



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia**  
**Faculté de technologie**  
**Département de Génie électrique**

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**En vue d'obtention du Diplôme de master en Electronique**

**Option : Automatique**

### **Thème**

**Étude et simulation d'une régulation thermique  
par la logique floue**

**Présentée par :**

**Melle Belhouane Souhila**

**Encadré par :**

**M<sup>me</sup> BELLAHSENE. N**

**Promotion 2013 - 2014**

# Remerciement

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie ma famille qui m'a toujours encouragé et soutenu durant toutes mes études.*

*Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances et remerciements à ma promotrice madame **BELLAHSENE. N**, Maître assistante, Enseignante chercheur pour sa présence, sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'elle trouve ici le témoignage de mon haute considération et de mon profond respect.*

*Mes remerciements s'adressent également, aux membres de jury, qui me font l'honneur d'évaluer mon modeste travail.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants du département de **GENIE ELECTRIQUE** qui ont contribué à ma formation dans les meilleures conditions.*

# Dédicaces

*Je tiens à dédier ce modeste travail à ceux qui me  
sont les plus chers au monde, mes parents l'haja*

*ABDELLAH et l'haja SALIHA*

*A mes chères soeurs NASSIMA, WAHIBA,  
NASSIRA, FADILA, LYNDA, ASSIA,*

*WARDA et YASSMINA*

*Et a mes belles sœurs*

*A mes chères frères DJAMAL, ABDNOUR,  
NADIR et SAMIR*

*Et a mes beaux frères*

*A tous mes neveux et nièces*

*A tous mes oncles et mes tantes maternels et  
paternels et leur famille*

*A toutes mes Amies, et à toute la promotion*

*2013/2014*

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

## **Chapitre I**

### **Généralités sur le régulateur flou**

I.1 Introduction.....	02
I.2 Généralités sur la régulation.....	02
I.2.1 Mode de commande.....	02
I.2.2 La chaîne de traitement de l'information.....	03
I.3 Généralités sur la logique floue.....	03
I.3.1 Historique.....	04
I.3.2 Quelques domaines d'applications.....	04
I.3.3 Variables linguistiques.....	05
I.3.4 Les ensembles flous.....	05
I.3.5 Les fonctions d'appartenance.....	05
I.3.6 Les opérateurs de la logique floue.....	07
I.3.7 Structure d'un système flou.....	09
I.3.7.1 Fuzzification.....	10
I.3.7.2 Base de connaissances.....	10
I.3.7.3 Mécanisme d'inférence de floue.....	11
I.3.7.4 Defuzzification.....	15
I.4 La régulation floue.....	16
I.4.1 Avantages et inconvénients du régulateur par logique floue.....	16
I.4.2 Limites des régulateurs flous.....	17
I.4.3 Régulateur de type MAMDANI.....	17
I.4.4 Synthèse du régulateur.....	17
I.4.5 Réglage de régulateur.....	19

---

Conclusion.....	20
-----------------	----

## **Chapitre II**

### **Application: commande de la température d'eau dans une cuve**

II.1 Introduction.....	21
II.2 Présentation de système régulé.....	21
II.2.1 Schéma de principe.....	21
II.2.2 Thermoplongeur.....	21
II.2.3 Sonde PT 100.....	22
II.2.4 Bloc de puissance « gradipack ».....	22
II.2.5 Micro-ordinateur.....	23
II.2.6 Fonctionnement.....	24
II.3 Représentation synoptique de la régulation de température à réaliser.....	24
II.4 Modélisation du système.....	25
II.4.1 Cuve à chauffer.....	25
II.4.2 Contrôle du thermoplongeur.....	25
II.4.3 Evaluation des pertes thermiques.....	26
II.4.4 Bilan de puissance sur la cuve.....	26
II.5 Modélisation de la cuve.....	27
II.6 Modélisation du gradateur de puissance.....	27
II.7 Système commande, en boucle ouverte et en boucle fermée.....	28
II.7.1 Boucle ouverte.....	28
II.7.2 Boucle Fermée.....	30
II.8 Intérêt d'une régulation .....	31
Conclusion.....	31

---

**Chapitre III**

**Simulation et interprétation des résultats**

III.1 Introduction.....32

III.2 Application de la commande floue sur le système.....32

III.3 Système commande, en boucle fermée avec le régulateur floue.....35

III.4 Vectorisation du contrôleur floue.....35

III.5 Construction du modèle.....35

III.6 La tension de commande Gradipack.....37

III.7 Prise en compte d'une perturbation.....38

Conclusion.....39

Conclusion générale.....40

**Annexes**

annexe (1) .....41

annexe (2).....42

annexe (3).....43

annexe (4).....45

---

**Chapitre I**

<b>Figure (I-1)</b>	Schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information	P 03
<b>Figure (I-2)</b>	Formes des fonctions d'appartenance	P 06
<b>Figure (I-3)</b>	Représentations de la hauteur, le noyau, le support	P 07
<b>Figure (I-4)</b>	Opération * NON *	P 08
<b>Figure (I-5)</b>	L'opérateur *ET*, réalisé par la formulation de minimum	P 08
<b>Figure (I-6)</b>	Opérateur*OU*, réalisé par la formulation de maximum	P 09
<b>Figure (I-7)</b>	(a) : schéma synoptique d'un contrôleur, (b) configuration d'un contrôleur flou	P 09
<b>Figure (I-8)</b>	Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-min	P 12
<b>Figure (I-9)</b>	Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min	P 13
<b>Figure (I-10)</b>	Fonction d'appartenance résultante	P 13
<b>Figure (I-11)</b>	Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-prod	P 14
<b>Figure (I-12)</b>	Définition de OU dans la méthode d'inférence max-prod	P 14
<b>Figure (I-13)</b>	Schéma bloc d'un contrôleur flou	P 18

**Chapitre II**

<b>Figure (II-1)</b>	Commande de la température d'eau dans une cuve	P 21
<b>Figure (II-2)</b>	Thermoplongeur	P 22
<b>Figure (II-3)</b>	Sonde PT100	P 22
<b>Figure (II-4)</b>	Bloc de puissance	P 23
<b>Figure (II-5)</b>	Ensemble de 2 thyristors de bloc de puissance	P 23
<b>Figure (II-6)</b>	Représentation synoptique de la régulation de température	P 24
<b>Figure (II-7)</b>	La modélisation du fonctionnement « GRADIPACK »	P 25
<b>Figure (II-8)</b>	Schéma bloc d'un asservissement de modélisation de la cuve	P 27
<b>Figure (II-9)</b>	Schéma bloc d'un asservissement de puissance	P 28
<b>Figure (II-10)</b>	Le système en boucle ouverte	P 28
<b>Figure (II-11)</b>	évolution de la température en boucle ouverte	P 29
<b>Figure (II-12)</b>	Le système en boucle ferme	P 30
<b>Figure (II-13)</b>	évolution de la température en boucle fermée sous correcteur	P 30

