



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

\*\*\*\*\*



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR

Spécialité : ELECTRONIQUE

Option : Electronique Automatique



**Présenté par** : Mr RAMAHATRA Harilova Razaka

**Soutenu le** : 30 Mai 2008

**N° d'ordre** : 10/EN/EA/07

**Année Universitaire** 2006-2007

# **REGULATION DE LA TEMPERATURE D'UNE SERRE HORTICOLE**

**Par logique floue**

**Spécialité :** ELECTRONIQUE

**Option :** Electronique Automatique

**Présenté par :** Mr RAMAHATRA Harilova Razaka

- **Devant les membres de Jury :**
  - Monsieur RABESANDRATANA Mamisoa, président
  - Madame RABEHERIMANANA Lyliane, examinateur
  - Monsieur RAKOTONDRA SOA Justin, examinateur
  - Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson, examinateur
  
- **Rapporteur :** Monsieur RATSIMBA MAMY Nirina

**Soutenu le 30 Mai 2008**

# REMERCIEMENTS

Nous tenons en premier lieu à remercier Dieu Tout-puissant pour tout l'Amour qu'Il nous a partagé à travers la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos vifs remerciements et notre profonde gratitude :

A notre Chef de Département, MR RASTEFANO Elisée, qui nous a éduqué, apporté conseils et directives, durant ces années de formation.

A notre encadreur, Monsieur RATSIMBA MAMY Nirina, qui malgré ses maintes occupations, nous a partagé ses connaissances et son précieux temps pour l'élaboration à terme et à bien de ce travail.

A Monsieur RABESANDRATANA Mamisoa, qui a bien voulu présider cette soutenance de mémoire.

A Madame RABEHERIMANANA Lyliane Irène,  
Monsieur RAKOTONDRASOA Justin,  
Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson,  
qui ont accepté d'apprécier notre travail.

A tous les Enseignants de l'école et du département Electronique, qui nous ont partagé leur savoir-faire et leur connaissance.

A tous nos collègues, amis et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce manuscrit.

A tous les membres de nos familles respectives, pour leurs soutiens moraux, affectifs et financiers.

Lova

## **RESUME**

La régulation industrielle offre de nombreuses méthodes pouvant être utilisées en fonction des buts du réglage et de type du système considéré. Une étude de quelques méthodes de régulation industrielle permettra de cerner l'objet et le principe de ces différentes approches. La régulation par logique floue et la régulation par retour d'état sont ici utilisées pour le réglage de la température du système de chauffage d'une serre horticole. Les étapes de conception d'un contrôleur flou sont abordées. Après la modélisation du système, une simulation avec un contrôleur flou suivi d'une comparaison des résultats avec ceux obtenus avec un correcteur d'état.

# Table des matières

I.1	Objet de la régulation industrielle [1].....	
I.2	Eléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique.....	
I.2.1	Les différents blocs fonctionnels :.....	
I.2.2	Les signaux :.....	
I.2.3	La régulation numérique.....	
I.3	Critères de performance d'un système de régulation industrielle [2].....	
I.3.1	La stabilité.....	
I.3.2	La précision.....	
I.3.3	La rapidité.....	
II.1	Introduction.....	
II.2	La régulation à posteriori ou en boucle fermée simple [2].....	
II.2.1	Principe.....	
II.2.2	Rôle des actions PID dans la boucle fermée.....	
a)	Action proportionnelle.....	
b)	Action intégrale.....	
c)	Action dérivée.....	
II.2.3	Le régulateur PID.....	
II.3	La régulation en cascade [3].....	
II.4	La régulation de proportion [3].....	
II.5	La régulation par logique floue [4].....	
II.5.1	Historique.....	
II.5.2	Notion de commande floue.....	
a)	Description d'un procédé.....	
b)	Fonction d'appartenance.....	
c)	Les opérateurs de la logique floue.....	
d)	Déduction floue ou inférence.....	
II.5.3	Conception d'un régulateur par logique floue.....	

- a) Fuzzification.....
- b) Bases de règles et inférences.....
- c) Défuzzification.....
- III.1 Description de la serre.....
- III.1.1 Les dispositifs de régulation.....
- a) Stockage de la chaleur.....
- b) Système de chauffage.....
- c) Ventilation.....
- d) Humidificateur.....
- e) Eclairage.....
- f) Appareils de mesure.....
- III.2 Modélisation du système de chauffage de la serre.....
- IV.1 Etude par logique floue.....
- IV.1.1 Définition des variables linguistiques pou le contrôle de la température.....
- IV.1.2 Définition des fonctions d'appartenance.....
- IV.1.3 Définition de la base de règles.....
- IV.2 Simulation par logique floue.....
- a) Interprétation du résultat.....
- b) Avantages et inconvénients du réglage par logique floue.....
- c) Comparaison des résultats.....

# Liste des abréviations

**t**=Variable temps

**y<sub>i</sub>(t)**=grandeurs physiques des systèmes.

**c<sub>i</sub>(t)**=consignes.

**u<sub>i</sub>(t)**=commandes.

**ε(t)**=erreur ou écart

**p(t)**=Perturbation

**n(t)**=Bruit de mesure

**x(t)**=Grandeur réglée

**CAN**=Convertisseur analogique-numérique

**CNA**=Convertisseur numérique-analogique

**FTBO**=Fonction de transfert en boucle ouverte

**MP**=Marge de phase

**MG**=Marge de gain

**G(dB)**=Gain en décibel

**K**=Vecteur gain, ou Rapport ratio, ou coefficient variable selon la nature de la surface considérée (selon leur cas)

**K<sub>i</sub>**=Coefficients

**T<sub>m</sub>**=Temps de montée

**T<sub>r</sub>**=Temps de réglage

**G<sub>r</sub>**=Gain du régulateur

**P**=Fonction proportionnelle

**u<sub>r</sub>(t)**=Commande du régulateur

**T<sub>i</sub>**=Temps intégrale

**T<sub>d</sub>**=Dosage de l'action dérivée (Temps de dérivée)

**PID**=Proportionnelle Intégrale Dérivée

**P**=Proportionnelle

**I**=Intégrale

**D**=Dérivée

**M**=Mesure

**S**=Sortie

**R1**=Correcteur du régulateur 1

**R2**=Correcteur du régulateur 2

$\alpha$ =Coefficient de proportion

**Q**=Quantité de chaleur

**q**=Quantité de chaleur par unité de volume

**T<sub>i</sub>**=Température local

**T<sub>ext</sub>**=Température extérieur

**V**=Volume du local

**R**=Résistance électrique

**U**=Tension d'alimentation

**P**=Puissance utile pour le chauffage

**CO<sub>2</sub>**=Dioxyde de Carbone

# Liste des figures

**Figure I.1:** Structure d'un système de régulation automatique

**Figure I.2:** Schéma fonctionnel mettant en évidence les éléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique

**Figure I.3:** Schéma fonctionnel générale d'un système de régulation numérique

**Figure I.4 :** Marge de Gain et Marge de Phase d'un système de régulation

**Figure I.5 :** Représentation des performances d'un système de régulation automatique

**Figure II.1:** Schéma fonctionnel d'une régulation en cascade

**Figure II.2:** Schéma fonctionnel d'une régulation de proportion

**Figure II.3:** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

**Figure II.4:** Fonction d'appartenance de formes triangulaire et trapézoïdale

**Figure II.5:** Opérateur NON

**Figure II.6 :** Operateur OU

**Figure II.7:** Operateur ET

**Figure II.8:** Opérateur ET réalisé par la fonction produit

**Figure II.9:** Opérateur OU réalisé par la fonction de la somme

**Figure II.10:** Structure interne d'un régulateur par logique floue

**Figure II.11:** Fuzzification d'une mesure exacte

**Figure II.12:** Fuzzification pour une mesure incertaine

**Figure II.13:** Défuzzification par centre de gravité

**Figure II.14:** Défuzzification par valeur maximale

**Figure III.1:** Système de chauffage par air pulsé

**Figure IV.1:** Fonctions d'appartenance des variables de commande

**Figure IV.2** Schéma bloc du système bouclé

**Figure IV.3:** Réponse à un échelon du système non corrigé

**Figure IV.4:** Schéma bloc du système avec le contrôleur flou

**Figure IV.5:** Réponse à un échelon du système corrigé

**Figure IV.6 :** Comparaison des résultats

**Figure A2.2:** Courbe de l'évolution de température

# Liste des tableaux

**Tableau 1:** Signaux principaux d'un système de régulation automatique

**Tableau 2 :** Tableau des erreurs permanentes

**Tableau 3 :** Différents structures du régulateur PID

# INTRODUCTION

En ce début du troisième millénaire, on assiste à une vulgarisation des technologies électroniques et informatiques dans tous les secteurs d'activité. Servant de support, ces technologies ont permis le développement de nouvelles techniques en régulation industrielle. La commande des processus par ordinateur, utilisant des algorithmes de réglage complexes tel le réglage par logique floue et la commande par retour d'état devient alors une simple alternative vis-à-vis de nombreuses autres méthodes de régulation.

Compte tenu de la perturbation climatique planétaire, la protection de l'environnement devient une tâche primordiale pour tout les pays du monde entier. Comme Madagascar regorge d'une multitude d'espèces végétales endémique, la sauvegarde de cette richesse naturelle est alors importante. La culture sous serre apparait ainsi comme une alternative envisageable et intéressante. De plus la recherche de nouvelles semences répondant à des conditions climatiques spécifiques peut se faire dans une serre. C'est dans cette optique que nous avons entamé notre étude sur la régulation de la température d'une serre horticole.

Pour ce faire, nous avons divisé notre étude en 4 parties. Après une introduction sur la régulation industrielle, s'en suit une aperçue de quelques méthodes de régulation industrielle, en insistant sur la régulation par logique floue. Une description de la serre et de son système de chauffage est alors faite, suivit de la modélisation du système de chauffage. En dernier lieu, la régulation de la température de ce dernier est abordée puis simulée moyennant un contrôleur flou.

