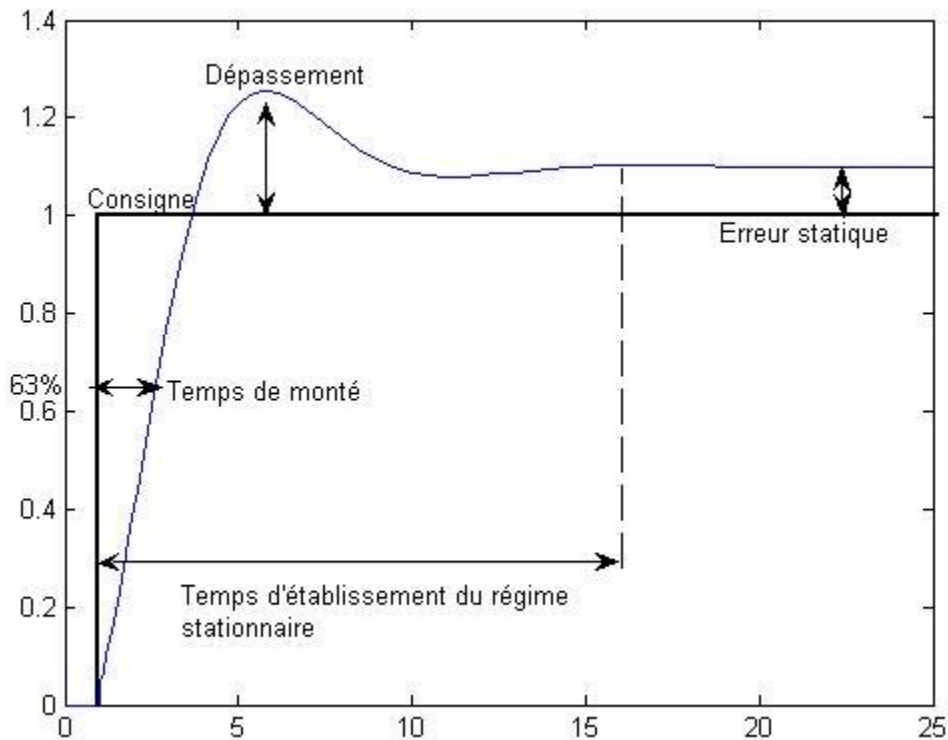


Figure III.5 : La réponse type d'un procédé stable

Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

	Précision	Stabilité	Rapidité
P	↗	↘	↗
I	↗	↘	↘
D	↘	↗	↗

Tableau III.1 : La réponse des paramètres du PID

Tableau récapitulant l'influence d'un PID série sur le système qu'il corrige si l'on augmente séparément l'action proportionnelle (P), intégrale (I) ou dérivée (D).

- **G** : lorsque **G** augmente, le temps de montée (*rise time*) est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.
- **τ_i** : lorsque $\frac{1}{\tau_i}$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.

- τ_d : lorsque $\frac{1}{\tau_d}$ augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

Pour ces trois paramètres, le réglage au-delà d'un seuil trop élevé a pour effet d'engendrer une oscillation du système de plus en plus importante menant à l'instabilité.

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général, on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

Les méthodes de réglage les plus utilisées en théorie sont les méthodes de Ziegler-Nichols (en boucle ouverte et boucle fermée), la méthode de P. Naslin (polynômes normaux à amortissement réglable), la méthode du lieu de Nyquist inverse (utilise le diagramme de Nyquist). Le diagramme de Black permet d'en constater très visuellement les effets.

Dans la pratique, les professionnels utilisent soit l'identification par modèle de Broïda pour les systèmes stables ou le modèle intégrateur retardé pour les systèmes instables soit la méthode par approches successives, qui répond à une procédure rigoureuse : on règle d'abord l'action P seule pour avoir un dépassement de 10 à 15 % puis l'action dérivée de façon à « raboter » au mieux le dépassement précédent, enfin on ajuste si nécessaire l'action intégrale en se fixant un dépassement final compris entre 5 et 10 %.

Il existe aussi une méthode qui, en supposant connue la fonction de transfert du système, permet de déterminer un régulateur PID **robuste** dans le sens où la marge de phase et la pulsation au gain unité (donc la marge de retard) sont fixées à l'avance (lorsqu'une solution existe)^{1,2}.

Dans certains cas, les performances d'un PID peuvent devenir insuffisantes, en raison par exemple de la présence d'un retard trop important ou d'un procédé à phase non minimale, posant des problèmes de stabilité. On fait alors appel à d'autres algorithmes de réglage (notamment : régulateur PIR ou à modèle interne ou à retour d'état).

III.6 Conclusion

Le régulateur PID permet de réaliser des performances telles que la stabilité, la rapidité et la précision grâce à la combinaison des trois actions P , I et D (la structure peut être série, parallèle ou mixte). Ceci peut se faire en ajustant les paramètres associés à ces actions.

Chapitre IV

Simulation sous MATLAB
d'un système de
climatisation

Chapitre IV : Simulation sous Matlab d'un système de climatisation

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons analyser un système de climatisation Avec la commande floue, avant ce travail en ajoutant un régulateur PID dans ce système et on étudie les changements qui peuvent se produire lorsque chaque action de P, I, et D est introduite et cela on en utilisant le logiciel MATLAB pour simulation. Après chaque action, nous analysons et nous commentons les résultats.

IV.2 Présentation du logiciel MATLAB

IV.2.1 Définition

MATLAB est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ un million en 2004¹) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des Toolbox.

Le logiciel MATLAB est construit autour du langage MATLAB. Une interface en ligne de commande, qui est un des éléments du bureau MATLAB, permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardés dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction

IV.3 Interface graphique

IV.3.1 Définition

En informatique, une interface graphique (anglais GUI pour graphical user interface) est un dispositif de dialogue homme-machine, dans lequel les objets à manipuler sont dessinés sous forme de pictogrammes à l'écran, que l'usager peut utiliser en imitant la manipulation physique de ces objets avec un dispositif de pointage, le plus souvent une souris. Ce type d'interface a été créé par les ingénieurs du Xerox à la fin des années 1970, pour remplacer les interfaces en ligne de commande, puis développé et popularisé par Apple avec l'ordinateur Macintosh, commercialisé en 1984.

Les interfaces graphiques sont mises en œuvre par un ensemble de logiciels souvent inclus dans les systèmes d'exploitation. Ce sont des dispositifs courants des appareils informatiques, notamment les ordinateurs, les guichets automatiques bancaires, les téléphones portables, les tablettes électroniques et les récepteurs GPS.

IV.4 Simulation

Le développement d'un contrôleur en logique floue pour intégration dans Simulink est très simple si on possède la boîte à outils

Fuzzy Logic de Matlab. Cette boîte à outils ajoute les composantes nécessaires dans Simulink. Ce guide sert seulement pour l'intégration de la logique floue dans Simulink. Pour commencer Simulink, il suffit de taper la commande Simulink à la ligne de commandes de Matlab. Le contrôleur à logique floue est situé sous les options Fuzzy Logic Toolbox, comme montré à la figure ci-dessous ;

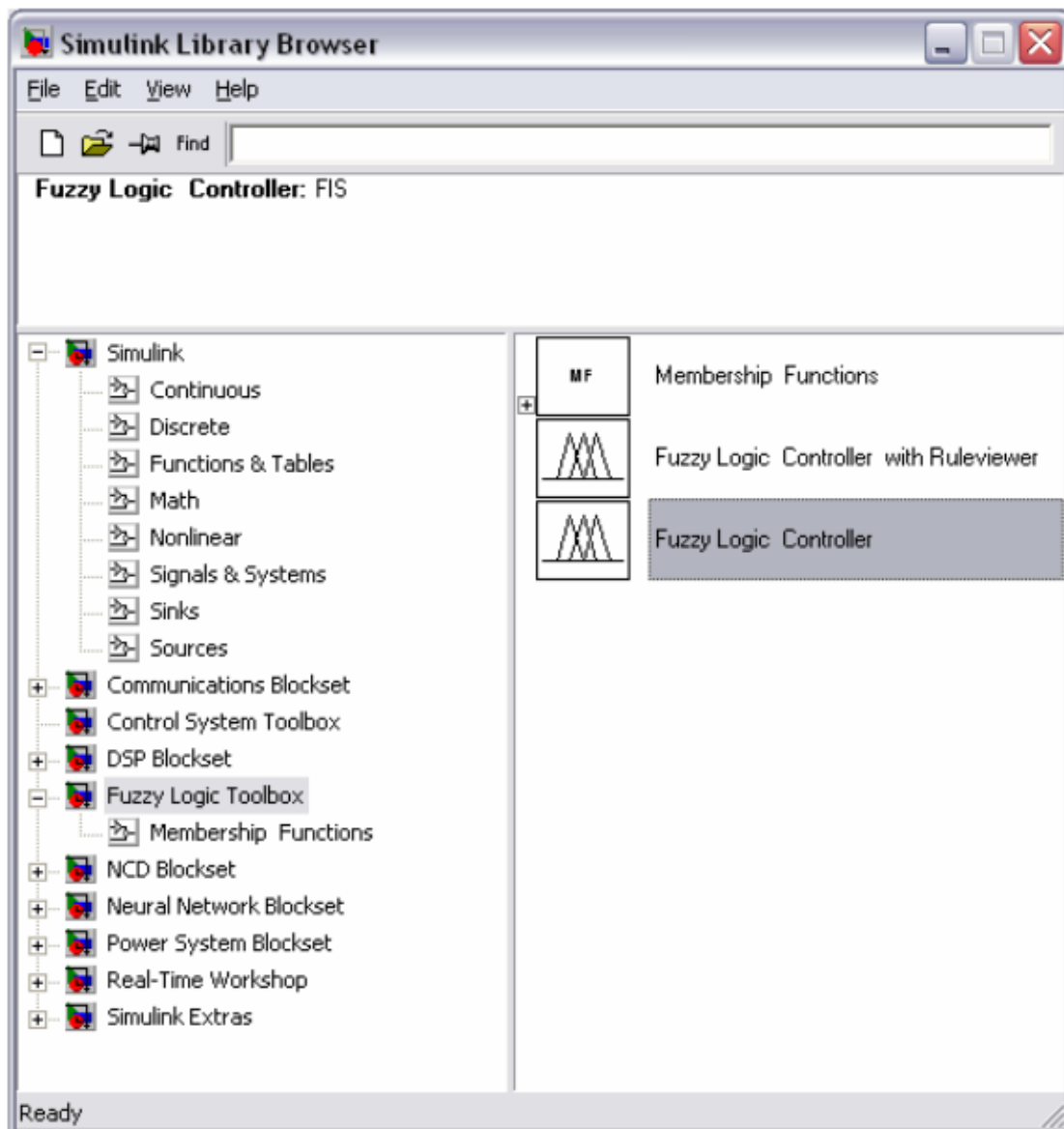


Figure IV.1 : Navigateur de la bibliothèque Simulink

Chapitre IV Simulation sous Matlab d'un système de climatisation

Le système sous étude est le suivant :