---

**Chapitre III**

<b>Figure (III-1)</b>	Définition de la structure globale (entrée, sortie, type d'opérateurs)	P 33
<b>Figure (III-2.a)</b>	Définition des fonctions d'appartenances pour « e », « de/dt ».	P 33
<b>Figure (III-2.b)</b>	Définition des fonctions d'appartenances pour « c »	P 34
<b>Figure (III-3)</b>	Ecran de saisie des règles	P 34
<b>Figure (III-4)</b>	Schéma bloc d'un asservissement de contrôleur	P 35
<b>Figure (III-5)</b>	Le système commande avec le régulateur flou	P 36
<b>Figure (III-6)</b>	évolution de la température avec le régulateur floue	P 36
<b>Figure (III-7)</b>	Schéma bloc d'un asservissement de perturbation	P 37
<b>Figure (III-8)</b>	évolution de la température avec perturbation	P 38

**Annexe**

<b>Figure (I)</b>	Méthodologie de la synthèse d'une commande floue	P 42
<b>Figure (II)</b>	Réponse à un échelon de consigne	P 43
<b>Figure (III)</b>	Réponse à un échelon de perturbation	P 43
<b>Figure (IV)</b>	Temps de réponse 5% d'un système	P 44
<b>Figure (V)</b>	Le régulateur flou de température avec perturbation	P 45

**Liste de Tableau**

<b>Tableau (III-1)</b>	Règles d'inférences	P 32
<b>Tableau (I)</b>	Passage d'une structure à une autre	P 42

---



## Symboles

symbole	Signification
$U(t)$	Commande
$U_{com}$	Tension de command
$U_{eff}$	Tension efficace
$C$	Capacité calorifique
$P_T$	Puissance fourni par le thermoplongeur
$R_t$	résistance du thermomètre à la température T
$R_0$	résistance du thermomètre à 0°C
$T$	température en °C
$m$	volume
$P$	puissance de chauffe
$P_{th}$	Les pertes thermiques
$\theta$	température de l'eau
$\theta_{ini}$	Température initiale de l'eau
$\theta_{ext}$	Température extérieure à la cuve
$K$	Constante
$D$	Dépassement
$t_m$	Temps de monte
$t_r$	Temps de réponse
$\varepsilon$	La précision

Abréviations

**RLF** : Régulateur à logique floue

# **Introduction générale**

La régulation est au cœur de toutes nos actions : conduire sa voiture, régler température de sa douche, réaliser une recette de cuisine...

La régulation (ou asservissement) consiste à agir de façon à ce qu'une mesure soit égale à une consigne. Si l'on cherche à atteindre une consigne (de position ou de température), on parlera de poursuite ou asservissement, si l'on cherche à éliminer des perturbations pour qu'une valeur reste constante, on parlera de régulation.

Les régulateurs permettent ainsi de lier plus simplement les parties séquentielle et continue du procédé. La régulation fait partie intégrante de la qualité de production, c'est donc un point non négligeable de la chaîne de valeurs d'une installation.

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation des méthodes modernes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi ces méthodes, on cite le réglage par logique floue (RLF) laquelle est caractérisée par sa robustesse et son insensibilité à la variation des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

L'objectif de notre thème est la régulation de la température d'eau dans une cuve par un thermoplongeur, afin d'homogénéiser sa température. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

**Le premier chapitre** sera consacré à la présentation du fondement théorique de la logique floue dont ses principes, la constitution d'un système flou, et quelques domaines d'utilisation.

**Dans, Le second chapitre**, nous allons exposer notre système qui commande la température d'eau dans une cuve par un thermoplongeur. Nous présenterons le fonctionnement global de notre système. Et enfin nous allons aborder la modélisation de notre système.

Dans le **dernier chapitre**, nous exposerons les résultats de notre travail.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale résumant les différentes étapes de notre étude et par la même propose nos perspectives.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le régulateur flou**

---

## **I.1 Introduction**

De nos jours, la régulation floue constitue une branche majeure de la technique de régulation. Les procédures conventionnelles ne sont pas remplacées, mais elles sont essentiellement complétées en fonction du domaine d'application.

Jusqu'à présent, le régulateur flou a obtenu les plus grands succès au niveau des applications industrielles et commerciales des méthodes floues. Les régulateurs flous sont des régulateurs non linéaires, en choisissant les fonctions d'appartenance de manière appropriée et en établissant une base de règles, les non linéarités peuvent être compensées dans le système réglé. Les fonctions d'appartenance sont des modèles mathématiques pour les termes linguistiques.

À l'instar d'un régulateur traditionnel, un régulateur flou convertit des grandeurs d'entrée en grandeurs de sortie qui agissent ensuite sur le processus ou le système réglé. Plusieurs grandeurs d'entrée et de sortie sont reliées les unes aux autres de sorte que des systèmes complexes peuvent être régulés facilement. Les valeurs d'entrée et de sortie sont des valeurs nettes sous forme de signaux.

## **I.2 Généralités sur la régulation**

La régulation consiste à maintenir automatiquement, à une valeur désirée (le point de consigne) une grandeur réglée soumise à des perturbations. Un système de régulation comporte l'appareil de mesure de la grandeur réglée (température d'un local...) et/ou des grandeurs perturbatrices (température extérieure...). En fonction de la valeur mesurée, le régulateur détermine la position de l'organe de réglage (vanne...). La grandeur de réglage (puissance...) est alors ajustée de façon à réduire l'écart entre la grandeur réglée et la consigne. [12]

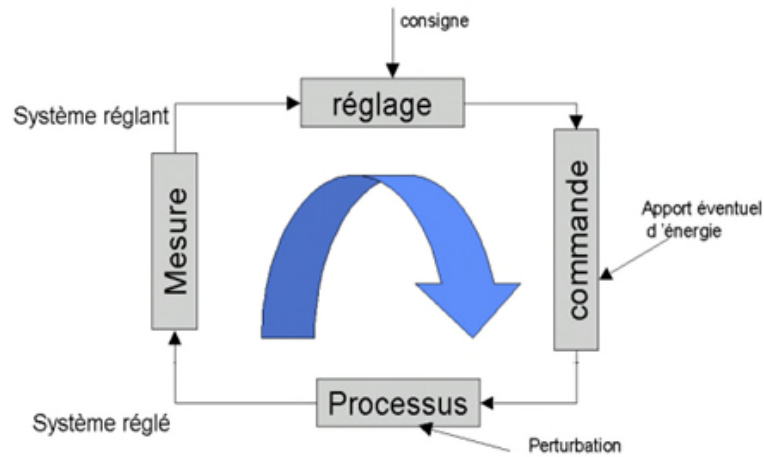
### **I.2.1 Mode de commande**

Il existe deux grands types de régulation :

- La régulation continue : la commande peut prendre toutes les valeurs possibles entre le minimum et le maximum.
- La régulation discontinue qui se décompose en deux familles :
  - la régulation TOR : commande ne pouvant prendre que 2 (Plus - Moins) ou 3 (Plus – Zéro - Moins),
  - la régulation Modulée : commande des créneaux de largeurs variables.