# Chapitre I : Généralités sur la régulation industrielle

## I.1 Objet de la régulation industrielle [1]

La régulation industrielle ou automatique est une des principales caractéristiques de l'industrie moderne. Elle regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée appelée consigne. Le fonctionnement de l'installation requiert que certaines grandeurs physiques  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , ... d'un système aient un comportement fixé par les consignes  $c_1(t)$ ,  $c_2(t)$ , ..., malgré la présence de perturbations  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ... d'origine externe et imprévisibles. Dans ce but,  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , ... sont mesurées, traitées puis une action correctrice est entreprise sur le système au moyen des commandes  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ .

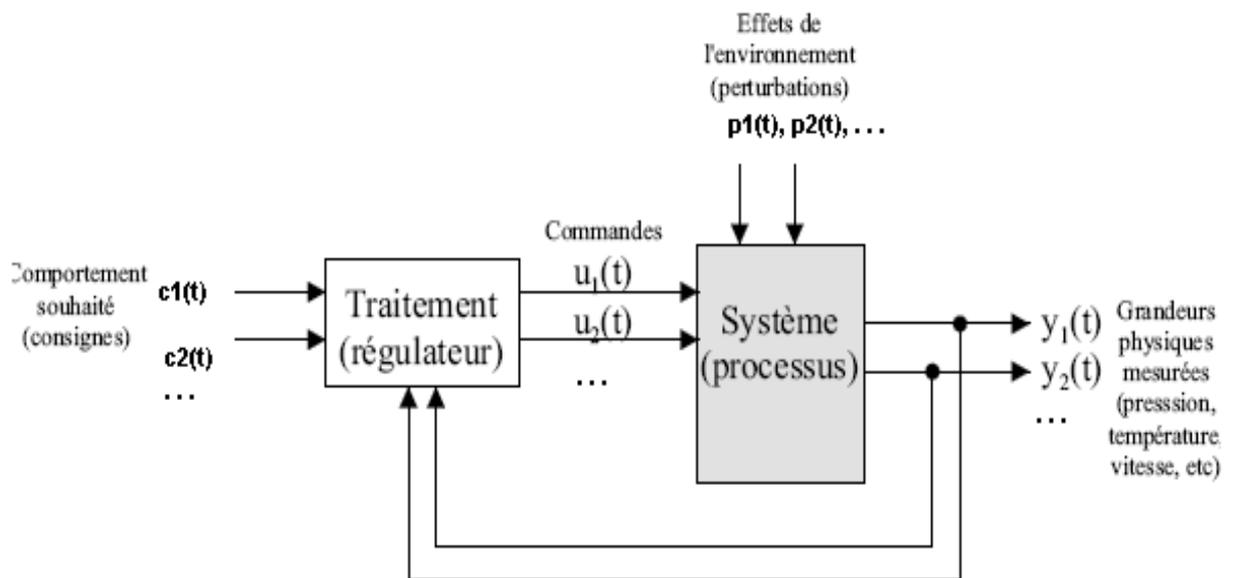


Figure I.1: Structure d'un système de régulation automatique.

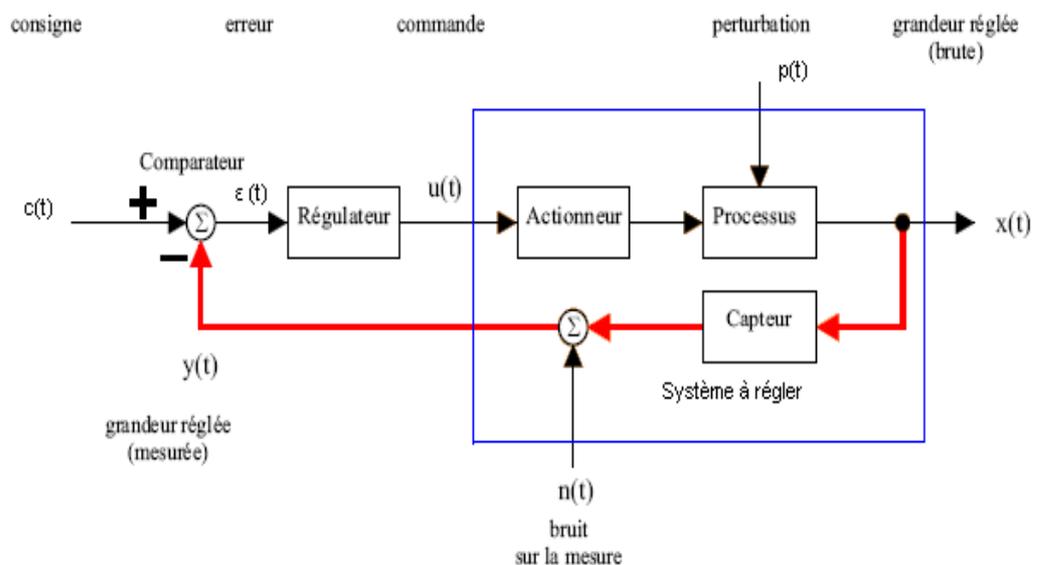
Suivant les procédés et les objectifs à réaliser, il existe une grande variété de matériels et de techniques utilisés en régulation industrielle.

## I.2 Eléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique

### I.2.1 Les différents blocs fonctionnels :

On peut distinguer 4 éléments essentiels :

- Le comparateur qui construit le signal d'erreur  $\varepsilon(t) = c(t) - y(t)$ .
- Le régulateur qui traite le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  et qui donne le signal de commande  $u(t)$  destiné à diminuer l'erreur  $\varepsilon(t)$ .
- Le processus, c'est l'installation à asservir.
- Le capteur qui forme une image aussi fidèle que possible de la grandeur réglée. La qualité de la mesure est très importante en automatique car c'est la grandeur réglée mesurée qui asservit en réalité le système.



**Figure I.2:** Schéma fonctionnel mettant en évidence les éléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique.

Dans l'étude d'un système de régulation industrielle, le système est défini par sa fonction de transfert en utilisant la transformée de Laplace pour les systèmes analogique et la transformée en « z » pour les systèmes numériques.

### I.2.2. Les signaux :

Les signaux intervenant dans le schéma général d'un système de régulation automatique sont résumés dans le tableau ci-après.

**Tableau 4: Signaux principaux d'un système de régulation automatique**

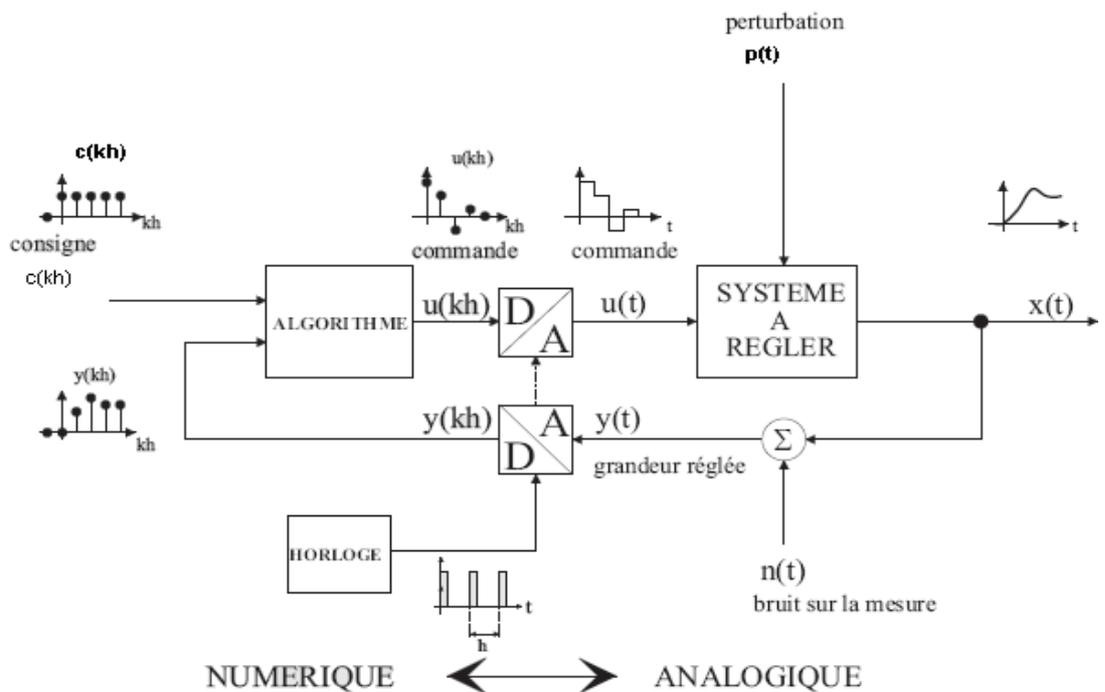
Signal	Notation	Rôle
Consigne	$c(t)$	Signal à poursuivre. Ce signal est donné pour une application
Grandeur réglée brute	$x(t)$	Grandeur physique réglée. Seule une image peut en être obtenue par l'intermédiaire d'un capteur
Grandeur réglée mesurée	$y(t)$	Image de la grandeur réglée brute $x(t)$ fournie par le capteur. C'est la seule information dont dispose le régulateur. Donc la qualité du capteur est primordiale.
Commande	$u(t)$	Signal délivré par le régulateur au système à réglé.
Perturbation	$p(t)$	Signal aléatoire représentant les perturbations agissant sur le système à réglé.
Bruit sur la mesure	$n(t)$	Signal aléatoire représentant les bruits intervenants sur la mesure.
Erreur ou écart	$\varepsilon(t)$	C'est la différence entre la consigne et la grandeur réglée mesurée. $\varepsilon(t) = c(t) - y(t)$

### I.2.3. La régulation numérique

Il faut noter que dans le cas d'une régulation numérique, par comparaison avec le schéma de principe d'une régulation analogique, on trouve de nouveaux blocs fonctionnels, à savoir :

- un convertisseur analogique-numérique : CAN,
- le régulateur qui est remplacé par un régulateur numérique, la régulation se fait alors par le biais d'un algorithme de calcul,
- un convertisseur numérique-analogique : CNA.