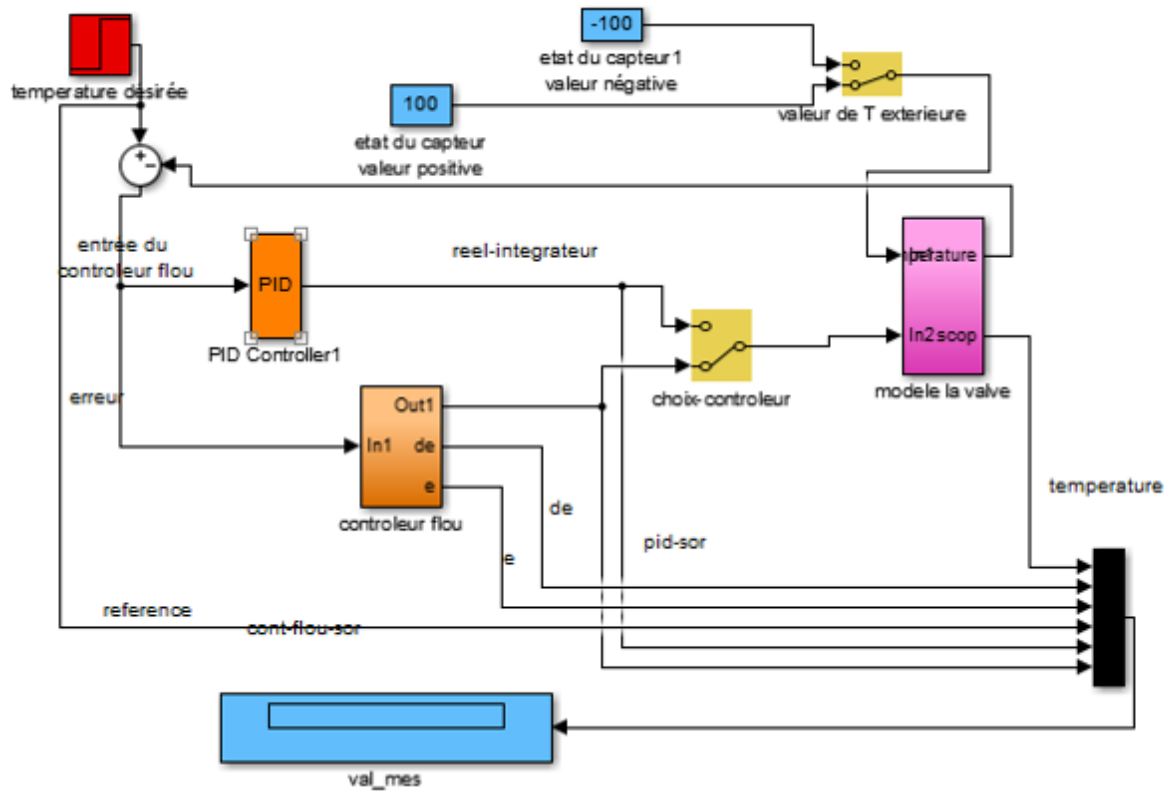


Figure IV.2 : Le Système de climatisation sous étude.

En utilisant les méthodes classiques, on trouve que le contrôleur PID idéal a les Valeurs suivantes:

K_p	10
K_i	2
K_d	2

Tableau IV.1 : les valeurs d'un contrôleur PID

Chapitre IV Simulation sous Matlab d'un système de climatisation

le système de contrôleur flou :

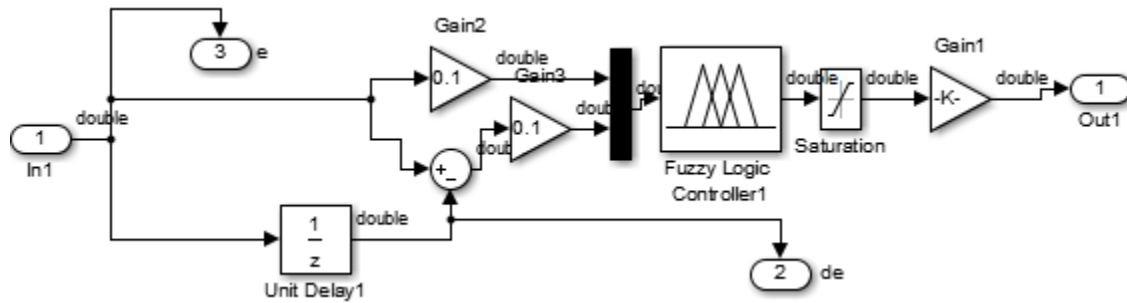


Figure IV.3 : Le système de contrôleur flou

Modèle de la valve :

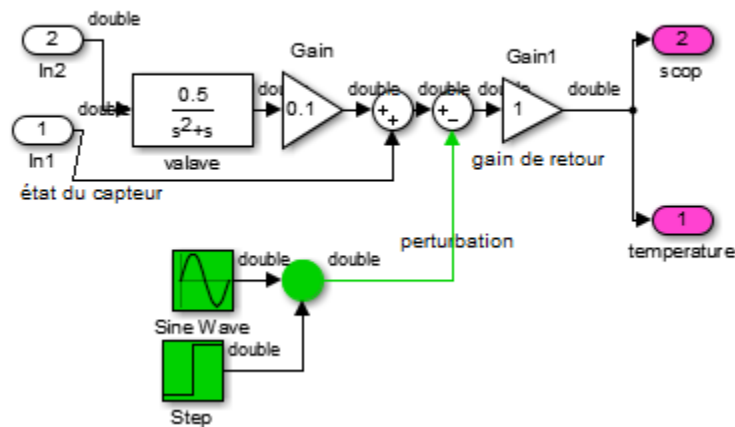


Figure IV.4 : Modèle de la valve.

On commence la simulation d'un système de climatisation dans Matlab :

Le design du contrôleur flou se fait de la même façon que tous les systèmes flous avec Matlab. On commence en tapant 'fuzzy' à la ligne de commande. On obtient alors le FIS Editor de Matlab, montré à la figure suivante.

Pour le système de climatisation sous étude, on n'utilise que l'erreur comme variable de contrôle. On a donc un système très simple, avec deux entrées, une sortie. Dans plusieurs systèmes flous, on utilise aussi la dérivée de l'erreur, et on obtient alors un système à deux entrées, une sortie.

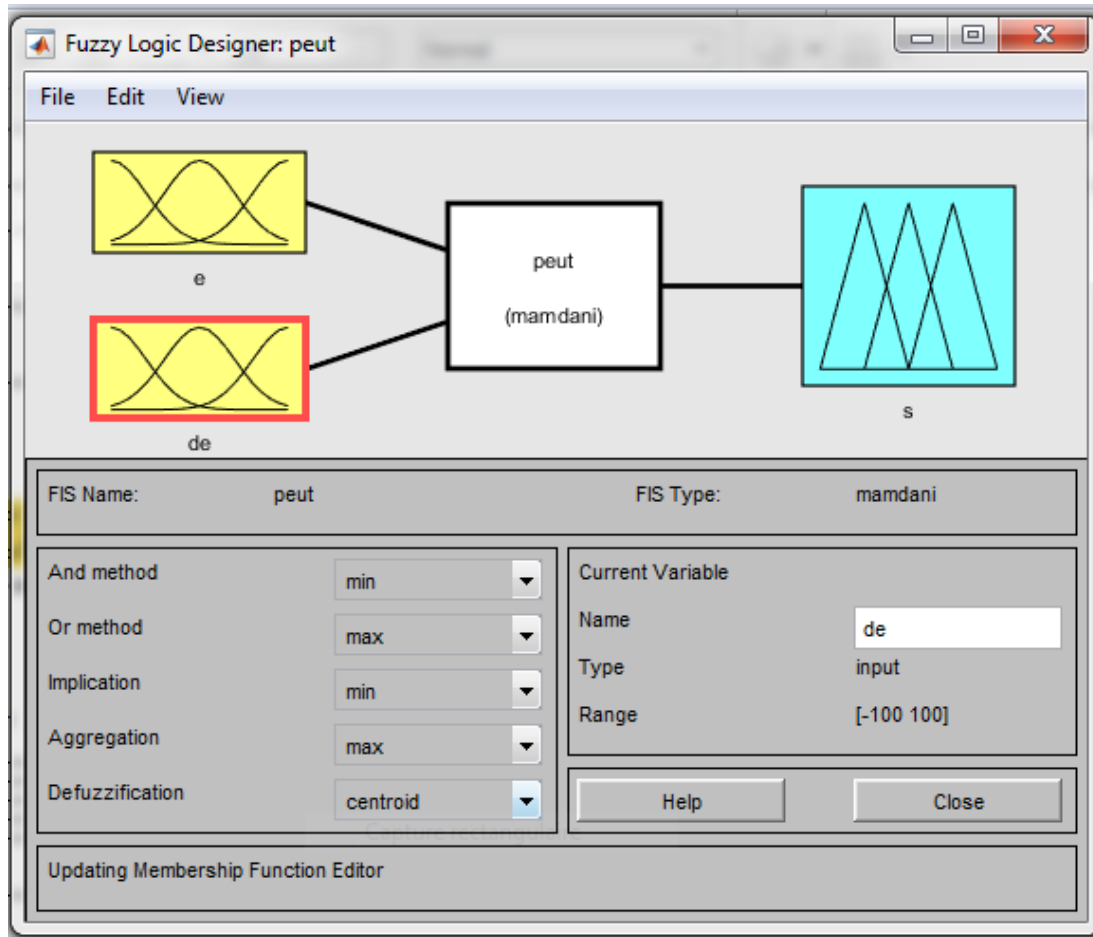


Figure IV.5 : Le système de contrôleur flou

Il faut aussi bien choisir les limites du système (limites de l'entrée et de la sortie). Dans ce cas-ci, l'entrée utilisée est une entrée échelon unitaire. On choisit donc de développer les fonctions d'appartenance du contrôleur flou pour l'entrée 'e' entre -100 et +100

On a choisi que 3 valeurs linguistiques possibles, soit **c**, **ok** et **f**. Il est généralement plus facile de commencer avec un nombre restreint de valeurs linguistiques possibles, pour simplifier le design initial. Par après, si la précision demandée est plus grande, on peut ajouter des valeurs linguistiques.