### I.2.2 La chaîne de traitement de l'information

Le contrôle de procédé met en œuvre une chaîne d'outils à plusieurs niveaux. Schématiquement, le lien entre le capteur et l'actionneur peut se représenter comme dans la **Figure (I-1)** [8].



**Figure (I-1)** : Schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information

Le but étant de maîtriser le procédé soit de le piloter, soit de l'empêcher d'évoluer en raison de perturbations.

### I.3 Généralités sur la logique floue

Dans la perspective des sciences, nous pouvons admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observations physiques s'avèrent non satisfaisantes, les sciences subjectives, particulièrement la logique floue, peuvent rendre beaucoup de services, dès lors que les connaissances sur la façon de résoudre un problème, d'effectuer un réglage...etc. sont disponibles.

En pratique la résolution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celles subjectives. La logique floue offre un cadre formel, qui n'existait pas auparavant, pour mettre en œuvre de telles méthodes de façon rigoureuse.

### I.3.1 Historique

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble floue soit proposé par **L. Zadeh**, automaticien de réputation internationale, professeur a l'université de Berkeley en Californie, qui à contribue a la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques a équation différentielle.

En 1974, **Mamdani** expérimentait la théorie énoncée par **Zadeh** sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connait la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F.L.Smidt-Fuller.

Aujourd'hui une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette « produit flou »ou « fuzzy ». [1]

### I.3.2 Quelques domaines d'applications

Parmi les nombreuses applications de la logique floue, la commande floue s'avère être le champ d'application le plus actif à travers le monde [2].

Voilà quelques exemples d'applications de la commande floue:

- Commande de tubes broyeurs pour la fabrication du ciment (première réalisation en 1979 au Danemark).
- Commande de métros avec un fonctionnement plus confortable et économique et une précision d'arrêt augmentée (1987 à Sendai, Japon).
- Production du fer et de l'acier, purification de l'eau, chaînes et robots de fabrication, opérateurs, unités arithmétique, micro-ordinateurs, ...
- Gestion des aspirateurs, des systèmes de ventilation et de régulation thermique.
- Lecture automatique, reconnaissance de caractères.
- Traitements d'images.

La liste proposée reste limitée, car les domaines d'applications sont multiples .

### I.3.3 Variables linguistiques

L'utilisation des ensembles flous offre une base pour une voie systématique de manipulation des concepts vagues et imprécis. On peut alors employer les ensembles flous pour représenter des variables linguistiques [3].

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases dans un langage naturel ou systématique et représentent un phénomène ou une grandeur, par les temps linguistique

- Quelque **Q**, Beaucoup **B**, Souvent **S**.
- Chaud **C**, Froid **F**, Rapide **R**, Lent **L**.
- Grand **G**, Petit **P**, etc..

### I.3.4 Les ensembles flous

Si la fonction caractéristique d'un ensemble classique ne peut prendre que deux valeurs soit **1** ou bien **0**, la fonction d'un ensemble flou peut prendre toutes les valeurs comprises entre **0** et **1**.

On définit alors un sous ensemble **A** de **U** comme suit [4] :

$$A = \{(x/\mu_A(x)), x \in U\}$$

$\mu_A(x)$  : degré d'appartenance de l'élément **x** au sous-ensemble flou **A**.

$\mu_A$  : est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle [0,1].

$$\begin{array}{ccc} \mu_A : U & \longrightarrow & [0,1] \\ X & \longrightarrow & \mu_A(x) \end{array}$$

### I.3.5 Les fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance permet de décrire l'évolution du degré de vérité de la variable linguistique.

Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre **0** et **1**, Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée  $\mu$  et appelée « facteur d'appartenance », La fonction d'appartenance décrivant un sous-ensemble flou est caractérisée par quatre propriétés [4]:



- **Le type** : La forme du nombre flou qui peut être triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïdale.
- **La hauteur** :  $H(A) = \text{Sup}_{x \in X} (\mu_A(x))$  de la fonction d'appartenance, un sous-ensemble flou est dit normalisé s'il est de hauteur 1.
- **Le noyau** :  $N(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\}$  est l'ensemble des éléments qui appartiennent totalement à A, pour les fonctions de type triangulaire, le noyau est un singleton qui est appelé aussi valeur modale.
- **Le support** :  $S(A) = \{x \mid \mu_A(x) \neq 0\}$ , cet ensemble décrit l'ensemble des éléments qui sont partiellement dans A.

### ➤ Le type

- Fonction triangulaire :

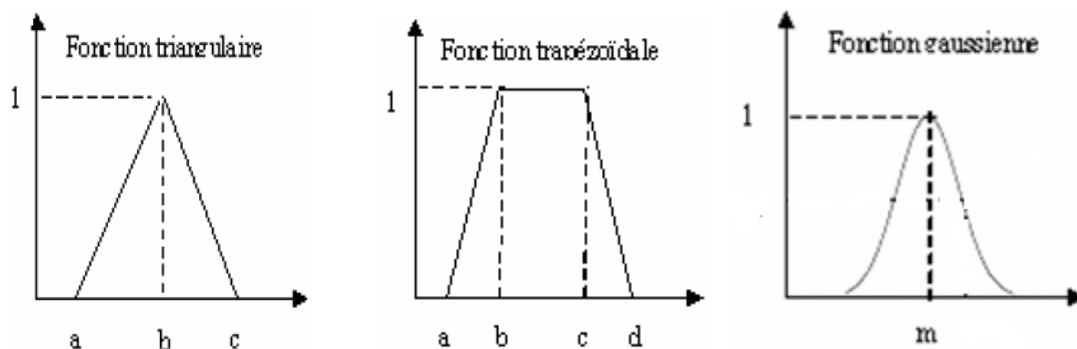
$$\mu(x) = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$

- Fonction trapézoïdale:

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

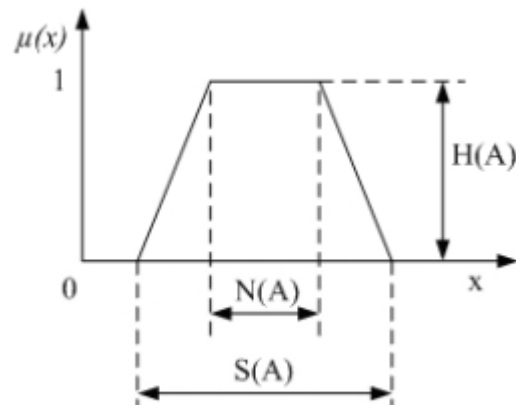
- Fonction Gaussienne :

$$\mu(x) = \exp \left( -\frac{(x-m)^2}{2\sigma} \right)$$



**Figure (I-2) : Formes des fonctions d'appartenance**

➤ **La hauteur, Le noyau, Le support**



**Figure (I-3) :** Représentations de La hauteur, Le noyau, Le support

### I.3.6 Les opérateurs de la logique floue

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou, ces relations sont traduites par les opérateurs « et », « ou » et « non » est sont les plus utilisés.