La figure I.3 nous donne le schéma de principe d'une régulation numérique.



**Figure I.3: Schéma fonctionnel générale d'un système de régulation**

La consigne, la grandeur réglée mesurée ainsi que la commande sont des signaux numériques, échantillonnés à la fréquence de l'horloge, ici noté « h » comme dans « horloge ». L'algorithme de régulation doit être exécuté dans un temps inférieur à cette fréquence d'échantillonnage.

## I.3 Critères de performance d'un système de régulation industrielle [2]

Pour tout projet de régulation industrielle, les spécifications de l'utilisateur constituent le point de départ du travail de l'ingénieur. Malgré la diversité des problèmes de régulation, on peut considérer les critères suivants :

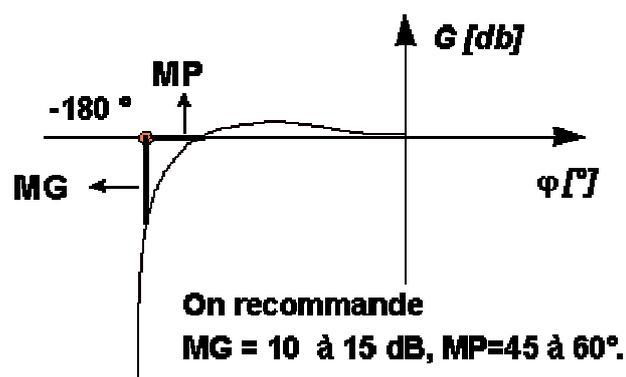
### I.3.1 La stabilité

Cette condition est impérative pour tout système de régulation. Elle définit un caractère de sécurité du système. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la stabilité d'un système. On peut distinguer les critères analytiques (règle de Routh,...) des critères graphiques (règle du revers). Ces derniers, s'appliquant à la grande majorité des systèmes asservis linéaires réels, sont les plus utilisés. Ces critères sont donnés en annexe.

Cependant, ces règles garantissent seulement la stabilité au sens mathématique, et non une « bonne » stabilité. On définit alors la marge de gain et la marge de phase pour avoir un certain degré de stabilité.

La marge de gain est une garantie que la stabilité persistera malgré des variations imprévues du gain en boucle ouverte. C'est l'accroissement maximum autorisé à la pulsation où :  $\text{Arg} [FTBO] = - 180^\circ$

La marge de phase garantit que malgré l'existence de retards parasites non pris en compte lors du réglage, le système restera stable. C'est la phase qu'il faut ajouter à  $\text{Arg}[FTBO]$  lorsque  $|FTBO|_{dB} = 0$  où FTBO désigne la fonction de transfert du système en boucle ouverte.



Où :

- MG : Marge de Gain
- MP : Marge de Phase

Figure I.4 : Marge de Gain et Marge de Phase d'un système de régulation

### I.3.2 La précision

La précision d'un système, en valeur relative, par rapport à la consigne  $c(t)$ , est définie par son signal d'erreur  $\varepsilon(t)$ . Selon que le système se trouve en régime statique  $c(t) = \text{constante}$  (régime permanent constant) ou en régime dynamique  $c(t) = f(t)$  (régime permanent variable), on parle de précision statique ou de précision dynamique. Pour tout système, on essaiera alors de minimiser cette erreur.

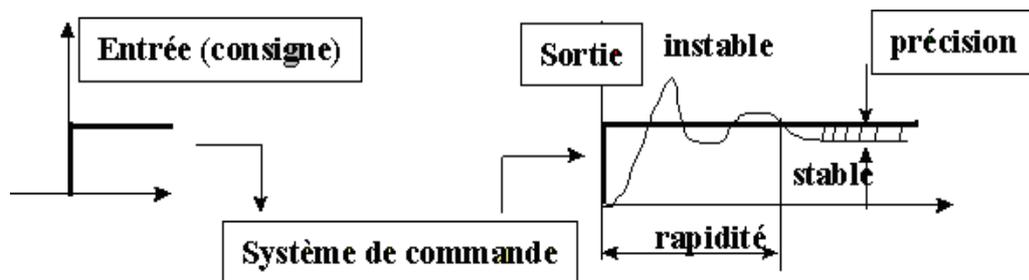
Le nombre d'intégrateurs placés dans la boucle ouverte du système caractérise l'ordre du système. Les erreurs permanentes en fonction de l'ordre du système sont données par le tableau suivant :

**Tableau 5 : Tableau des erreurs permanentes**

Classe du système	0	1	2	$\alpha > 2$
Erreur de position	$1/(1+K)$	0	0	0
Erreur de vitesse	$\infty$	$1/K$	0	0
Erreur d'accélération	$\infty$	$\infty$	$1/K$	0

### I.3.3 La rapidité

La rapidité d'un système de régulation automatique peut être évaluée sur la base de sa réponse indicielle en boucle fermée. La durée de réglage  $T_{reg}$  est la durée mesurée entre l'instant d'application du saut de consigne  $c(t)$  et l'instant où la grandeur réglée  $y(t)$  ne s'écarte plus d'une bande de tolérance de  $\pm 5\%$  tracée autour de sa valeur finale  $y_{\infty}$ . Le temps de montée  $T_m$  est la durée que met le signal  $y(t)$  pour passer de 10 à 90% de sa valeur finale  $y_{\infty}$ .



**Figure I.5 : Représentation des performances d'un système de régulation automatique**

# Chapitre II : Les différentes méthodes de régulation industrielle

## II.1 Introduction

Les techniques de régulation que nous allons voir peuvent être regroupées en deux catégories :

- Les techniques mettant en œuvre l'association des boucles de régulation.

Il est possible d'associer des chaînes de régulation dans le but d'améliorer la performance des boucles ou d'asservir des grandeurs réglées les unes aux autres. Les techniques les plus utilisées dans ce cas sont notamment la régulation en cascade et la régulation de proportion.

- Les techniques utilisant les procédés et les algorithmes modernes de commande.

Les nouvelles possibilités apportées par les systèmes numériques de commande permettent de mettre en œuvre des procédés et des algorithmes modernes en vue de la commande performante des processus à grand retard pur, la régulation des processus multi-variables,... On verra dans ce cas la régulation par retour d'état et la régulation par logique floue.

## II.2 La régulation à posteriori ou en boucle fermée simple [2]

### II.2.1 Principe

Dans ce type de régulation, l'action correctrice s'effectue après que les effets des grandeurs perturbatrices aient produit un écart entre la mesure et la consigne. Cet écart peut également être provoqué par un changement de consigne. Dans les deux cas, le rôle de la boucle fermée est d'annuler l'écart.

### II.2.2 Rôle des actions PID dans la boucle fermée

#### a) Action proportionnelle

##### Loi de commande et fonction de transfert

Le régulateur à action proportionnelle ou régulateur P, a une action simple et naturelle puisqu'il construit une commande  $u(t)$  proportionnelle à l'erreur  $\varepsilon(t)$ .

Les relations suivantes nous donnent respectivement la loi de commande et la fonction de transfert de l'action proportionnelle.

$$u_r(t) = G_r \varepsilon \quad \text{Soit} \quad C(p) = G_r$$

##### Rôle, avantage et inconvénient du régulateur P

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour but de réduire l'écart entre la mesure et la consigne. Cette action agit donc sur la rapidité du système. Cependant en augmentant trop la valeur de  $G_r$ , on risque de déstabiliser le système (phénomène de pompage). De plus le régulateur P n'annule pas l'erreur statique.

#### b) Action intégrale

##### Loi de commande et fonction de transfert

L'action intégrale assure un rattrapage progressif de la consigne jusqu'à ce que l'erreur statique soit nulle. Cette commande est obtenue par la relation suivante :

$$u_r(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(x) dx \quad \text{Soit} \quad C(p) = \frac{1}{T_i} p$$

## Rôle, avantage et inconvénient du régulateur I

L'action intégrale permet d'augmenter la précision statique (annulation de l'erreur statique) du système à réglé. Elle est caractérisée par sa constante d'intégration  $T_i$ .

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, un dosage trop important de l'action intégrale engendre une instabilité de la boucle de régulation. Pour son réglage, il faut trouver un compromis entre la stabilité et la rapidité, de plus il faut éviter l'emballement du terme intégral en appliquant une méthode d'anti-saturation. Cette commande est souvent associée à une action proportionnelle (régulateur PI).

## c) Action dérivée

### Loi de commande et fonction de transfert

Cette action tient compte des variations de la grandeur de sortie. Elle délivre une sortie variant proportionnellement à la dérivée de l'écart  $\varepsilon$  :

$$u_r(t) = \frac{T_d ds(t)}{dt}$$

Où  $T_d$  est le dosage de l'action dérivée.

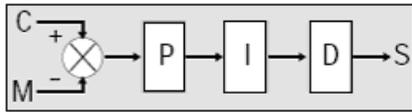
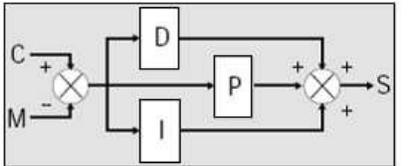
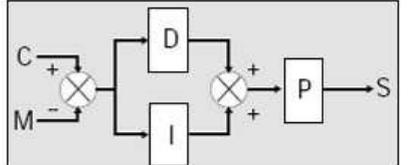
### Rôle, avantage et inconvénient de l'action dérivée

L'action dérivée va ainsi intervenir uniquement sur la variation de l'erreur ce qui augmente la rapidité du système (diminution des temps de réponse). En pratique, il est souhaitable de limiter l'action dérivée afin de ne pas amplifier les bruits haute fréquence et de limiter l'amplitude des impulsions dues aux discontinuités de l'écart.