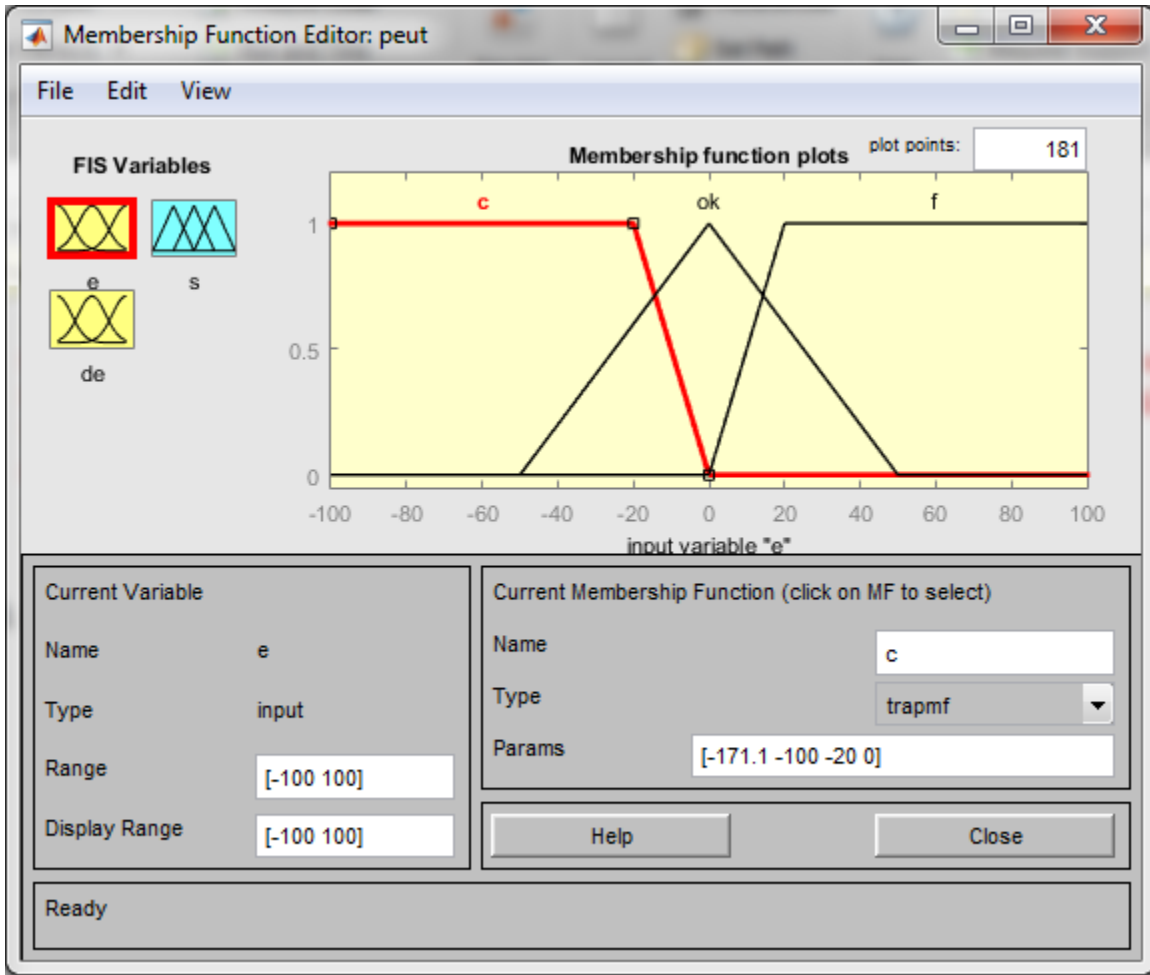


Figure IV.6 : Éditeur de fonction d'appartenance pour l'entrée 'e'

Chapitre IV Simulation sous Matlab d'un système de climatisation

On choisit aussi 3 valeurs linguistiques pour l'entrée 2 'de', soit **c**, **ok** et **f**.

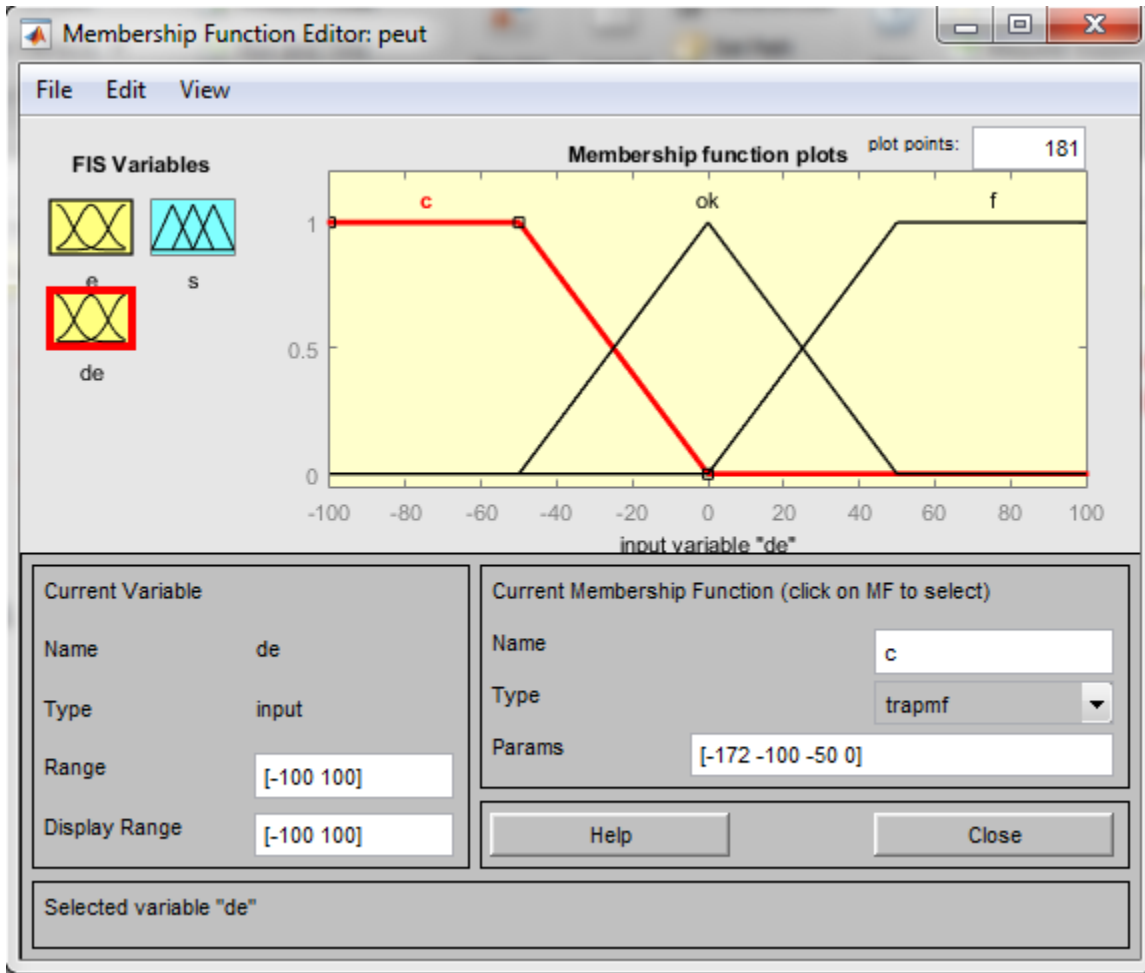


Figure IV.7 : Éditeur de fonction d'appartenance pour l'entrée 'de'

Chapitre IV Simulation sous Matlab d'un système de climatisation

Pour la sortie 's' on a choisi 5 valeur linguistiques soit : 'cb', 'c' et 'ok', 'f' et 'fb'