Les **Figures (I-4), (I-5), (I-6)** représentent la réalisation des opérateurs **et**, **ou** et **non** des ensembles flous **a** et **b** utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires et sont comparés aux opérateurs booléens correspondants.

Soit,  $\mu_a(x), \mu_b(x)$  les degrés d'appartenance de l'élément  $x$  dans l'univers de discours **X** (dénommé par  $x \in X$ ) [5].

- **Opérateur \* NON \***

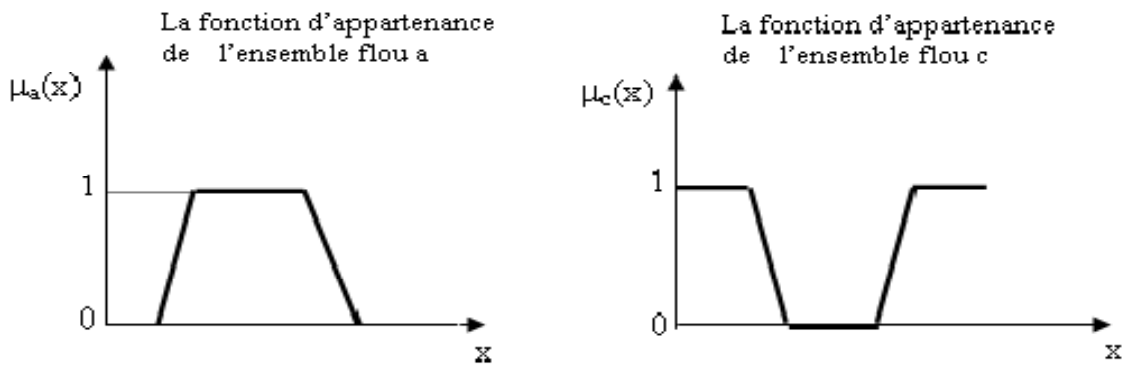
Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire

$$c = \bar{a}$$

Est défini par les éléments de  $x$  qui n'appartiennent pas à l'ensemble  $a$ . Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenances de la manière suivante :

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_a(x)$$

La **figure (I-4)** met en évidence cette relation



**Figure (I-4) :** Opération \*NON \*

- **Opérateur \* ET \***

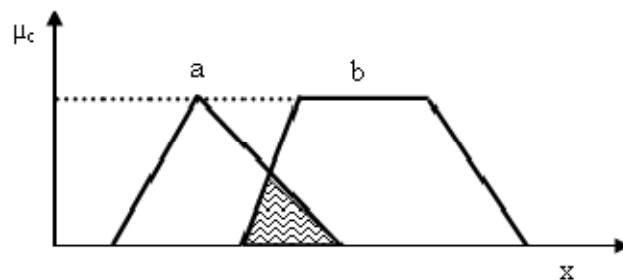
L'opérateur « ET » correspond à l'intersection de deux ensembles **a** et **b** on écrit :

$$c = a \cap b = a \text{ ET } b$$

Dans la logique floue, l'opérateur « ET » est réalisé dans la plupart des cas par la formulation du minimum, appliqué aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles **a** et **b**.

$$\mu_c(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)]$$

On parle alors de l'opérateur minimum, cette opération est représentée à la **figure (I-5)**



**Figure (I-5) :** L'opérateur \* ET \*, réalisé par la formulation de minimum.

- **Opérateur \* OU \***

L'opérateur « OU » correspond à l'union de deux ensembles **a** et **b**, on a donc :

$$c = a \cup b = a \text{ OU } b$$

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles **a** et **b**.

On a donc l'opérateur maximum :

$$\mu_c(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)]$$

Cette opération est représentée comme suit:

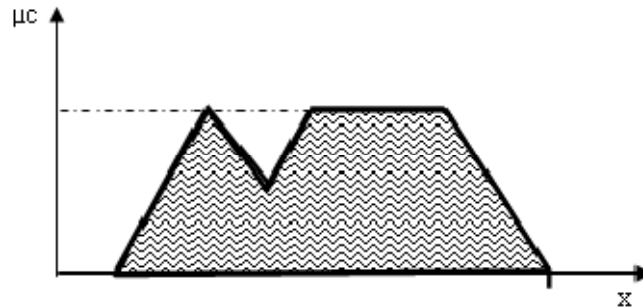


Figure (I-6) : Opérateur \* OU \*, réalisé par la formulation du maximum.

### I.3.7 Structure d'un système flou

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la **figure (I-7)** [6] :

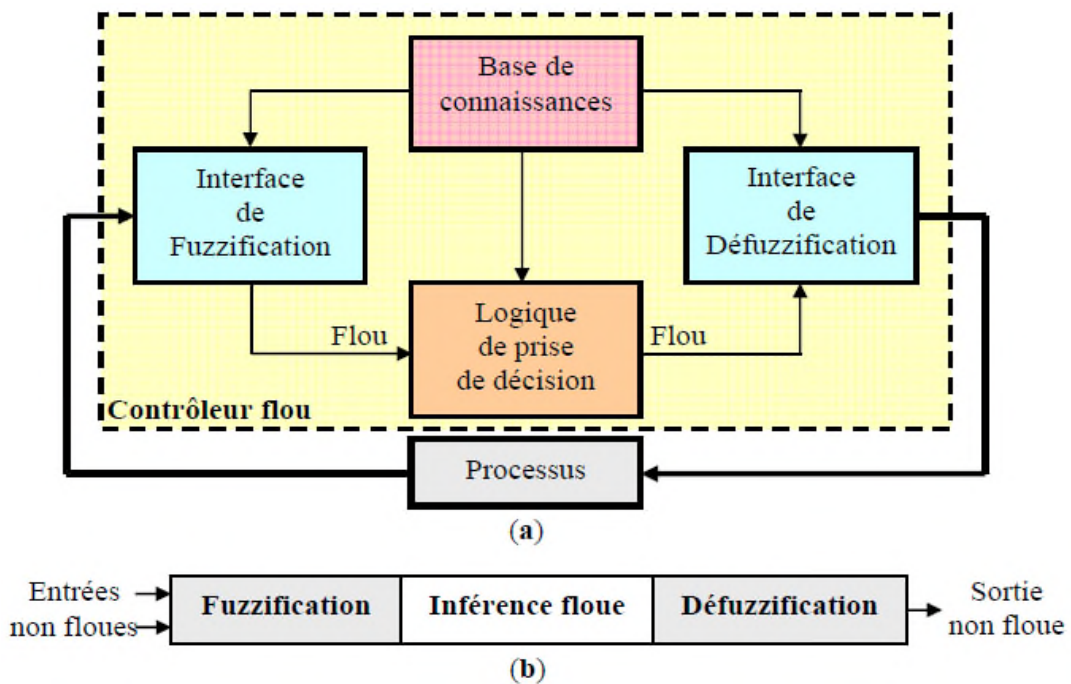


Figure (I-7) : (a): Schéma synoptique d'un contrôleur, (b): configuration d'un contrôleur flou.