### II.2.3 Le régulateur PID

L'action conjuguée PID permet une régulation optimale en associant les avantages de chaque action : la composante P réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la composante D s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation et la composante I élimine l'erreur statique. Ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel. Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D. En effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte. Le tableau suivant donne les différentes structures du régulateur PID.

**Tableau 6 : Différentes structures du régulateur PID**

Structure du régulateur PID	Schéma et fonction de transfert
Série	 $C(p) = G_r \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) \left( 1 + \frac{1}{T_d p} \right)$
Parallèle	 $C(p) = G_r + \frac{1}{T_i p} + T_d p$
Mixte	 $C(p) = G_r \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$



La régulation comporte deux régulateurs :

- le régulateur primaire agissant sur l'ensemble (régulateur 1)
- le régulateur secondaire agissant sur la boucle interne (régulateur 2)

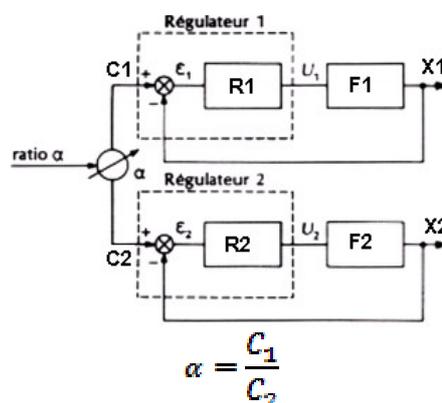
Pour que la perturbation n'ait pas d'influence sur  $X'$ , il faut que :

- Le correcteur R2 comporte un intégrateur
- Que les pôles de  $\frac{1}{G_2 F_2 R+1}$  soit faible devant ceux de F2.

Il faut cependant noter que ce montage n'est toutefois possible que si le processus est lui-même décomposable en deux éléments  $F_1, F_2$  placés naturellement en cascade.

## II.4 La régulation de proportion [3]

Cette solution consiste à rendre proportionnelles, par un organe approprié (opérateur de ratio), les valeurs de consigne de deux régulateurs insérés dans deux boucles indépendantes. Ce montage est couramment utilisé dans les opérations de mélange de fluides ou de gaz. C'est le cas, en particulier, de la commande des brûleurs (fours, chaudières, etc.), dans lesquels les débits respectifs d'air et de combustibles doivent être proportionnels. La figure II.2 nous donne le schéma fonctionnel d'une régulation de proportion.



Où :  $\alpha$  est le coefficient de proportion.

Figure II.2: Schéma fonctionnel d'une régulation de proportion

## II.5 La régulation par logique floue [4]

### II.5.1 Historique

Les prémisses de la logique floue ont été introduites en 1965. L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier aux limites dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Les éléments de bases de cette logique sont :

- Les variables linguistiques
- Leurs définitions par des fonctions d'appartenance
- La déduction floue ou inférence
- Les opérateurs de la logique floue

### II.5.2 Notion de commande floue

La description d'un phénomène, d'une situation ou d'un procédé contient en générale des expressions floues comme : quelques, beaucoup, souvent, ... . Ces expressions forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue.

Par exemple, les termes « jeune », « âgé », « entre deux âges » formant des ensembles flous, peuvent être considérés comme les valeurs d'une variable linguistique « âge ».

#### a) Description d'un procédé

La commande d'un processus industriel par la logique floue se repose essentiellement sur la description que l'on fait d'un procédé. En vue d'un traitement par série d'instructions, cette description sera mise sous la forme :

**SI** *condition1* **ALORS** *operation1*, **OU**

**SI** *condition2* **ALORS** *operation2*, **ET**

**SI** *condition n* **ALORS** *operation n*

La formulation de la description nécessitera beaucoup d'expériences de la part de l'opérateur.

## b) Fonction d'appartenance

On attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenance, dont la valeur varie entre 1 et 0, en tenant compte de la classification en un certain nombre d'ensemble flou. C'est la fuzzification.

### Notation

Une fonction d'appartenance est notée :

$\mu_E(x)$  où:  $x$  est la variable linguistique et  $E$  l'ensemble flou concerné

Mais on peut omettre soit l'argument, soit l'indice, ou les deux s'il n'y a pas de confusion.

Une valeur précise de la fonction d'appartenance, liée a une valeur déterminée de la variable  $x$  est dite **facteur d'appartenance**.

La notion de fonction d'appartenance permet de donner un coefficient de confiance a l'affirmation «  $x$  appartient à l'ensemble  $A$  ». Par exemple, les fonctions d'appartenance représentant la variable linguistique « âge » peut être représenté par la figure ci-dessous.

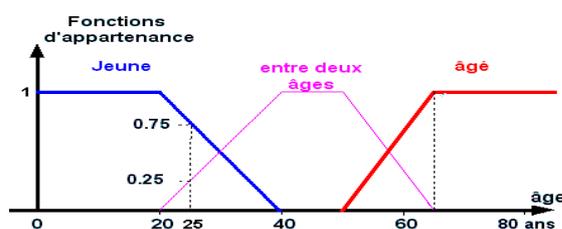


Figure II.3: Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

Ainsi, une personne de 25ans, aura un facteur d'appartenance  $\mu=0.75$  à l'ensemble « jeune » et  $\mu=0.25$  à l'ensemble « entre deux âges »

### Formes des fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance peut avoir divers formes, mais on peut considérer qu'un fait incertain, tel que  $x$  à peu près égal à  $x_0$ , aura une fonction d'appartenance en forme de triangle. L'affirmation de «  $x$  à peu près compris entre  $x_1$  et  $x_2$  » correspond à une fonction trapézoïdale.

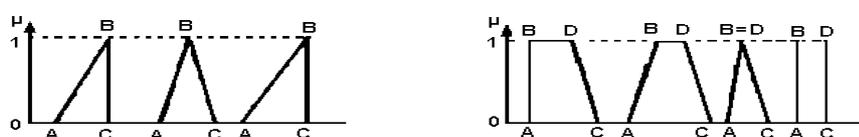


Figure II.4: Fonction d'appartenance de formes triangulaire et trapézoïdale

### c) Les opérateurs de la logique floue

Pour réaliser la déduction floue ou inférence, les variables linguistiques sont reliés entre elles par des opérateurs qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques.

#### Opérateur NON (complément, négation, inverse)

C'est l'ensemble complémentaire de la théorie des ensembles.

$$C = \bar{A} = \text{NON}(A)$$

On peut l'exprimer par les fonctions d'appartenance de la manière suivante :

$$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x)$$

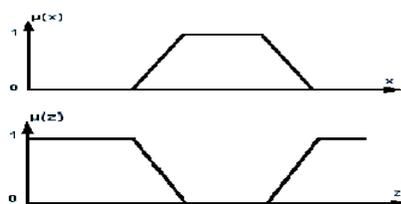


Figure II.5: Opérateur NON

#### Opérateur OU (maximum)

C'est la réunion de deux ensembles.

$$C = A \cup B = A \text{ OU } B$$

La réalisation de l'opérateur « OU » au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(y)$  des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum.

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ OU } B}(z) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

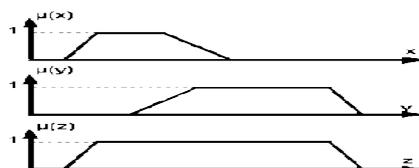


Figure II.6 : Opérateur OU

Il faut remarquer qu'il est possible que la fonction d'appartenance résultante  $\mu_C(z)$  atteigne deux fois la valeur 1. L'opérateur maximum est commutatif et associatif.

### Operateur ET (minimum)

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles A et B, et on écrit :

$$C = A \cap B = A \text{ ET } B$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(y)$  des deux ensembles A et B.

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ ET } B}(z) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

L'opérateur minimum est commutatif et associatif.

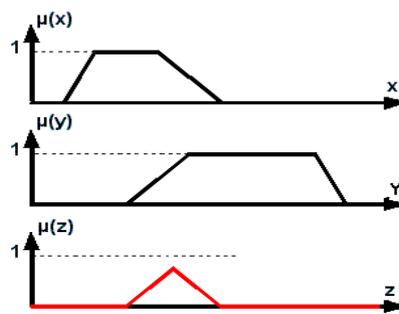


Figure II.7: Operateur ET

Il est possible que la fonction d'appartenance résultante n'atteigne pas la valeur 1. Ces operateurs sont les plus utilisés pour le réglage par la logique floue, cependant, on peut utiliser d'autres réalisations de ces operateurs soit pour simplifier le traitement numérique, soit pour mieux tenir compte des opérations floues.

### Autres réalisations des operateurs ET et OU.

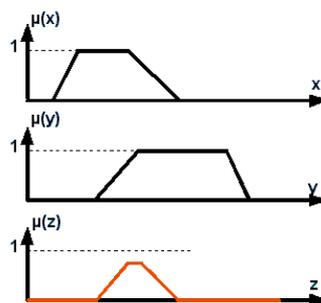
- Operateurs ET et OU, réalisés par opérations arithmétiques

Souvent, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit appliqué aux fonctions d'appartenance, selon la relation :

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ ET } B}(z) = \mu_A(x)\mu_B(y)$$

On a alors l'opérateur produit.

La fonction d'appartenance résultante est toujours inférieure ou égale à 1. Elle reste donc à l'intérieur de l'intervalle  $0 \leq \mu \leq 1$ . L'opérateur produit est utilisé dans le domaine du réglage et de la commande par logique floue comme alternative à l'opérateur minimum.



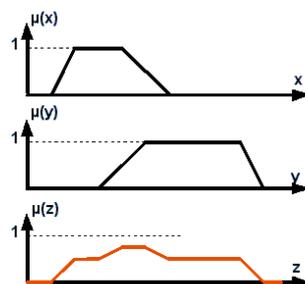
**Figure II.8: Opérateur ET réalisé par la fonction produit**

De la même manière, on réalise l'opérateur OU par la formation de la valeur moyenne de la somme des fonctions d'appartenance, défini par :

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ OU } B}(z) = \frac{[\mu_A(x) + \mu_B(y)]}{2}$$

On parle alors de l'opérateur somme.