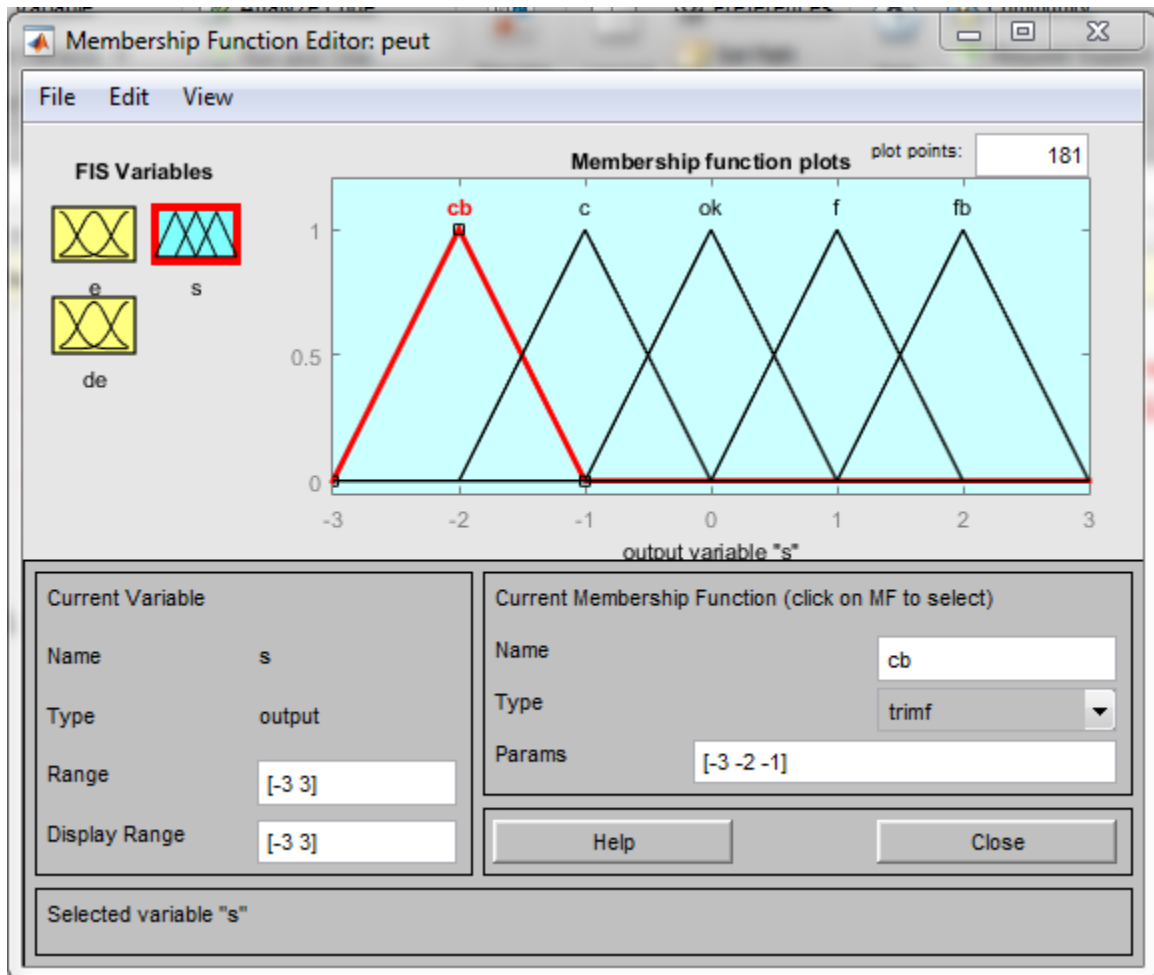


Figure IV.8 : Éditeur de fonction d'appartenance pour la sortie 's'

- Remarquez que l'intervalle de la sortie est de -3 à +3.
 - On peut vérifier que le signal de contrôle est -2.33×10^{-17} lorsque les entrées est 0.
- On'a 9 règles qu'on utilise sont :
 - 1 1, 5 (1) : 1
 - 1 2, 4 (1) : 1
 - 1 3, 3 (1) : 1
 - 2 1, 4 (1) : 1
 - 2 2, 3 (1) : 1
 - 2 3, 2 (1) : 1
 - 3 1, 3 (1) : 1
 - 3 2, 2 (1) : 1
 - 3 3, 1 (1) : 1

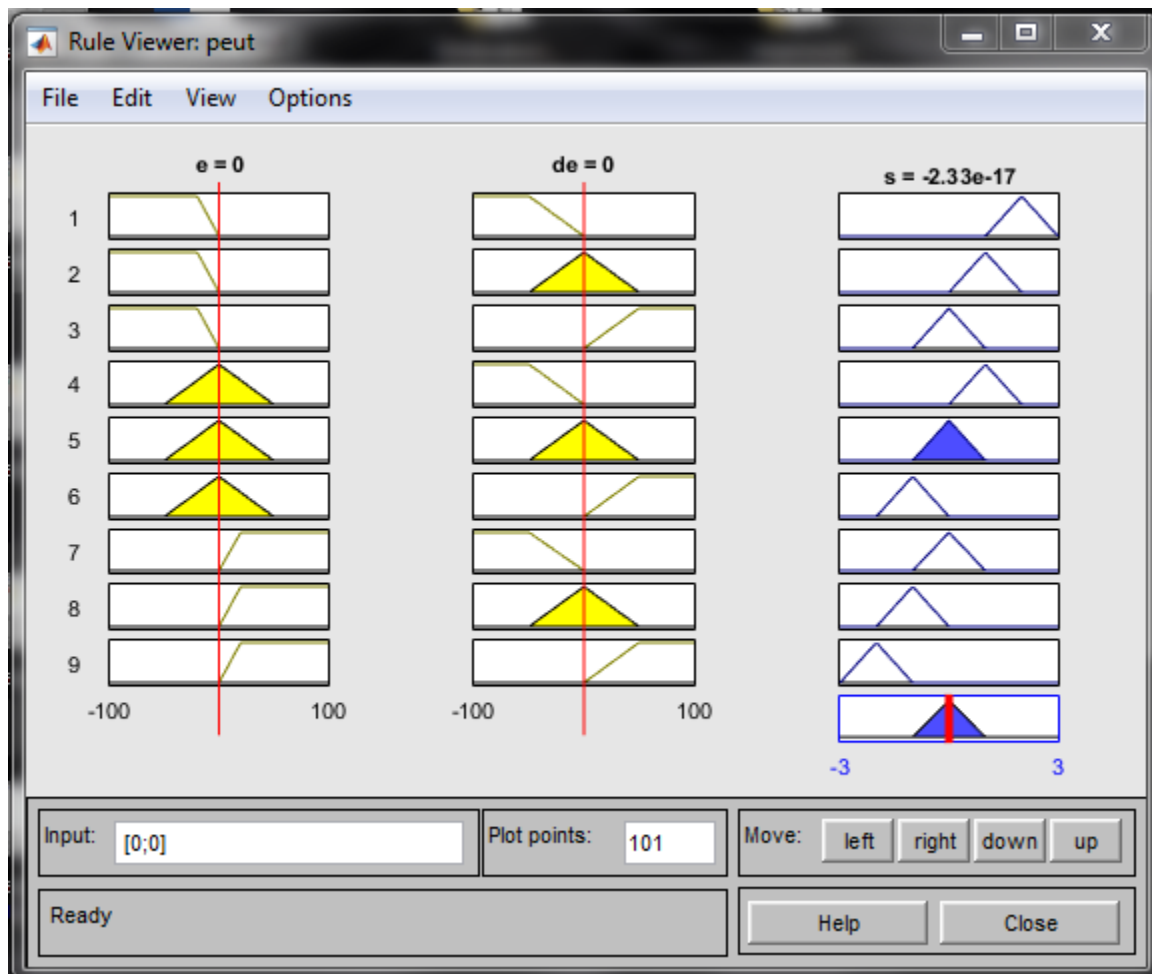


Figure IV.9 : Observateur de règles

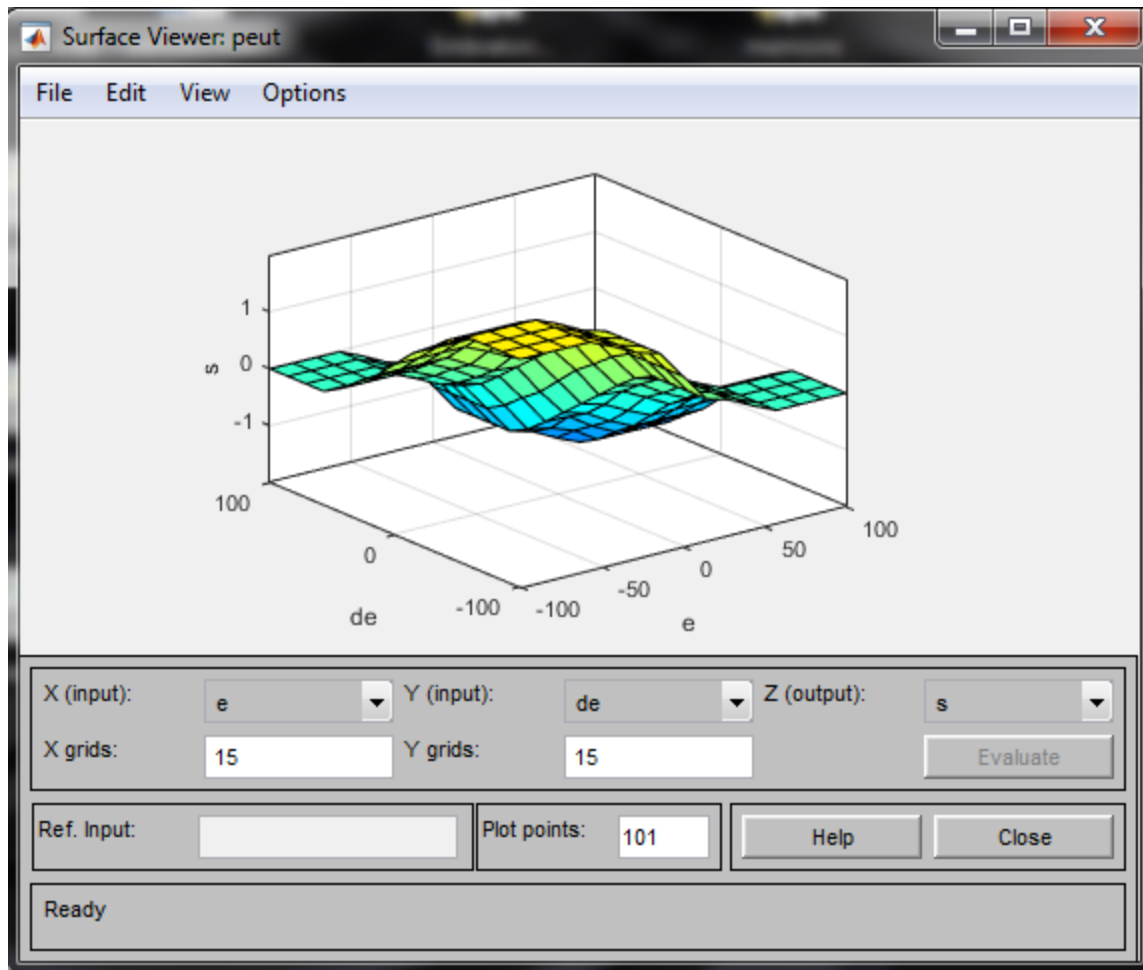


Figure IV.10 : Observateur de la surface.