Ce schéma est composé de[6] :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de connaissance.
- Une logique de prise de décision.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

### I.3.7.1 Fuzzification

La fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues).

A cet effet, deux méthodes de fuzzification existent :

- représentation des valeurs floues par un sous-ensemble flou  $A_{xi}$  défini par :

$$\mu_{A_{xi}}(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x' \\ \text{et décroît quand } x \text{ s'éloigne de } x' \end{cases}$$

- représentation des valeurs floues par un singleton  $A$  défini par :

$$\mu_{Ax}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x' \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Ou  $x'$  est une valeur numérique d'entrée .C'est un cas particulier du premier pour simplifier les calculs [7].

### I.3.7.2 Base de connaissances

La base de connaissance comprend une connaissance du domaine d'application et les buts du contrôle prévu. Elle est composée:

1. D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation.

Ceci se résume en :

- une normalisation des univers de discours.
- Une partition floue des espaces entrées-sorties.
- Un choix des fonctions d'appartenances.

2. La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles: **Si <condition> Alors <conséquence>**. Elle se résume en :

- choix de variables d'entrées
- source de règles floues de contrôle

### I.3.7.3 Mécanisme d'inférence de floue

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence, dans ce dernier cas, une matrice dite d'inférence rassemble toutes les règles d'inférence sous forme d'un tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle.

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont: **Max-Min** (Implication de **Mamdani**), **Max-Produit** et **Somme-produit**, cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction **Max**. [12]

#### A. Méthodes d'inférence

Après la partie précédente, nous savons calculer les relations de type

- Si  $\varepsilon$  est N ET  $\Delta\varepsilon$  est N

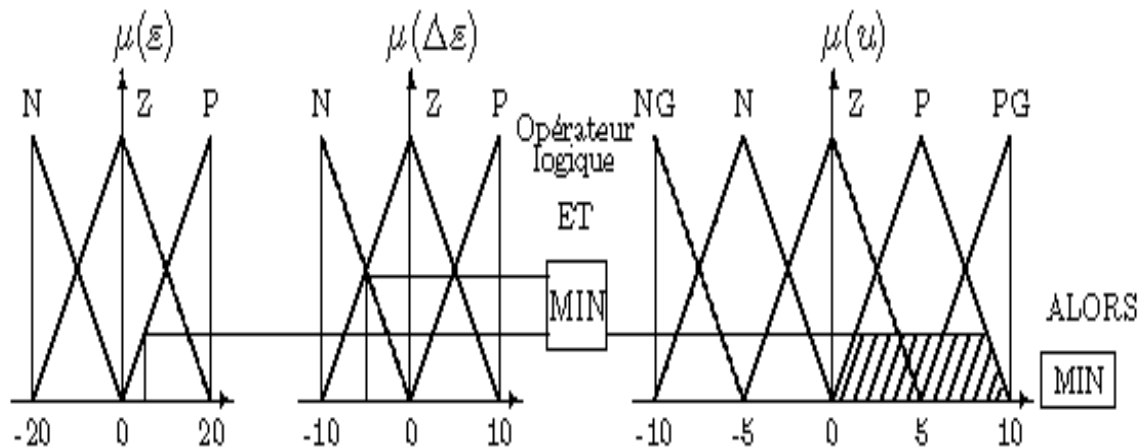
-Si ( $\varepsilon$  est NON N ET  $\Delta\varepsilon$  est N) OU  $\varepsilon$  est P

Il reste donc à définir une opération pour traduire le terme ALORS ainsi qu'une opération pour définir l'interaction entre les règles.

- **Méthode d'inférence max-min**

Avec la méthode d'inférence max-min le mot ALORS est représenté par l'opération minimum de la valeur de la règle et de la fonction d'appartenance considérée de la sortie.

Ainsi la règle : Si  $\varepsilon$  est P ET  $\Delta\varepsilon$  est Z ALORS  $u$  est P est traduite par la surface hachurée de la **figure (I-8)** qui représente la fonction d'appartenance partielle.



**Figure (I-8) :** Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-min

Par ailleurs l'interaction entre les règles sera nommée **OU** ainsi, on considère que les deux règles suivantes :

- Si  $\varepsilon$  est Z ET  $\Delta\varepsilon$  est N ALORS  $u$  est N
- Si  $\varepsilon$  est P ET  $\Delta\varepsilon$  est Z ALORS  $u$  est P

Se lisent :

- Si  $\varepsilon$  est Z ET  $\Delta\varepsilon$  est N ALORS  $u$  est N OU
- Si  $\varepsilon$  est P ET  $\Delta\varepsilon$  est Z ALORS  $u$  est P

Et ce **OU** se traduit par l'opération max. Nous obtenons ainsi la fonction d'appartenance résultante.