La somme est divisée par 2. En effet, il est fort possible que la somme  $[\mu_A(x) + \mu_B(y)]$  dépasse le domaine admissible  $[0,1]$ . Afin que cette somme reste dans le domaine défini, on peut l'écarter ou la normaliser. Dans ce cas, il est possible d'étendre la règle de calcul ci-dessus à plusieurs termes. Il faut alors diviser la somme par le nombre de termes, afin d'obtenir une normalisation simple.



**Figure II.9: Opérateur OU réalisé par la fonction de la somme**

- Opérateurs ET flou et OU flou

Les opérateurs Et flou et OU flou sont des opérateurs combinés entre l'opérateur minimum et la moyenne arithmétique.

Les opérateurs ET flou et OU flou sont respectivement définis par :

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ ET } B}(z) = \gamma \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] + \frac{1-\gamma}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

$$\mu_C(z) = \mu_{A \text{ OU } B}(z) = \gamma \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] + \frac{1-\gamma}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

Avec le facteur  $\gamma \in [0,1]$ , il est possible de pondérer l'influence des deux termes.

Pour  $\gamma = 1$ , on aboutit respectivement à l'opérateur minimal ou maximal. Par contre, pour  $\gamma = 0$ , on obtient pour les deux opérateurs la moyenne arithmétique correspondant à l'opérateur somme. Dans ce cas, le ET flou et le OU flou se confondent. On peut étendre les deux opérateurs ET flou et le OU flou à trois ou à plusieurs termes. La somme qui apparaît entre crochets doit alors être divisée par le nombre de termes de la somme.

#### d) Dédution floue ou inférence

En générale, plusieurs valeurs de variables linguistiques, convenablement définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles. Dans ce contexte, on peut distinguer deux genres de règles d'inférence :

- Inférence avec une seule règle
- Inférence avec plusieurs règles

Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU.

L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

## Inférence avec une seule règle

Le cas d'une inférence avec une seule règle se présente lorsqu'il faut comparer plusieurs concurrents (objets ou personnes) dans une certaine situation et en choisir l'optimum. Les variables qui déterminent la situation sont des variables floues. On trouve cette problématique essentiellement dans les domaines non techniques, où il faut prendre une décision, comme par exemple l'achat d'un appareil, le recrutement d'un employeur, etc.

Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sont les variables linguistiques pour évaluer une certaine situation, le critère  $y$  pour la prise de décision peut être formulé par une règle, comme par exemple

$$y = [x_1 \text{ OU } (x_2 \text{ ET } x_3) \text{ OU } \dots] \text{ ET } x_n$$

La forme exacte de cette règle dépend évidemment du problème en question. Elle est subjective et possède souvent un certain caractère arbitraire.

A chaque variable floue  $x_i$  correspond une fonction d'appartenance  $\mu_{x_i}$ . On peut alors déterminer le facteur d'appartenance  $\mu_y$  pour le critère d'évaluation  $y$  et en choisir le plus élevé.

## Inférence à plusieurs règles

Le cas d'une inférence avec plusieurs règles se présente essentiellement pour des problèmes de réglage et de commande par logique floue, dans lesquelles, une ou plusieurs variables linguistiques nécessitent une prise de décision suivant les valeurs qu'atteignent ces variables. Les règles peuvent alors être exprimées sous la forme générale:

**Opération := SI condition 1, alors opération 1, OU**  
**SI condition 2, alors opération 2, OU**  
**SI condition 3, alors opération 3, OU**  
**SI condition m, alors opération m,**

On retrouve ici le formalisme de description d'un procédé. Les conditions peuvent dépendre d'une ou plusieurs variables. A chaque variable sont attribuées des fonctions d'appartenance, tenant compte des ensembles flous formés par ces variables.

Selon la réalisation des opérateurs utilisés pour relier les différentes règles, on peut distinguer les méthodes d'inférence suivante :

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

Les inférences avec plusieurs règles sont caractérisées par le fait qu'en générale plusieurs règles sont plus ou moins simultanément vérifiées. Ici encore, il faut remarquer que la formulation exacte des inférences dépend du comportement statique et dynamique du système à régler et de l'organe de commande ainsi que des buts du réglage.

### II.5.3 Conception d'un régulateur par logique floue

Par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques.

Un régulateur par logique floue est constitué de trois parties :

- Fuzzification
- Inférence
- Défuzzification

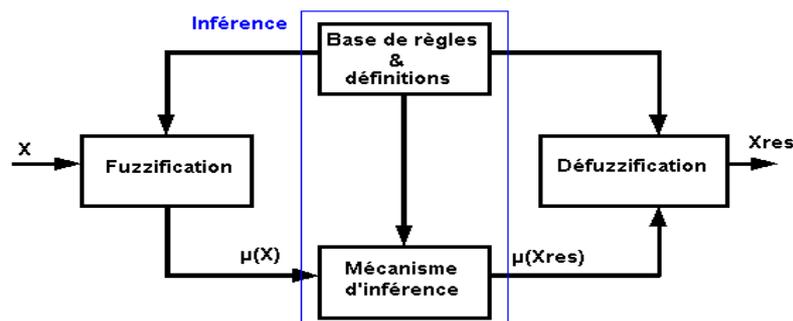


Figure II.10: Structure interne d'un régulateur par logique floue

#### a) Fuzzification

La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les variables du système (variables d'entrée et variables de sortie). On réalise ainsi, le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui peuvent alors être traitées par des inférences.

Les opérateurs utilisés dans la commande floue agissent sur des sous-ensembles flous. Par conséquent, il est nécessaire de transformer les variables non floues provenant du monde extérieur en des sous-ensembles flous. Il existe plusieurs façons pour réaliser la fuzzification.

### Fuzzification pour une grandeur exacte

Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde à la mesure effectuée. Ainsi si la mesure  $x_0$  est exacte, le sous ensemble floue  $X_0$  doit être représentée par un fait précis. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous-ensemble flou  $X_0$  est alors définie par:

$$\mu_{x_0}: U \rightarrow U$$

$$\mu_{x_0}(x) = 1 \text{ si } x = x_0$$

$$\mu_{x_0}(x) = 0 \text{ si } x \neq x_0$$

La figure II.11 illustre ce propos.

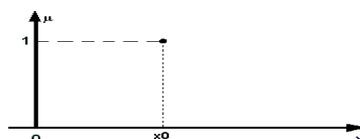


Figure II.11: Fuzzification d'une mesure exacte

### Fuzzification pour une mesure incertaine

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, le sous ensemble flou  $X_0$  doit être représenté par un fait imprécis. On utilise alors une méthode de fuzzification qui associe à la variable mesurée  $x_0$  une fonction d'appartenance.

Cela peut s'exprimer par :

$$\mu_{x_0}(x) = \max \left\{ 0 ; 1 - \frac{|x - x_0|}{\varepsilon} \right\}$$

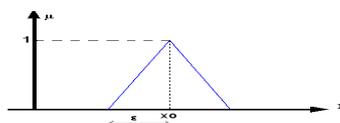


Figure II.12: Fuzzification pour une mesure incertaine

## b) Bases de règles et inférences

Comme on a vu dans le paragraphe précédent, on utilise des inférences avec plusieurs règles pour le réglage par logique floue. La description des règles d'inférences est alors une étape très importante. Il existe plusieurs manières d'exprimer les inférences, mais les plus pratiques sont la description par matrice d'inférences et la description par tableau d'inférences.

### Description par matrice d'inférences

A l'intersection d'une ligne et d'une colonne se trouve l'ensemble correspondant de la variable de sortie. Les variables d'entrées sont liées par l'opérateur ET, tandis que les variables de sortie des diverses règles sont à combiner par l'opérateur OU, afin d'obtenir la variable de sortie de l'inférence.

Si toutes les positions de la matrice d'inférence sont remplies, on parle de règle d'inférence complète, si non, on parle de règle d'inférence incomplète.

Cependant, ce genre de description devient complexe lorsqu'il y a plus de trois ou quatre variables et si ces derniers sont subdivisés en un nombre élevé d'ensemble.

### Description par tableau d'inférences

Cette description se prête bien à un nombre élevé de variables et surtout à des systèmes avec plusieurs variables de sortie. Pour chaque règle, il y a une ligne indiquant les ensembles des variables d'entrée qui sont liées par l'opérateur ET et montre l'ensemble correspondant pour chaque variable de sortie. Les opérations multivariées des inférences s'obtiennent par combinaison avec l'opérateur OU sur chaque variable de sortie.

## c) Défuzzification

La défuzzification consiste en la transformation de l'information floue fournie par les inférences en une information déterminée pour la commande. Cela veut dire qu'il faut extraire une valeur réelle  $y_0$  à partir de la fonction d'appartenance  $\mu(y)$  du sous-ensemble de sortie.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification mais les plus utilisées sont :

- La défuzzification par centre de gravité
- La défuzzification par valeur maximale

## Défuzzification par centre de gravité

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x)$ . Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse  $x^*$ .

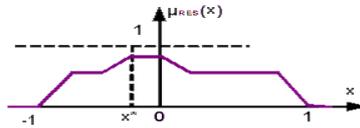


Figure II.13: Défuzzification par centre de gravité

## Défuzzification par valeur maximale

La défuzzification par centre de gravité exige en général un temps de calcul assez important. De ce fait, il est utile de disposer d'une méthode de défuzzification plus simple. Comme signal de sortie  $x^*$ , on choisit l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x)$ . Lorsque  $\mu_{RES}(x)$  est écrêté, toute valeur entre  $x_1$  et  $x_2$  peut être utilisée. Afin d'éviter cette indétermination, on prend la moyenne des abscisses du maximum.