IV.5 Les Résultats De simulation

On a deux états du capteur valeur positive, et valeur négative, on a choisi la valeur positive manuelle et on simuler.

IV.5.1.Etat Du Capteur Valeur positive :

IV.5.1.1 Choix Contrôleur Floue :

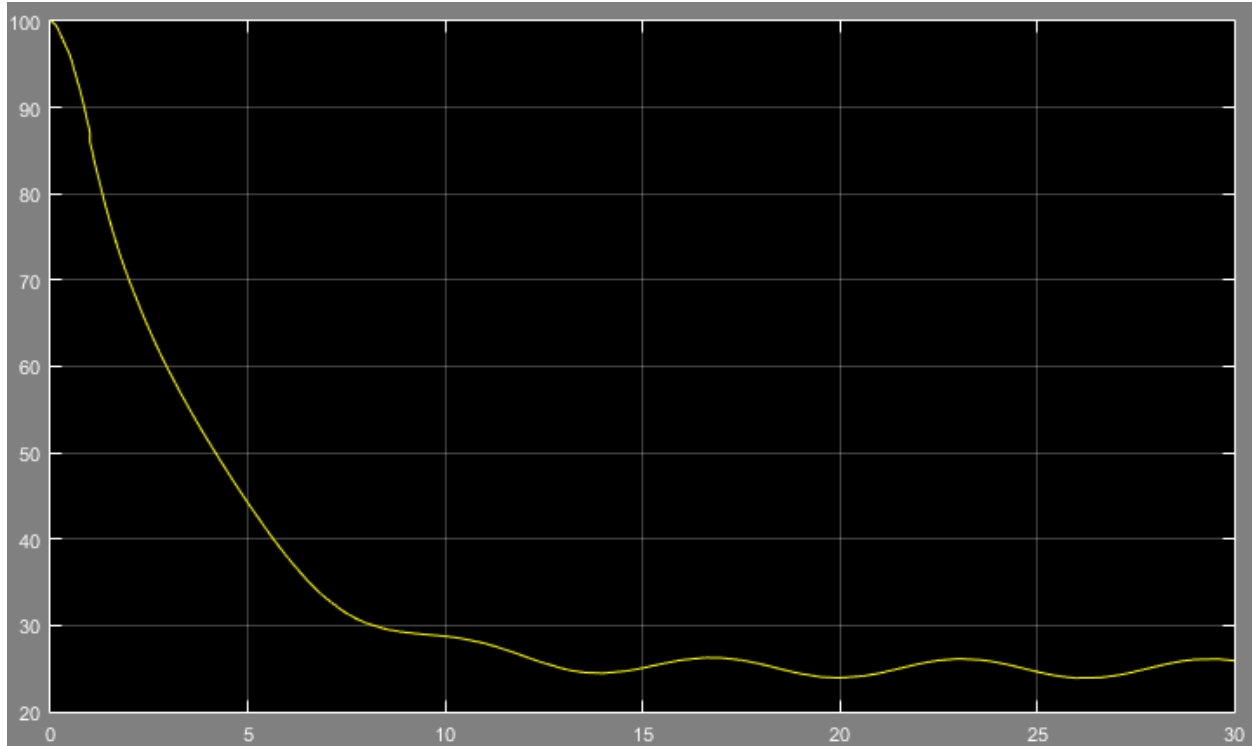


Figure IV.11 : le graphe de Modèle de la valve

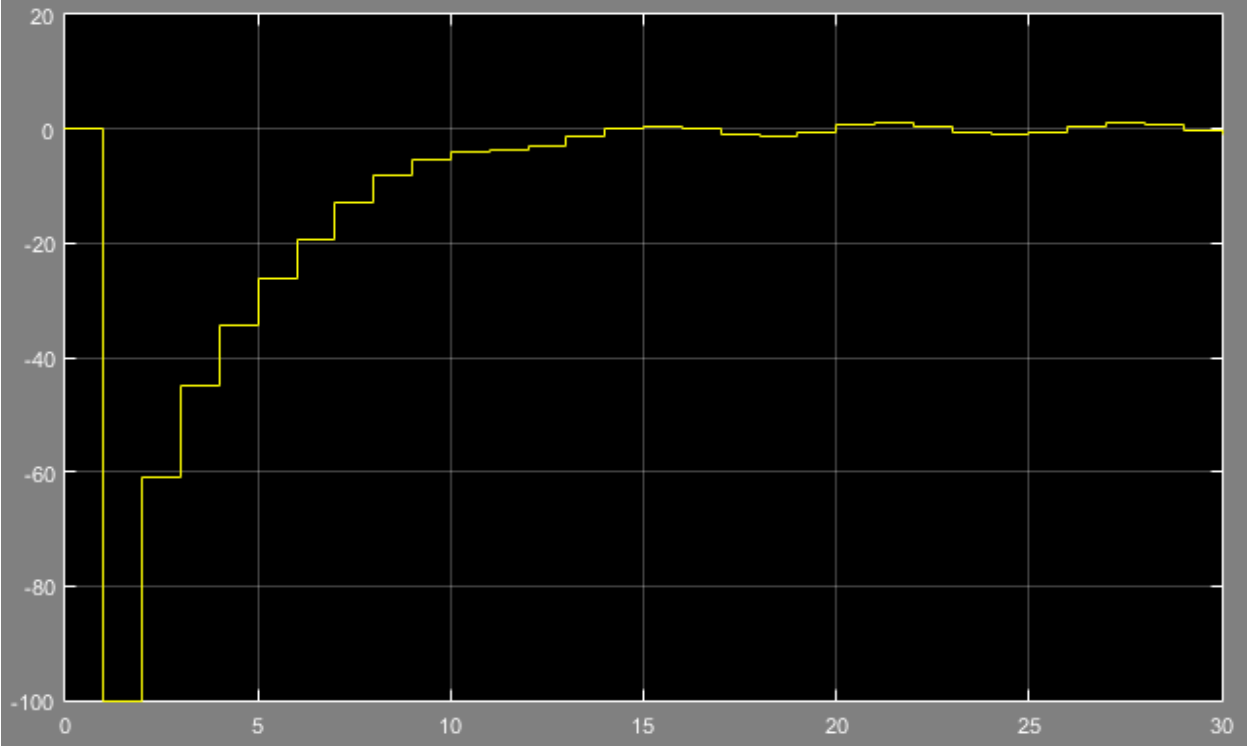


Figure IV.12 : le graphe de L'entrée 'de' de controleur flou

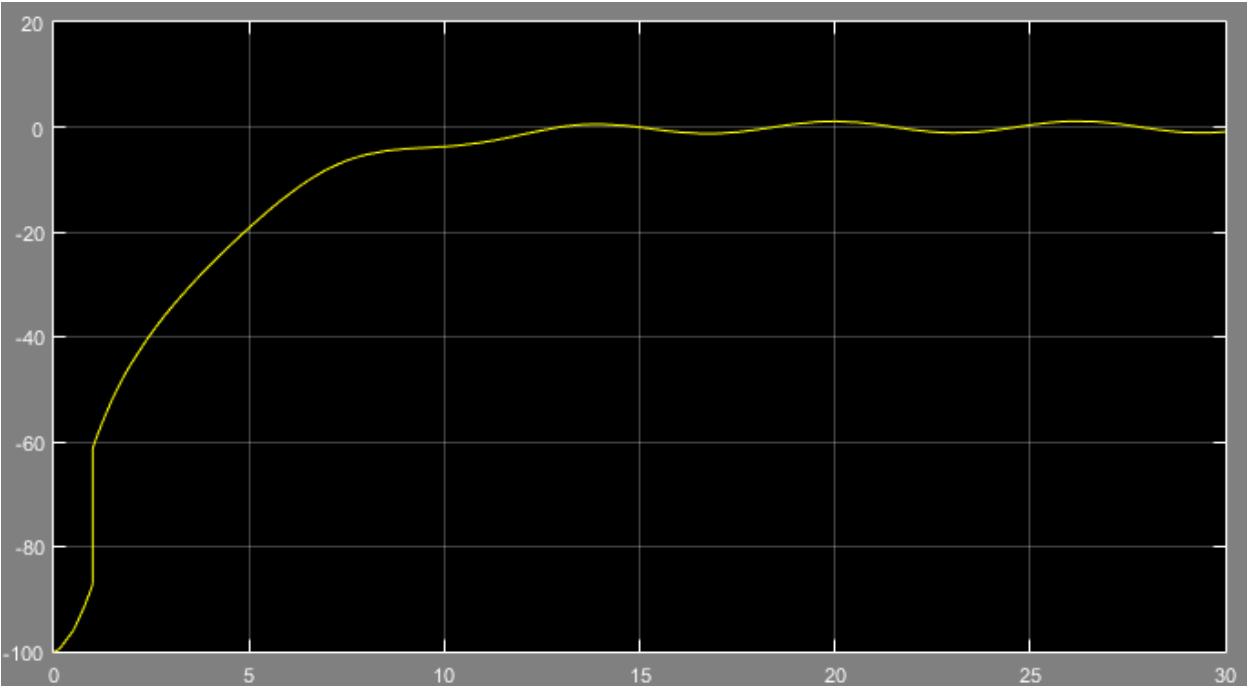


Figure IV.13 : le graphe de L'entrée 'e' de contrôleur flou

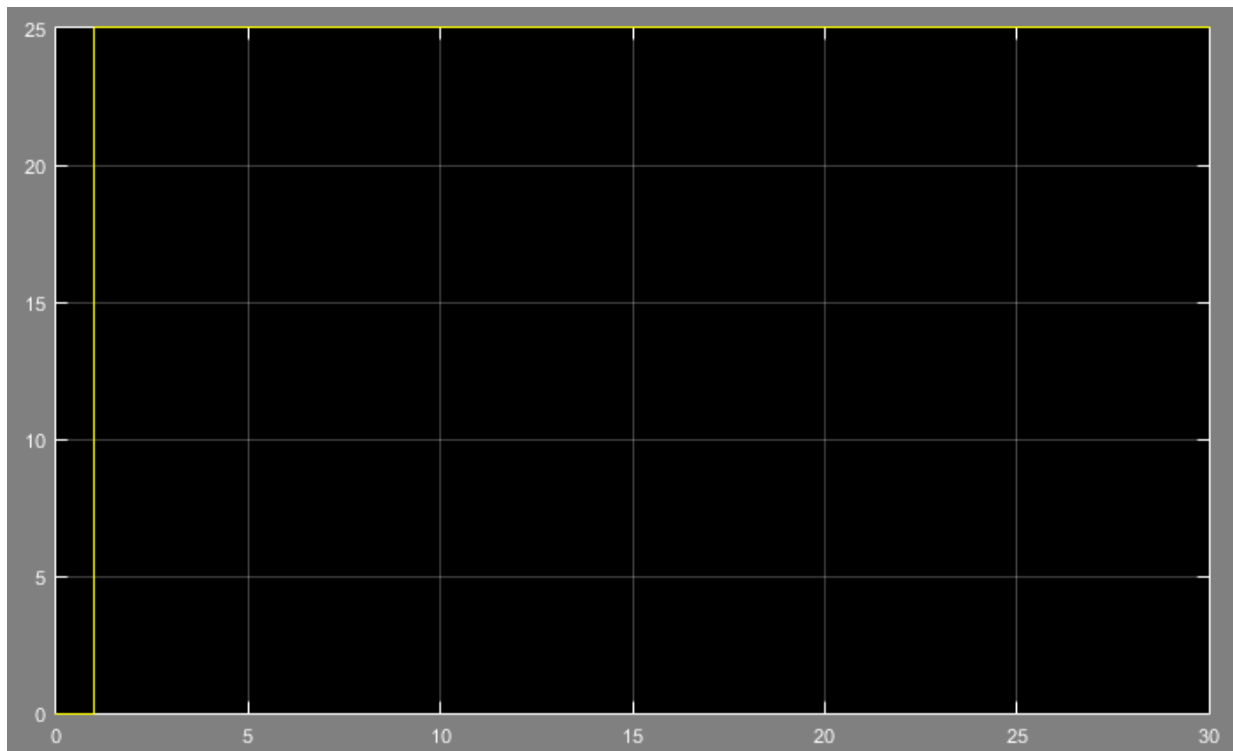


Figure IV.14 : le graphe de Température désirée



Figure.IV.15:le graphe de L'entrée du régulateur PID

IV.5.1.2.Choix de contrôleur PID

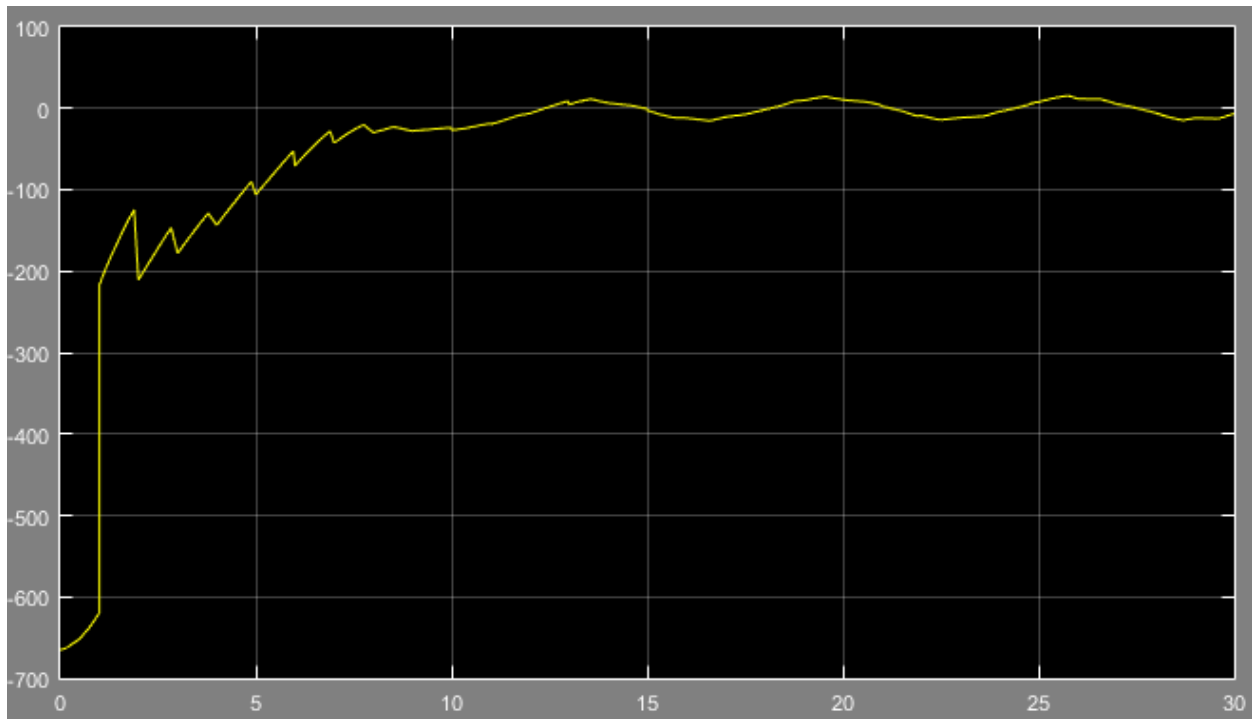


Figure IV.16: le graphe de La Sortie' de contrôleur Flou

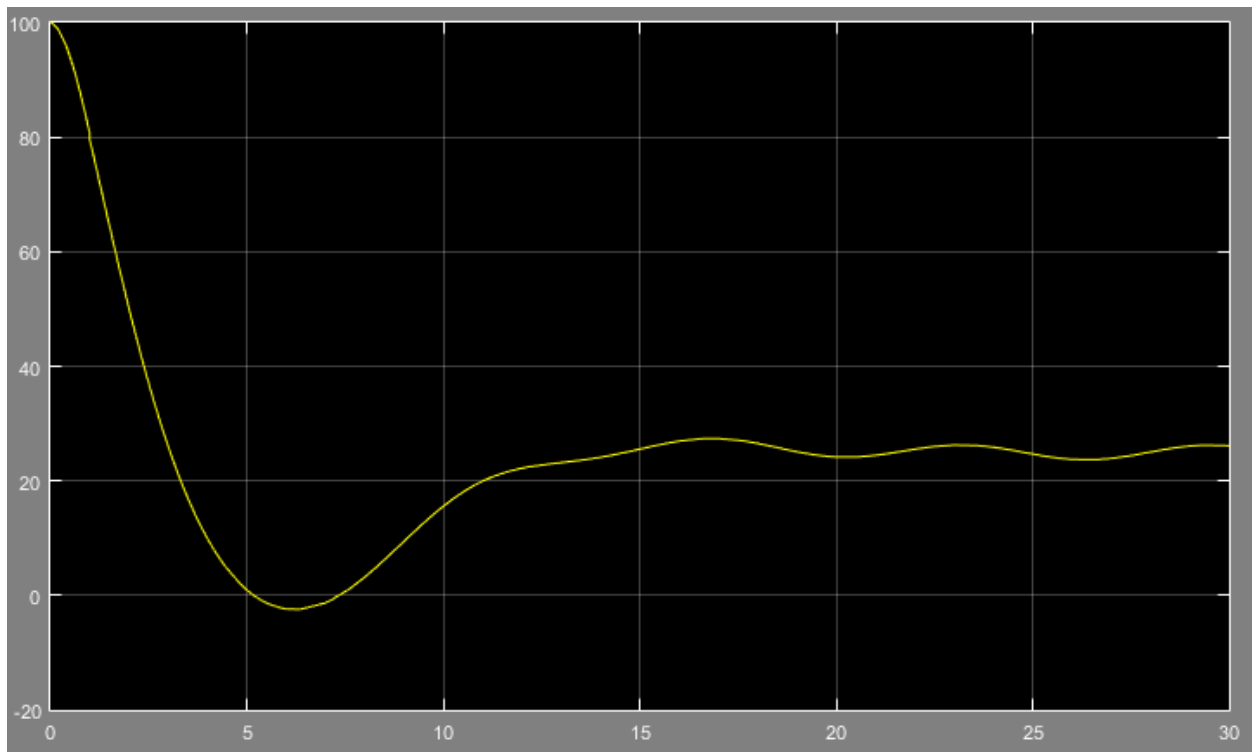


Figure IV.17 : le graphe de Modèle de la valve

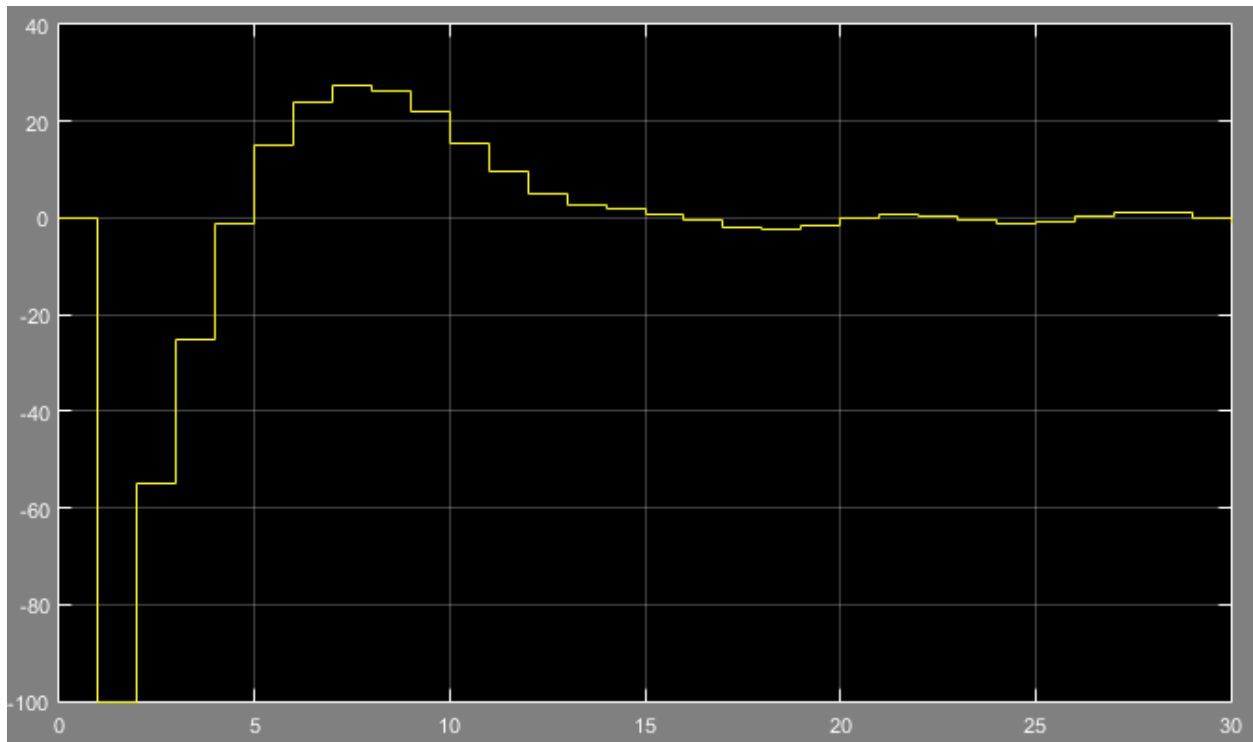


Figure.IV.18 : le graphe de L'entrée 'de' de contrôleur floue

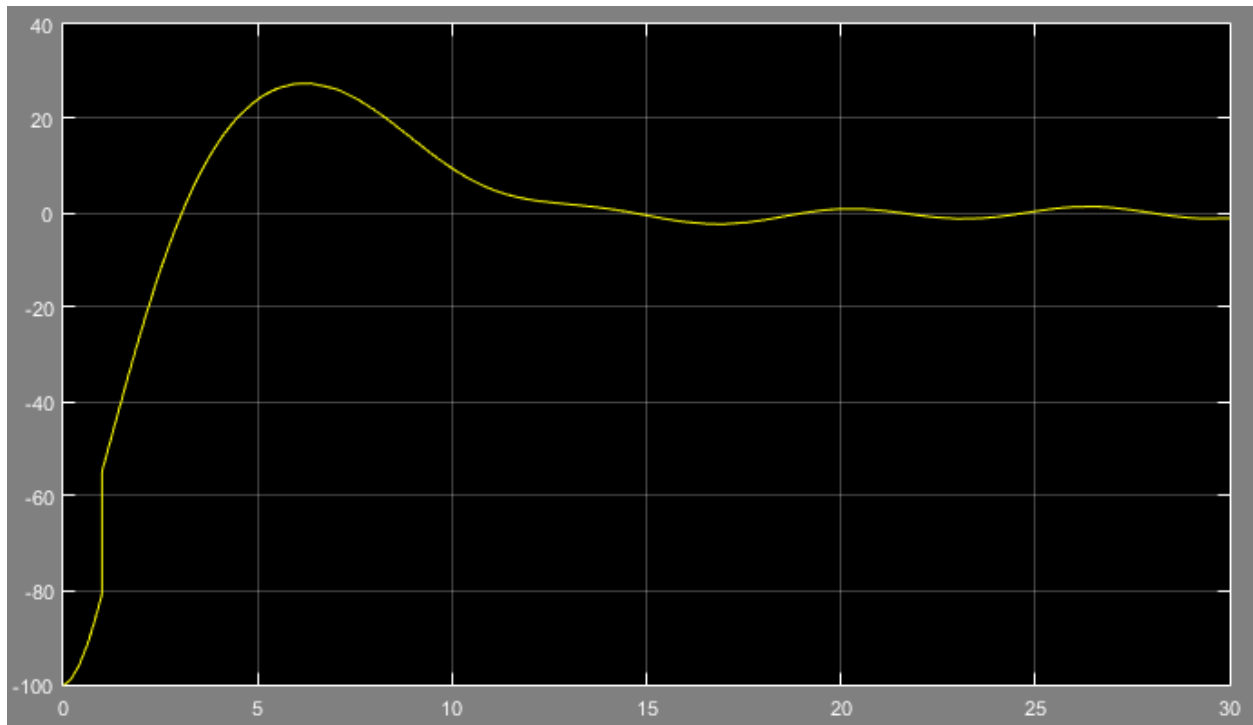


Figure IV.19 :le graphe de L'entrée 'e' de contrôleur floue

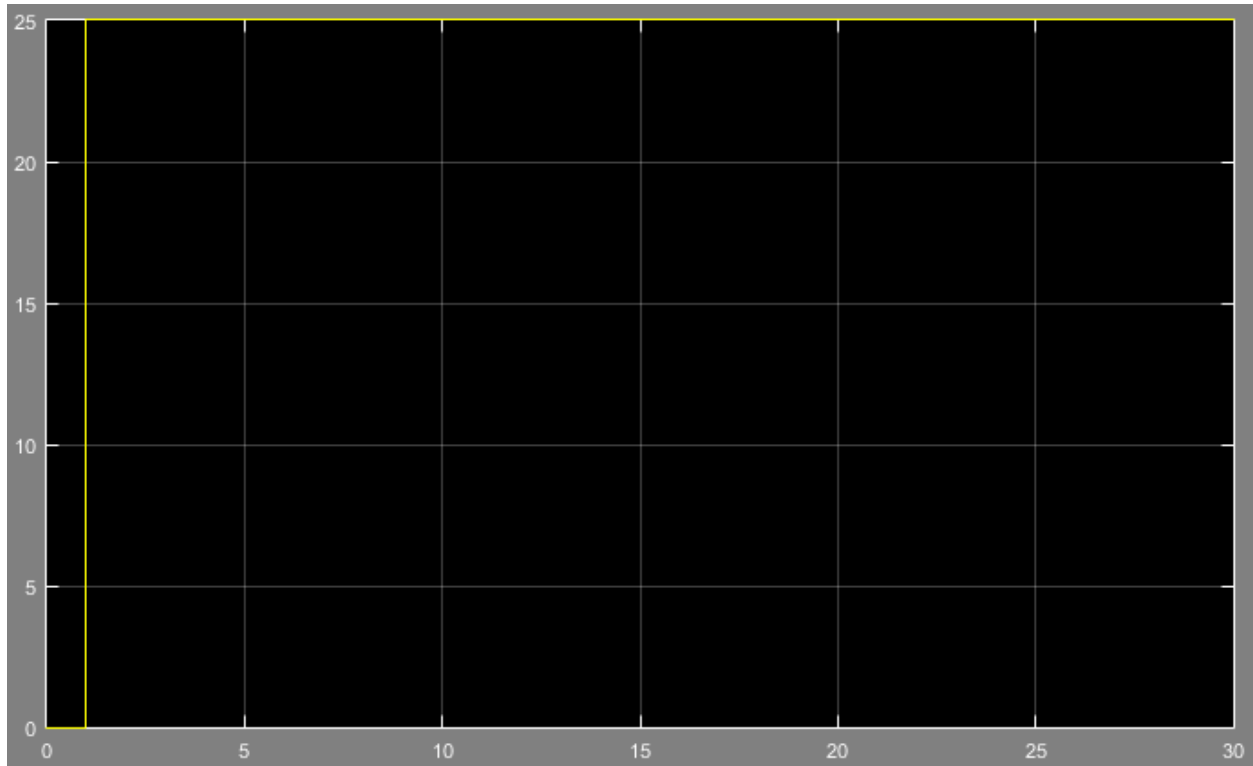


Figure IV.20 : le graphe de la Température désirée

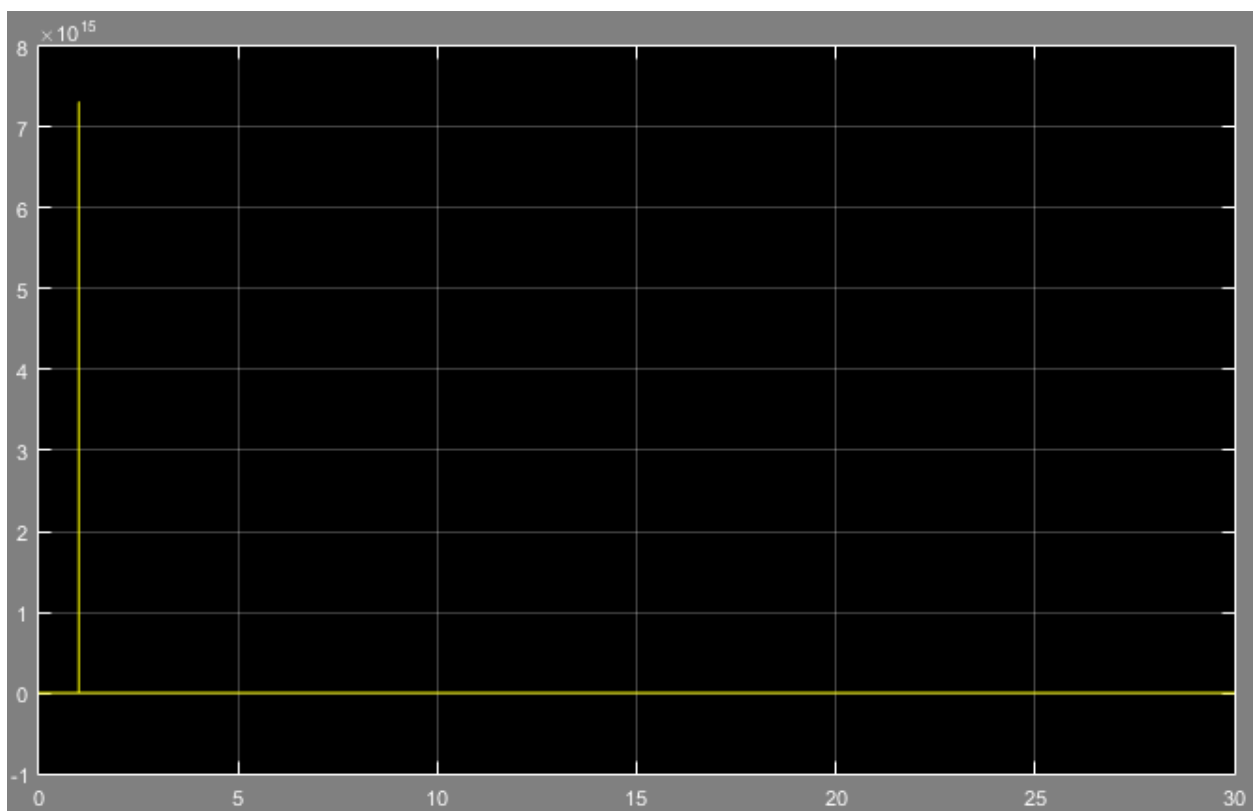


Figure IV.21 : le graphe de la sortie de contrôleur PID

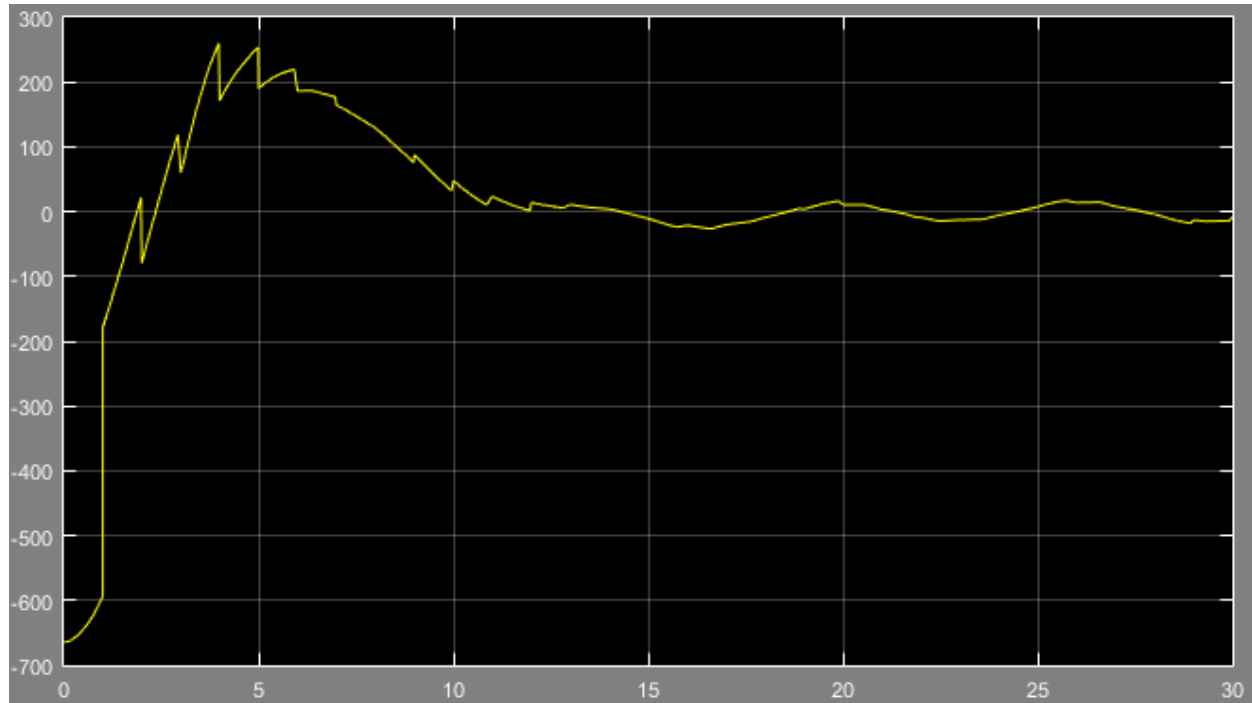


Figure IV.22 : le graphe de la sortie's' de contrôleur floue

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait la simulation d'un système de climatisation pour maintenir la température autour de la référence choisie, on a conclu les résultats de cette simulation et on a observé la différence entre le régulateur PID et le régulateur floue.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion :