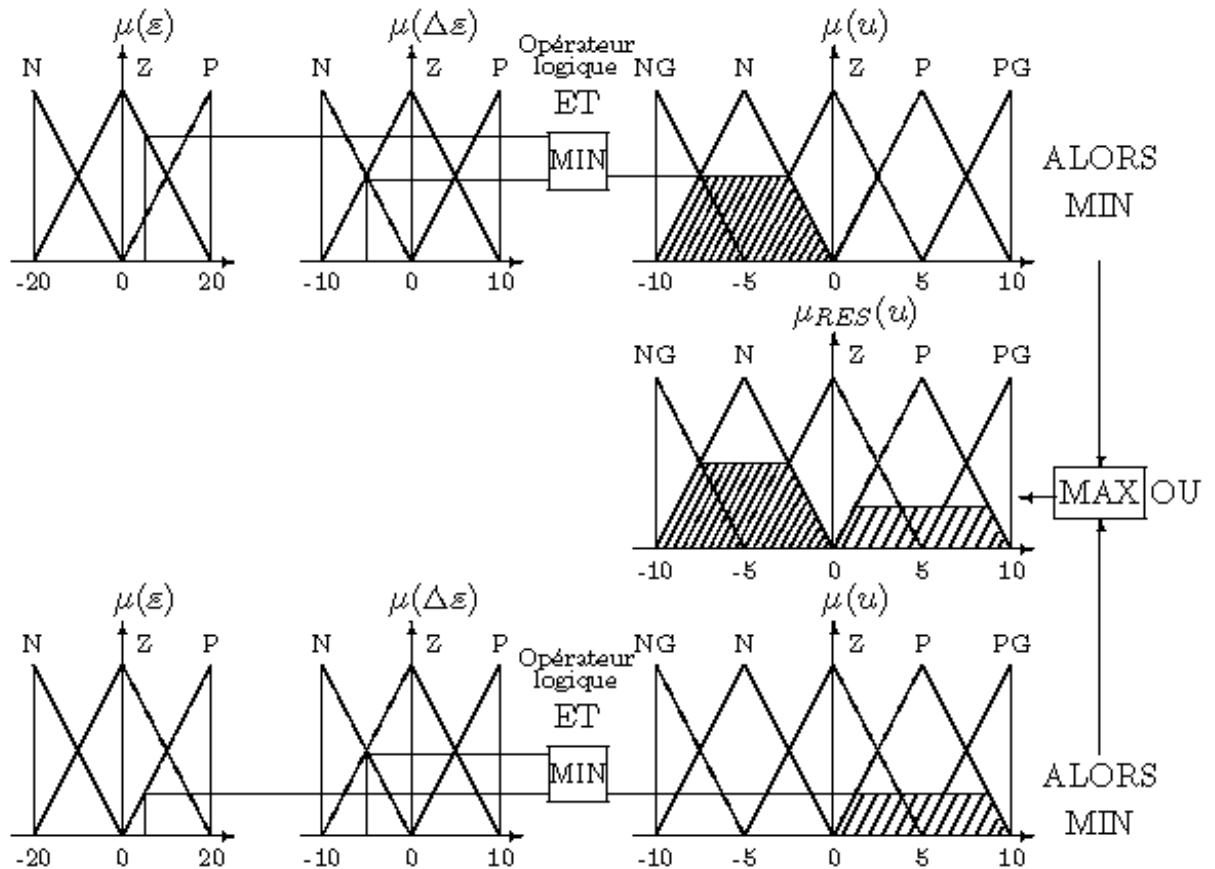


Figure (I-9) : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min

L'application de l'ensemble des règles donne la fonction d'appartenance partielle représentée sur la figure (I-10)

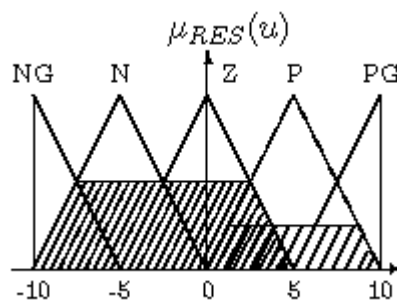
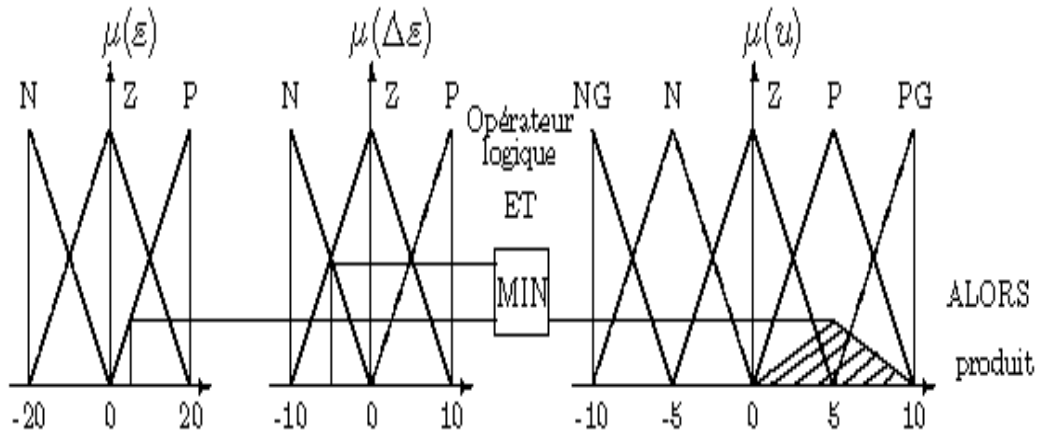


Figure (I-10) : Fonction d'appartenance résultante

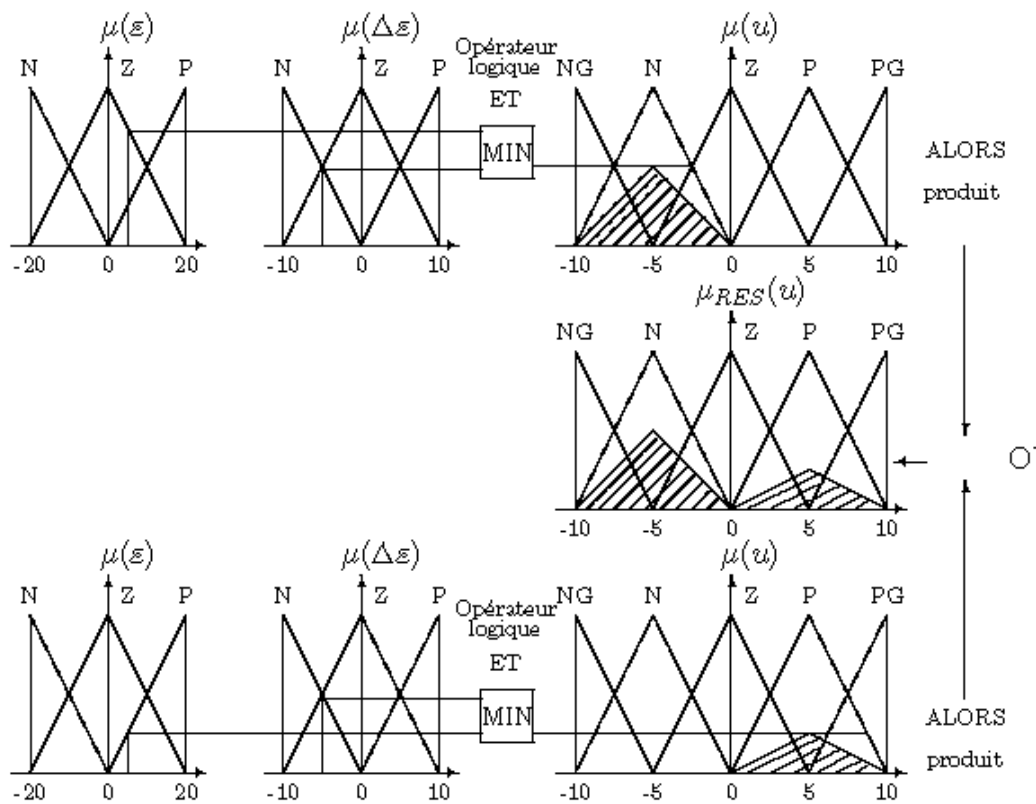


• Méthode d'inférence max-prod

La différence avec la méthode précédente est la réalisation de ALORS qui se traduit par la multiplication de la fonction d'appartenance considérée par la valeur de la règle. Ce résultat est illustré sur la **figure (I-11)**.



**Figure (I-11) :** Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-prod



**Figure (I-12) :** Définition de OU dans la méthode d'inférence max-prod

- **Méthode d'inférence somme-prod**

Proche de la méthode précédente, il suffit de remplacer la traduction de ALORS par la somme des fonctions d'appartenance partielles.