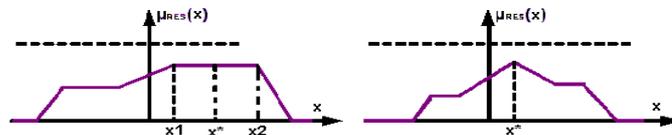


Figure II.14: Défuzzification par valeur maximale

## Chapitre III : ETUDE THEORIQUE DE LA SERRE

Compte tenu du réchauffement climatique planétaire, la protection de l'environnement devient une tâche primordiale pour tous les pays du monde entier. Ainsi, la sauvegarde de la flore sauvage, des espèces endémiques à Madagascar devrait constituer une priorité. Ceci peut se faire par l'utilisation des serres. Mais encore, étant donné que nous sommes un pays sous développé, la culture sous serre, constitue aussi pour nous, une alternative vers la longue marche vers l'autosuffisance alimentaire.

### III.1 Description de la serre

Une serre est une construction en verre ou en plastique dans laquelle on fait pousser des plantes fragiles ou ne supportant pas les conditions climatiques rigoureuses. Les serres sont conçues pour recréer un environnement dans lequel la température, l'humidité et la lumière sont contrôlées et modifiées pour optimiser les conditions de culture de plantes aussi diverses que les orchidées, les cactus, les tomates ou les citrons.

Il existe plusieurs formes de serre mais on a opté pour une serre en chapelle. Dans ce qui suit, on a fixé les dimensions suivantes :

- Largeur : 4m
- Longueur : 8m
- Hauteur : 3m

Comme une serre doit permettre une bonne insolation, on a opté pour une couverture en polyéthylène transparent de 3/10[mm] d'épaisseur.

#### III.1.1 Les dispositifs de régulation

##### a) Stockage de la chaleur

Pour une utilisation optimale, et compte tenu de l'écart de température de l'air à l'intérieur du système et le besoin climatique de la culture, on stocke l'énergie excédentaire pendant le jour. Pour notre cas, on a choisi d'utiliser un lit de galets disposé sous la culture pour le stockage de la chaleur. Sachant que 1kg de galets stocke 0.2 kcal de chaleur par degré d'élévation de sa température.

Ainsi, on peut par exemple utiliser du granite pour le lit de galet (Coefficient de diffusivité thermique  $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ ). Cependant ce système de stockage de chaleur ne suffit pas à chauffer le local en hivers. Ainsi, on doit disposer d'un système de chauffage.

## b) Système de chauffage

### Energie d'appoint :

Pour chauffer un tel système, il faut un apport d'énergie. La détermination de la quantité de chaleur nécessaire doit tenir compte des pertes thermiques. Si les pertes thermiques imputables en rayonnement, à la convection et à la conduction sont définies par :

$$Q_1 = k \cdot S \cdot (T_i - T_{\text{ext}}) \text{ avec :}$$

Q : quantité de chaleur

K : coefficient variable selon la nature de la surface considérée

$$K = 0.80 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \text{ pour le sol}$$

$$K = 1.75 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \text{ pour la couverture}$$

$T_i$  : température du local

$T_{\text{ext}}$  : température extérieure

Et que la quantité de chaleur à fournir est :

$$Q_2 = q \cdot V \cdot (T_i - T_{\text{ext}}) \text{ avec :}$$

V : volume du local [ $\text{m}^3$ ]

q : quantité de chaleur par unité de volume [ $\text{kcal}/\text{h} \cdot \text{m}^3$ ]

La quantité de chaleur globale à apporter est donc  $Q = Q_1 + Q_2$ .

Si, on utilise l'énergie électrique pour l'énergie d'appoint, la valeur de la résistance sera

de :  $R = \frac{U^2}{P}$

- R : résistance électrique [ $\Omega$ ]
- U : tension d'alimentation [V]
- P : puissance utile pour le chauffage  $P = 1.163Q$

## Chauffage

Dans les serres modernes cependant, on utilise des systèmes de chauffage par air pulsé utilisant des échangeurs de chaleurs. Ces derniers sont le plus souvent réalisés par des circuits d'eau chaude placés dans une gaine. Ce circuit peut être placé sous la culture ou bien au voisinage du toit de la serre pour les serres à couverture végétale dense. Voici, le schéma d'un tel système.

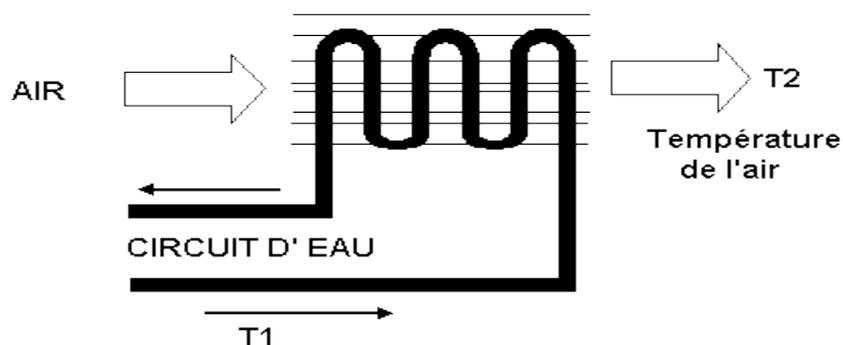


Figure III.1: Système de chauffage par air pulsé

L'appoint par énergie électrique est nécessaire pour annuler les effets des perturbations dues à la ventilation aux pertes thermiques non mesurables. Le système de chauffage va alors intervenir pour ajuster la température de la serre à la consigne voulue.

### c) Ventilation

On doit concevoir alors deux ouvrants, l'un pour l'entrée d'air et l'autre pour la sortie. On détecte la température du mélange d'air et commande l'ouverture et la fermeture des ouvrants. Pour le système de ventilation, on peut utiliser un ventilateur. Mais ce système ne permet pas de faire baisser la température de la serre en dessous de la température extérieure. Cela permet aussi en outre de faire une régulation naturelle du taux de CO<sub>2</sub> dans la serre.

#### d) Humidificateur

Le principe de fonctionnement consiste à aspirer l'air extérieur à travers un panneau constamment humidifié. L'évaporation de l'eau permet à la fois de charger l'air en humidité et de baisser sa température. De plus, l'arrosage périodique des plantes permet de maintenir la serre à une humidité assez stable.

#### e) Eclairage

Pour le système d'éclairage on peut utiliser un système de projecteur ayant assez de puissance selon les besoins des plantes. Ceci étant utile pour la photosynthèse.

#### f) Appareils de mesure

Le contrôle climatique d'une serre nécessite l'utilisation d'appareils de mesure complexe souvent piloté par ordinateur. Comme dans toute chaîne de mesure, il est nécessaire d'avoir des capteurs performants pour l'acquisition des données de la serre. A titre indicatif, on peut par exemple utiliser le **HM35AC** pour la mesure de la température et de l'humidité avec un taux d'erreur inférieur à 1%.

Selon le niveau de précision requis pour la régulation climatique, ces appareils peuvent aller d'une simple mesure de la température et de l'humidité jusqu'à la mise en place d'une centrale de commande utilisant des logiciels spécialisés (SERRISTE, HORTICERN, ...) et de puissants calculateurs. Il faut noter qu'une bonne qualité de régulation du climat de la serre est une condition sine qua non à l'obtention d'une récolte de qualité.

### III.2 Modélisation du système de chauffage de la serre

Dans la suite, on va effectuer la régulation de la température de la serre en régulant la température de l'air à la sortie du système de chauffage. Pour cela, on a identifié le système avec la méthode de Broïda. L'entrée du système est la température de l'eau chaude circulant dans les serpentins, la sortie est la température de l'air de la serre. Les données utilisées pour l'identification sont en annexe I.

Avec la méthode de Broïda, le système est identifié comme ayant une fonction de

transfert de la forme :

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K e^{-T_R p}}{1 + \tau p}$$

Pour déterminer la constante de temps  $\tau$  et le retard  $T_R$ , on mesure  $t_1$  à  $(0,28.\Delta y)$  et  $t_2$  à

$(0,4.\Delta y)$  alors  $\tau = 5,5(t_2 - t_1)$  et  $T_R = 2,8.t_1 - 1,8t_2$

D'après l'identification, on a :

$$\tau = 5,5(9,85 - 9,5) ; \rightarrow \tau = 1,925 \approx 2$$

$$T_R = 2,8(9,5) - 1,8(9,85) ; \rightarrow T_R = 26,6 - 17,73$$

$$T_R = 8,87 \approx 9$$

$$\Delta e = 2,5$$

$$\Delta y = 3 \quad \text{d'où } k = \frac{2,5}{3} = 0,8$$

$$\frac{Y(P)}{X(P)} = 0,8 \frac{e^{-9P}}{1 + 2P}$$

# Chapitre IV : ETUDE ET SIMULATION DU SYSTEME

## IV.1 Etude par logique floue

Pour le réglage de la température, on a choisi la consigne de 25°C.

### IV.1.1 Définition des variables linguistiques pour le contrôle de la température

On a considéré les grandeurs suivantes pour les variables de commande :

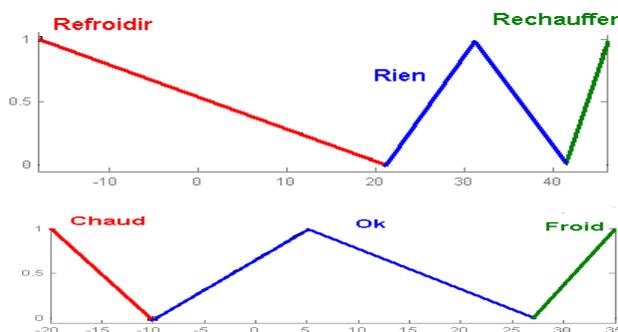
- L'erreur  $\varepsilon$  qui représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.
- La sortie commande qui représente la température de l'eau chaude circulant dans le serpentin.

La fuzzification des variables de commande pour le réglage de la température donne les variables linguistiques suivantes :

- $T(\varepsilon) = (\text{chaud}, \text{ok}, \text{froid})$
- $T(\text{commande}) = (\text{refroidir}, \text{rien}, \text{rechauffer})$

### IV.1.2 Définition des fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance pour les variables de commande de la température sont représentées ci-dessous.