Dans cette étude nous avons présenté l'optimisation d'un système de climatisation en manière générale et nous avons appliqué la commande floue et la régulation PID sur ce système, ainsi que leurs réglages et leurs fonctionnements.

Pour parvenir au bout de notre travail nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté les principes généraux de fonctionnement d'un système de climatisation et les techniques de climatisation, et nous avons expliqué la climatisation centralisée, les avantages et les inconvénients.

Passant au deuxième chapitre nous avons présenté les notions générales de la logique floue et la composition d'un système de commande floue. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou et les différents types de commande en utilisant la logique floue.

Dans le troisième chapitre nous avons défini le Régulateur PID, et expliqué les principes générales et les différentes actions et aussi le réglage de ce dernier.

Finalement, au quatrième chapitre nous avons fait la simulation d'un système de climatisation, nous avons défini logiciel Matlab que nous avons utilisé dans cette simulation, pour faire le programme principale de système de climatisation dans Simulink, après cette simulation a affiché les résultats sous forme des graphes qui représente la température desserré et la température réglés par les régulateurs floue et PID.

Après cette étude nous avons compris comment réglée la température d'un système de climatisation, et diminuer la valeur d'erreur.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1]. A.DAHDOUH " La Commande par Mode de Glissement avec Une Surface de Glissement Linéaire Appliquée au Système Hydraulique à Réservoirs Couplés "- article 2014.