## **B. Critères de choix d'une méthode d'inférence**

On utilisera en général la méthode max-min, celle-ci provoque une commande avec des sauts mais ce n'est en général pas ou peu contraignant. Il est à noter que la méthode somme-prod permet de développer un calcul analytique de la sortie permettant, si l'on possède un modèle du système, de calculer les caractéristiques temporelles de la sortie.

### **I.3.7.4 Defuzzification**

A travers le processus flou, plusieurs règles peuvent être activées avec des valeurs de vérités différentes, comme l'entrée du système est une valeur numérique, il est nécessaire de transformer le sous-ensemble flou de sortie  $y$ , le point numérique  $y$  qui peut être considéré comme le plus représentatif de cet ensemble flou [7].

Il existe Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont:

- **Méthode du maximum**

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

- **Méthode de la moyenne des maxima**

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

- **Méthode du centre de gravité**

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité  $\Delta_{u_n}$  peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante [2]:

$$\Delta_{u_n} = \frac{\int x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int \mu(x) \cdot dx}$$

Nous nous sommes intéressés à cette dernière méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

#### **I.4 La régulation floue**

La régulation floue fait partie des systèmes à base de connaissances, elle s'appuie sur la logique floue.

La logique floue permet de prendre en compte toutes sortes de connaissances qualitatives de concepteurs et d'opérateurs dans l'automatisation des systèmes. On prendra les valeurs qui nous intéressent pour les classer de manière floue.

Jusqu'à présent, le régulateur flou a obtenu les plus grands succès au niveau des applications industrielles et commerciales des méthodes floues.

Les régulateurs flous sont des régulateurs non linéaires, En choisissant les fonctions d'appartenance de manière appropriée et en établissant une base de règles, les non linéarités peuvent être compensés dans le système réglé.

##### **I.4.1 Avantages et inconvénients du régulateur par logique floue**

Le réglage par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et inconvénients essentiels.

Les avantages sont :

- Robustesse de la commande floue vis-à-vis des incertitudes.
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistique) de l'opérateur de processus,
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- L'emploi possible aussi pour les processus rapides (grâce à des processeurs dédiés).
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuit intégrés (processeur dédiés, solution matérielle).

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de directive précise pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).

- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
- La précision de réglage souvent peu élevée.
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

#### I.4.2 Limites des régulateurs flous

En technique de régulation traditionnelle, un modèle du système réglé est d'abord mis au point, le régulateur est ensuite projeté sur la base de ce modèle.

Par contre, le régulateur flou est directement projeté sur la base des expériences découlant des régulateurs existants ou des expériences individuelles, dès lors les erreurs dans la phase de création ne peuvent guère être corrigées ultérieurement.

En raison de la complexité croissante du système, les dépenses pour la mise au point d'un régulateur flou augmente de façon disproportionnée Il est difficile de trouver la méthode correcte pour la défuzzification.

#### I.4.3 Régulateur de type MAMDANI

En 1974, MAMDANI a présenté pour la première fois, la technique de réglage par la logique floue et conçoit le premier contrôleur flou.

Ce contrôleur est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises comme celles du langage courant qui appliquées au système, peuvent le contrôler, l'obtention de ces règles auprès des experts qui connaissent bien le système est facile [9].

#### I.4.4 Synthèse du régulateur

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par MAMDANI pour les systèmes mono-entrée/mono-sortie. Ce schéma est représenté par la **figure (I-13)** [10].

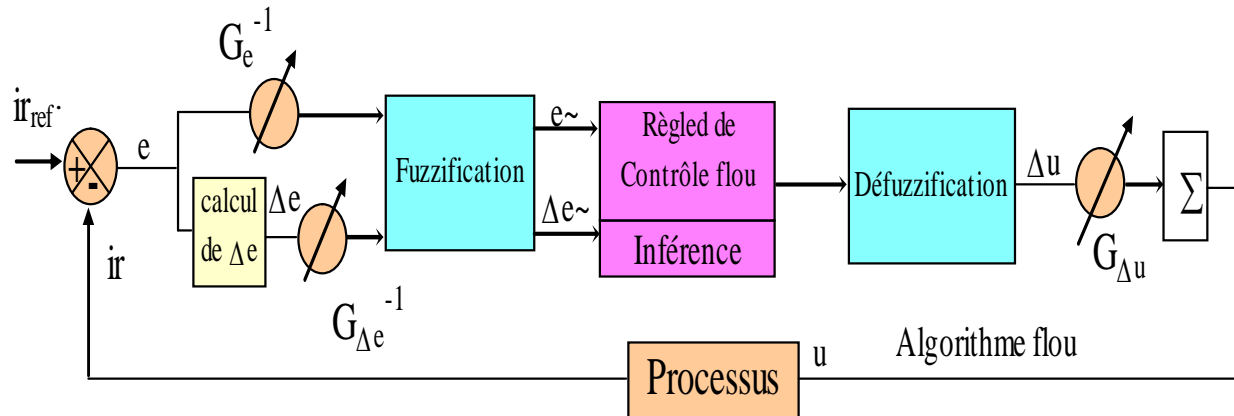


Figure (I-13) : Schéma bloc d'un contrôleur flou

D'après ce schéma, le système est composé:

- D'un bloc de calcul de variation de l'erreur au cours du temps  $\Delta e$ .
- Des facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à la variation de la commande  $\Delta u$ .
- Des règles du contrôleur flou.
- D'un bloc de Defuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur numérique.
- D'un bloc somateur.

Ces méthodes permettent de formuler un ensemble de décisions en termes linguistiques, utilisant les ensembles flous pour décrire les amplitudes de l'erreur, de sa variation et de la commande appropriée, en combinant ces règles, nous pouvons tracer des tables de décision permettant de donner les valeurs de la sortie du contrôleur correspondant aux situations d'intérêt.

Les facteurs d'échelles doivent être choisis sur la base de l'étude du système de telle sorte que, lors des petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour l'erreur et sa variation ne soit pas dépassé.

Quelques directives générales sont données, afin de conduire à un choix convenable :

En ce qui concerne les variables d'entrée, il faut éviter des lacunes ou un chevauchement insuffisant entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non-intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité du régulateur. De même, est évité un chevauchement trop important surtout, avec  $\mu=1$  entre deux ensembles voisins.

Pour la variable de sortie, la présence des lacunes entre les fonctions d'appartenance admissibles, même souhaitées, cela aboutit à une simplification notable de la détermination de l'abscisse du centre de gravité.

### **I.4.5 Réglage de régulateur**

Le réglage d'une boucle de régulation (choix de structure et calcul des paramètres du régulateur) doit permettre de répondre au plus grand nombre de contraintes exigées par le cahier des charges du procédé à réguler.

De nombreuses méthodes de réglage d'une boucle sont possibles selon les besoins en régulation ou en asservissement.

Les exigences du cahier des charges sont décrites soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel.

Le critère de réglage est alors fixé à partir soit de la forme de la réponse temporelle souhaitée pour un type d'entrée (par exemple un échelon), soit à partir des marges de stabilité (marge de gain et de phase, facteur de résonance).