**Figure IV.1: Fonctions d'appartenance des variables de commande**

Les allures de ces fonctions d'appartenance sont obtenues en observant le comportement de la serre.

### IV.1.3 Définition de la base de règles

Les règles d'inférence pour le réglage peuvent s'exprimer par :

- SI erreur est Chaud ALORS commande est Refroidir OU
- SI erreur est ok ALORS commande est Rien OU
- SI erreur est Froid ALORS commande est Réchauffer

## IV.2 Simulation par logique floue

Pour la simulation, on a utilisé le système identifié par la fonction de transfert suivante :

$$F(p) = \frac{0.8e^{-2p}}{1 + 2p}$$

Le schéma bloc du système bouclé, est donné à la figure IV.2

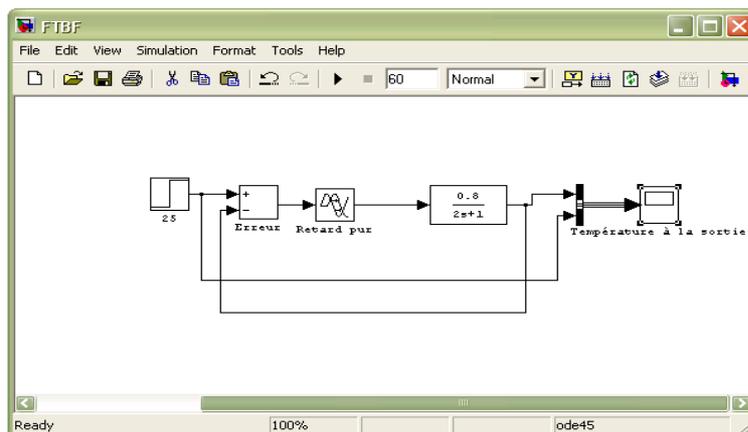


Figure IV.2 Schéma bloc du système bouclé

La figure IV.3 donne la réponse à un échelon de consigne de 25°C du système non corrigé.

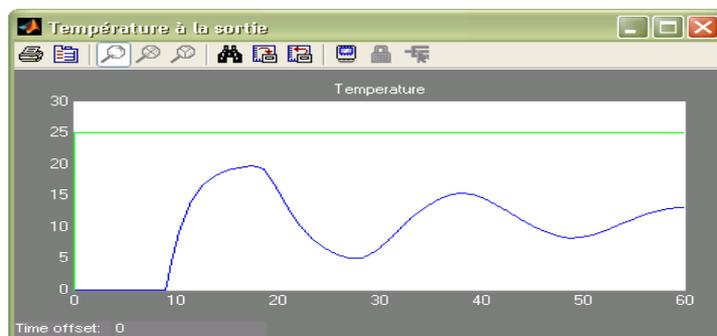
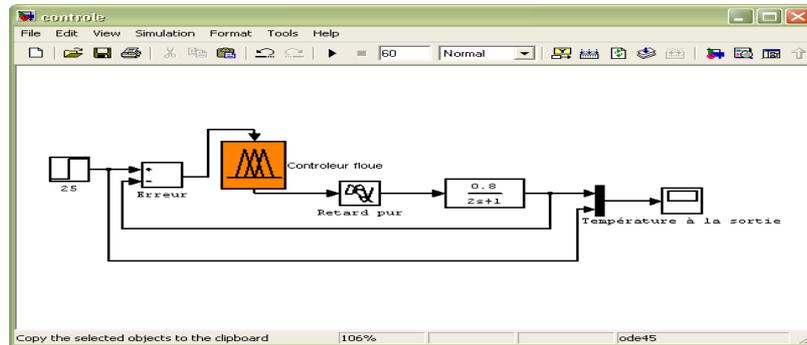


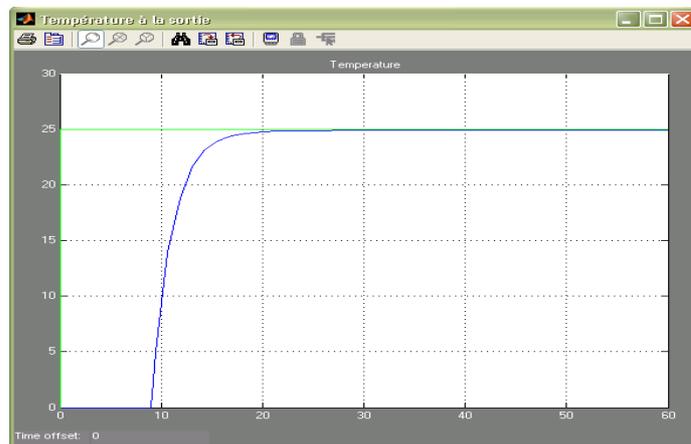
Figure IV.3: Réponse à un échelon du système non corrigé

Compte tenu du retard, le système bouclé n'est pas stable. Introduisons maintenant le contrôleur flou, et observons la réponse du système.



**Figure IV.4: Schéma bloc du système avec le contrôleur flou**

La figure IV.5 donne la réponse du système corrigé à un échelon de consigne de 25°C.



**Figure IV.5: Réponse à un échelon du système corrigé**

#### a) Interprétation du résultat

La présence du retard provoque une non-linéarité du système. Cependant, comme le contrôleur flou a un caractère non linéaire, son utilisation est alors justifiée pour palier au comportement non linéaire du système.

#### b) Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

La régulation par logique floue présente des avantages non négligeables du fait qu'il n'est pas utile d'avoir un modèle mathématique précis du système pour le régler.

En effet, il suffit de comprendre le fonctionnement et d'observer le comportement du système pour établir les règles d'inférence et les fonctions d'appartenance.

Cette méthode de réglage permet en outre de faire un réglage des systèmes non linéaires, en utilisant une identification floue du système. La régulation par logique floue aussi permet de réguler des systèmes MIMO.

Cependant, le manque de méthode rationnelle sur l'établissement du régulateur floue reste une des grandes faiblesses de cette méthode de régulation. De plus, la mise en œuvre du régulateur doit se faire sur le système réel si on n'a pas de modèle du système.

### c) Comparaison des résultats

Avec les deux modes de correction, on arrive à des résultats satisfaisants. Cependant, le temps de réponse est plus long avec le contrôleur flou, ceci peut être amélioré en considérant une autre entrée pour le correcteur. Par exemple, on peut considérer la variation de l'erreur, ce qui nécessitera d'autres observations. On pourra aussi d'autre part, utiliser une partition plus fine des sous-ensembles flous utilisés, mais cela va augmenter la complexité du régulateur, donc un temps de calcul plus long.

La figure IV.10 ci-dessous montre la réponse du système pour les deux types de corrections.

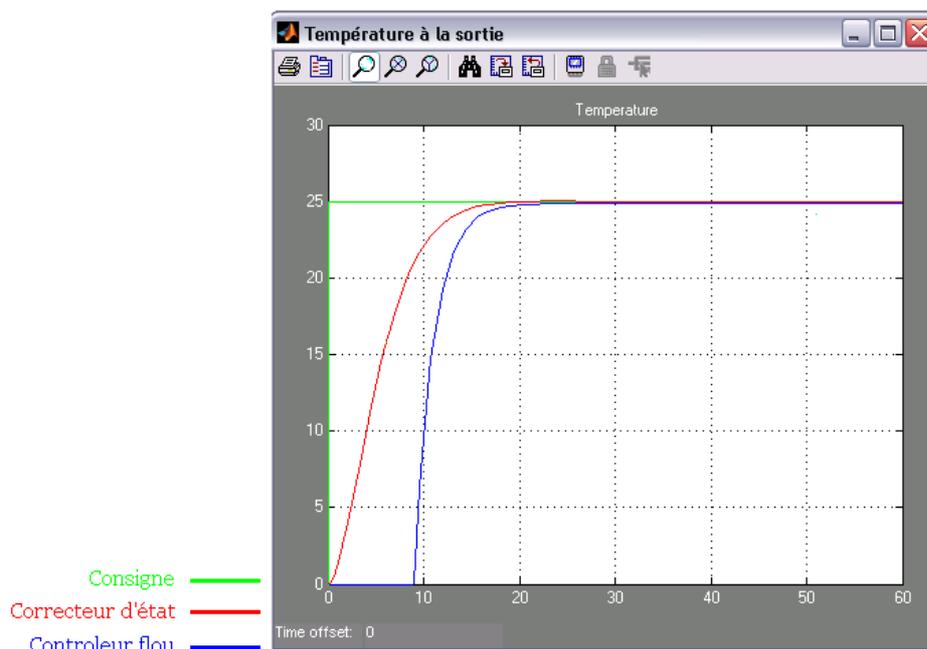


Figure IV.10 : Comparaison des résultats

Ces deux méthodes de régulation ont chacune leurs qualités et leurs défauts. Ainsi, la régulation par logique floue permet de réguler un processus sans avoir un modèle mathématique précis du système.

Cependant, la conception du régulateur flou se repose beaucoup sur la description que l'expert fera du système, ce qui n'est pas toujours facile à implémenter. Mais encore, la démarche à suivre sera plus ou moins aléatoire. Par contre, la régulation par retour d'état nécessite un modèle mathématique précis du système, ce qui conduit à la formulation de nombreuses équations différentielles. Cela pourrait augmenter de façon significative le temps de développement du système à réguler. Tout de même, cette méthode garantit une très bonne régulation. En outre, ces deux méthodes de régulation permettent de réguler des processus multi-variables, non-linéaires, et non stationnaires.

## CONCLUSION

La régulation industrielle offre de nombreuses méthodes pouvant être utilisées en fonction des buts du réglage et du type du système considéré. Cependant, la plus part des systèmes réels sont des systèmes multi-variables, et présentent des non-linéarités qui ne peuvent être négligées. L'utilisation de méthodes permettant de réguler de tels processus est donc incontournable.