- [2]. ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (2007). *Les chiffres clés du bâtiment en 2006*, Publications de l'ADEME.
- [3]. B. DEMAYA " Commande floue des systèmes à dynamiques complexes- Application à la commande d'un moteur thermique "- Thèse de Docteur LAAS Toulouse - 17 Octobre 1994
- [4]. CSTB (2006).*Réglementation thermique 2005 : Nouvelle réglementation à la mesure des enjeux énergétiques, économiques, sociaux et environnementaux*, Presse du CSTB, 550p.
- [5]. D. Amitrano, Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit "puits canadien", Université J. Fourier, Grenoble
- [6]. F. AMRANE, N. GOULMANE "Commande par logique floue d'un moteur à courant continu "- Projet de fin d'études ingénieur - EMP 1997
- [7]. Guanrong C Trung T.P. (2001). *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logics and fuzzy control systems* ISBN 0-8493-1658-8, CRC Press LLC.
- [8]. H. BUHLER " Réglage Par Logique Floue ", Presses Polytechniques et Universitaires
- [9]. IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics" , vol 15, n°1, pp 116-132, 1985.2004.
- [10]. J. Godjevac Idées nettes sur la logique floue, Presses polytechniques et universitaires romanes, Lausanne, 1999
- [11]. Journal Officiel (2006).*Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions*, République française.
- [12]. K. BENMANSOUR" Etude et implantation de contrôleurs robustes et flous d'une machine synchrone à aimants permanents avec pilotage vectoriel ", Thèse de magister- Novembre 1999

Références Bibliographiques

- [13]. K. ZINSER, R. SCHREIBER " La logique floue : une nouveauté prometteuse de la technique d'automatisation " - La Technique moderne- N° 1-2- 1994