La régulation de la température d'une serre peut être faite en utilisant un système de chauffage régulé en s'aidant d'un stockage de chaleur obtenu avec un lit de galets.

Mais il ne faut pas oublier que dans une serre, la température va de paire avec l'humidité et que le taux de  $\text{CO}_2$  dans la serre aussi peut influencer le développement des plantes. Dans ce cas, le système devient un système multi-variable, non-linéaire et fortement perturbé. Les deux méthodes de régulation étudiées dans ce travail pourront ainsi être adoptées pour une régulation du climat de la serre dans le futur.

## Annexe I : Données pour l'identification du système

Tableau A1 : Température de l'air

Heure	T <sub>air</sub> [°K]
6,3	293
6,45	293
7	293
7,15	293
7,3	293
7,45	293
8	293,01
8,15	293,01
8,3	293,02
8,45	293,04
9	293,17
9,15	293,36
9,3	293,59
9,45	293,89
10	294,13
10,15	294,42
10,3	294,72
10,45	295,01
11	295,3
11,15	295,57
11,3	295,63
11,45	295,68
12	295,73
12,15	295,78
12,3	295,82
12,45	295,85
13	295,9
13,15	295,96
13,3	295,98
13,45	295,86
14	295,76

## Annexe II : Méthode d'identification de Broïda

On envoie au système un signal d'entrée  $X(t)$  de type échelon et on enregistre le signal de sortie  $Y(t)$ .

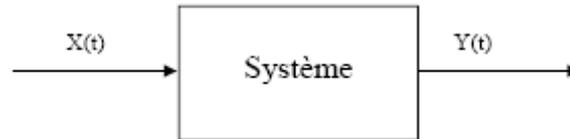


Figure A2.1 : Schéma bloc

La réponse obtenue est modélisée, selon Broïda, par la relation :

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{Ke^{-T_R.p}}{1 + \tau p}$$

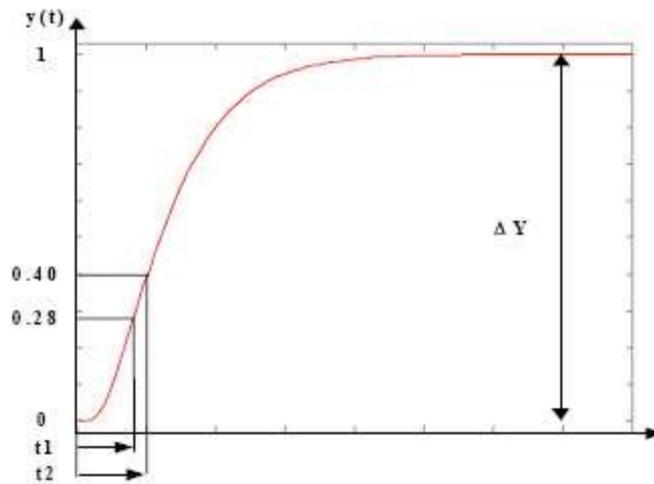


Figure A2.2: Courbe de l'évolution de température

Pour déterminer la constante de temps  $\tau$  et le retard  $T_R$ , on mesure :

$t_1$  à  $(0,28.\Delta y)$  et  $t_2$  à  $(0,4.\Delta y)$  alors  $\tau = 5,5(t_2 - t_1)$  et  $T_R = 2,8.t_1 - 1,8.t_2$

### Annexe III : Présentation de la boîte à outil « Fuzzy logic Toolbox » de MATLAB

La simulation de la serre se fera avec MATLAB-SIMULINK en utilisant la boîte à outils « fuzzy logic toolbox » pour la conception du régulateur flou. Cette boîte à outils permet de définir les variables linguistiques ainsi que les fonctions d'appartenance associées aux variables de commande du système. L'interface « Fis Editor » est obtenue en frappant la commande **fuzzy** dans la fenêtre de commande de MATLAB.

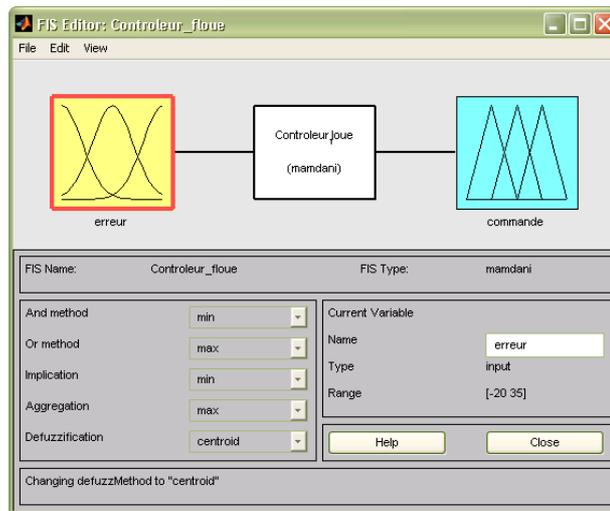
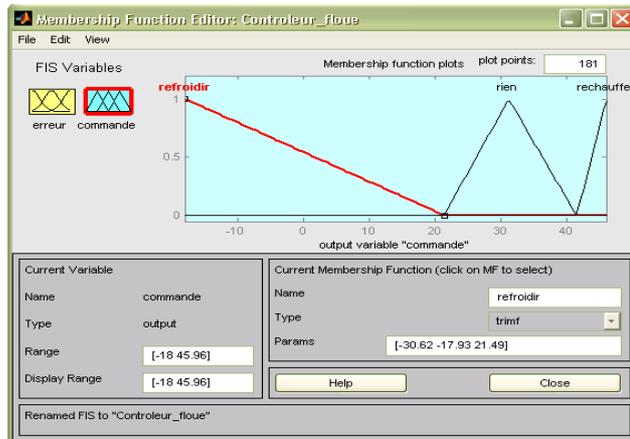


Figure A3.1: Interface du «Fis Editor » de MATLAB

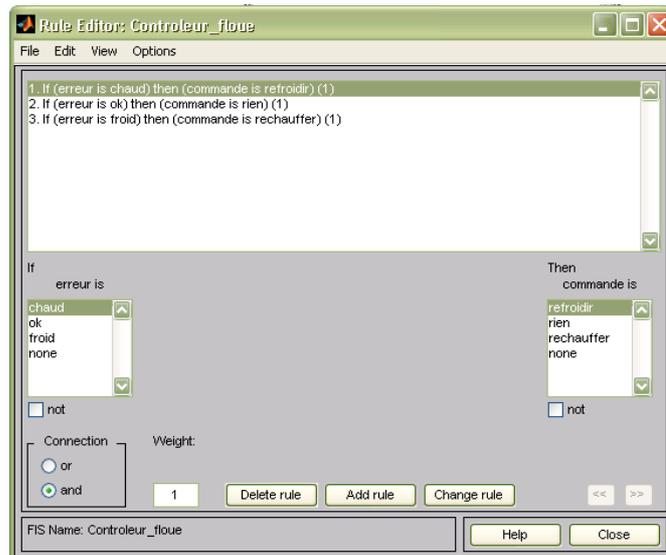
Il faut remarquer que cette interface permet aussi de choisir le mode de réalisation pour les opérateurs ainsi que la méthode de défuzzification. Pour notre cas, on va utiliser la méthode « centroïde » (défuzzification par centre de gravité) pour la défuzzification.

En double cliquant sur l'un des figures sur l'interface, on a l'interface permettant de spécifier les fonctions d'appartenance de la variable sélectionnée. Cette interface est nommée « Membership Function Editor ».



**Figure A3.2: Fenêtre d'édition des fonctions d'appartenance**

Après la définition des fonctions d'appartenance, on peut définir les bases de règles utilisées par le système d'inférence avec l'interface « Rule Editor ».



**Figure A3.3: Interface de définition des bases de règle**

## REFERENCES

- [1] [http://www.iai.heig-vd.ch/cours/regulation\\_automatique.pdf](http://www.iai.heig-vd.ch/cours/regulation_automatique.pdf)
- [2] Cours « Systèmes Asservis Linéaires Continus (SALC) », E420, 4<sup>ème</sup> année  
Electronique, ESPA, année universitaire 2005-2006
- [3] BAHLY « Boucles de régulation » 2<sup>ème</sup> édition 1990
- [4] Hansruedi Bühler « Réglage par logique floue » Presse polytechnique Romande 1994
- [5] Cours « Représentation dans l'espace d'état des systèmes linéaires », E510, 5<sup>ème</sup>  
année, Electronique, ESPA, année universitaire 2006-2007
- [6] [http:// www.iai.heig-vd.ch/cours/poly\\_re.pdf](http://www.iai.heig-vd.ch/cours/poly_re.pdf)

**Auteur :** RAMAHATRA Harilova Razaka

**Titre :** « REGULATION DE LA TEMPERATURE D'UNE SERRE HORTICOLE »

(Réglage par logique floue)

**Nombre de pages :** 40

**Nombre de figures :** 27

**Nombre de tableaux :** 3

---

## RESUME

La régulation industrielle offre de nombreuses méthodes pouvant être utilisées en fonction des buts du réglage et de type du système considéré. Une étude de quelques méthodes de régulation industrielle permettra de cerner l'objet et le principe de ces différentes approches. La régulation par logique floue et la régulation par retour d'état sont ici utilisées pour le réglage de la température du système de chauffage d'une serre horticole. Les étapes de conception d'un contrôleur flou sont abordées. Après la modélisation du système, une simulation avec un contrôleur flou suivi d'une comparaison des résultats avec ceux obtenus avec un correcteur d'état.

**Mots-clés :** régulation industrielle, logique floue, retour d'état, régulation de la température, serre, contrôleur flou, automatique.

---

**Rapporteur :** Monsieur RATSIMBA MAMY Nirina

**Adresse de l'auteur :** RAMAHATRA Harilova Razaka

Lot : III E 9 TER BIS Mahamasina-Sud

Antananarivo 101

Tél : 0202632909

Mobile : 0330263179, 0340016317

E-mail : razakaharilova@gmail.com