- [14]. L.A. ZaADAH "Information and Control , Fuzzy Sets, vol 8, pp 338-353, 1965. "
- [15]. Lygouras J.N., Botsaris P.N., Vourvoulakis J., Kodogiannis V. (2007). Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system, *Applied Energy* Volume 84, pp 1305-1318.
- [16]. M. BAUER " Application de contrôleurs à logique floue pour la commande vectorielle des machines à induction : commande en vitesse et en position " Rapport de stage ingénieur- ESIM-22 Février 1995
- [17]. M. RACHDI, DJ. MAIZI "Implantation sur DSP de contrôleurs flous pour la cde vectorielle du modèle analogique de MAS" - Projet de fin d'études ingénieur - EMP 1997
- [18]. M. SUGENO "Fuzzy identification of systems and Its applications to modeling and control,
- [19]. Nougier, J.P (1993). *Méthodes de calculs numériques*, Masson. Paris B., Eynard J., François G., Talbert T., Polit M. (2008). A prototype for on-line monitoring and control of energy performance for renewable energy buildings, *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO'2008*, Portugal.
- [20]. P. Hollmuller, Thèse N°3357, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments, Université de Genève
- [21]. Pr. [BEN ABDENNOUR RIDHA](#) " Identification et commande numérique des procédés industriels, R. Ben ABDENNOUR | P. BORNE | M. KSOURI | F. M'SAHLI | Editeur : TECHNIP paru le : 04/2001 Collection : Méthodes et pratiques de l'ingénieur 11 "
- [22]. Romandes CH-1015 Lausanne. 1994.
- [23]. S. Miyamoto, S. Yasunobu, H. Ihara, " Predictive fuzzy control and its application to automatic train operation systems, in "Analysis of fuzzy information", CRC Press, New York, 1987.