Le critère de précision est bien entendu, intrinsèquement lié à celui du réglage.

Le bon réglage est celui qui répondra au meilleur compromis global du cahier des charges.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, on a parlé d'une façon générale sur les notions élémentaires et principales pour élaborer un contrôleur flou.

On a débuté par quelques définitions comme un sous-ensemble flou, certaines caractéristiques et les principales opérations, ensuite on a présenté la structure de base d'un contrôleur flou avec quelque explication de chaque bloc de la structure.

En tenant compte de ces éléments. Plusieurs algorithmes de régulation floue ont été développés et appliqués sur plusieurs systèmes dans domaines différents.

Et nous avons présenté une description générale des systèmes industriels ainsi que quelques méthodes de régulation, qui se résument dans l'utilisation des régulateurs floue.

# **Chapitre II**

## **Commande de la température d'eau dans une cuve**

---



## I.1 Introduction

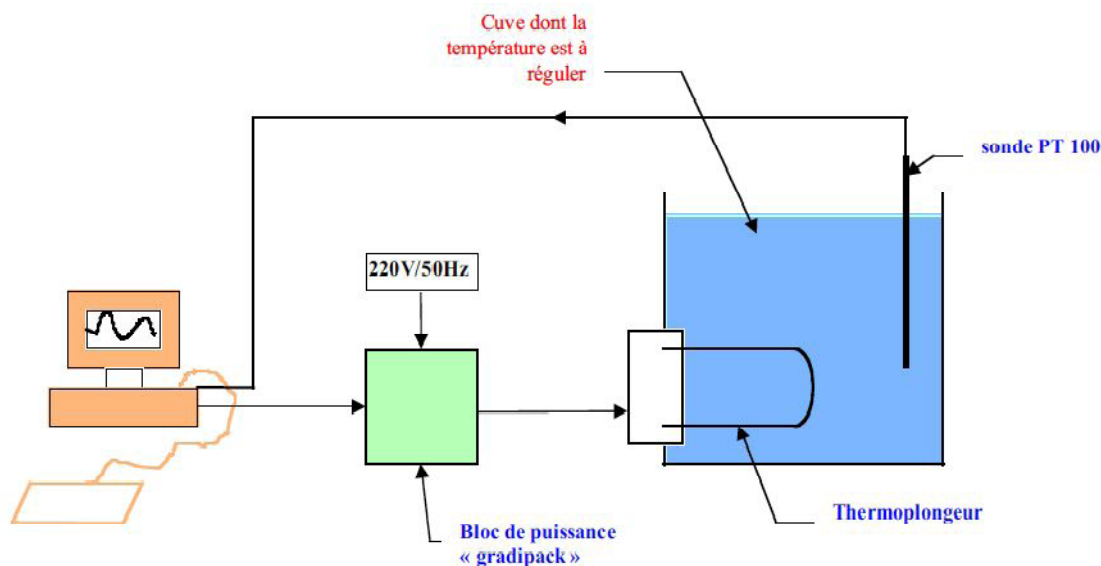
L'amélioration du confort thermique qui constitue l'objectif principal de la réhabilitation thermique, consiste à mettre en évidence le comportement thermique d'une cuve, et ce à partir de la prédiction des températures ambiantes intérieures.

On se propose dans ce chapitre de présenter notre système qui commande la température d'eau dans une cuve par un thermoplongeur, afin d'homogénéiser sa température, et pour cela on a expliqué le principe de chaque bloc et le fonctionnement globale de notre système.

## II.2 Présentation de système régulé

### II.2.1 Schéma de principe

Le schéma de principe représente le synoptique de la régulation de température à réaliser, présenté dans la **Figure (II-1)**.



**Figure (II-1) :** Commande de la température d'eau dans une cuve

Et ce schéma de principe comporte différentes composantes :

### II.2.2 Thermoplongeur

Appareil comportant une résistance électrique que l'on plonge dans un liquide pour en assurer le chauffage. **Figure (II-2)** [11].

### II.2.3 Sonde PT 100

La sonde Pt 100 est un capteur de température qui est utilisé dans le domaine industriel (agroalimentaire, chimie, raffinerie...). Ce capteur est constitué d'une résistance en Platine. La valeur initiale du Pt100 est de **100 ohms** correspondant à une température de 0°C. La figure ci-dessus représente la Sonde PT100. **Figure (II-3) [11]**.

#### Principe de mesure : relation Résistance / Température

$$R_t/R_0 = 1 + At + Bt^2 \quad [\text{II-1}]$$

Avec :

$R_t$  = résistance du thermomètre à la température T.

$R_0$  = résistance du thermomètre à 0°C.

t = la température en °C.

$A = 3.9083 * 10^{-3}$  et  $B = -5.775 * 10^{-7}$

Cette relation s'utilise pour les températures au dessus de 0°C.



**Figure (II-2) : Thermoplongeur**



**Figure (II-3) : Sonde PT100**

### II.2.4 Bloc de puissance « gradipack »

Appareil chargé de distribuer le courant électrique dans les projecteurs traditionnels via un certain nombre de circuits [11].

Un bloc de puissance sert à varier le courant. On s'en sert pour commander des projecteurs dits traditionnel par ( pc, découpe, ...) et de faire varier leur intensité.



Figure (II-4) : Bloc de puissance

Le bloc de puissance est composé d'un ensemble de 2 thyristors qui sont montés tête-bêche.

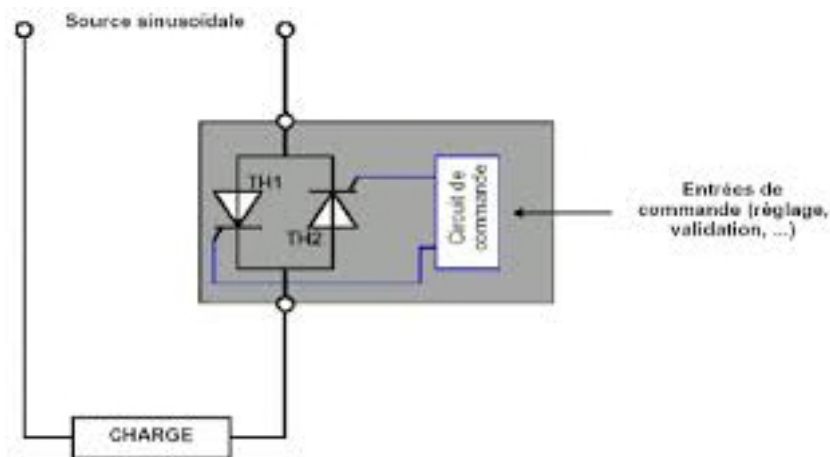


Figure (II-5) : Ensemble de 2 thyristors de bloc de puissance

### II.2.5 Micro-ordinateur

Il est le cerveau de notre système. Il module l'émission de chaleur en fonction des informations qu'il reçoit à partir de la sonde et des besoins de confort que nous avons programmés.

### II.2.6 Fonctionnement

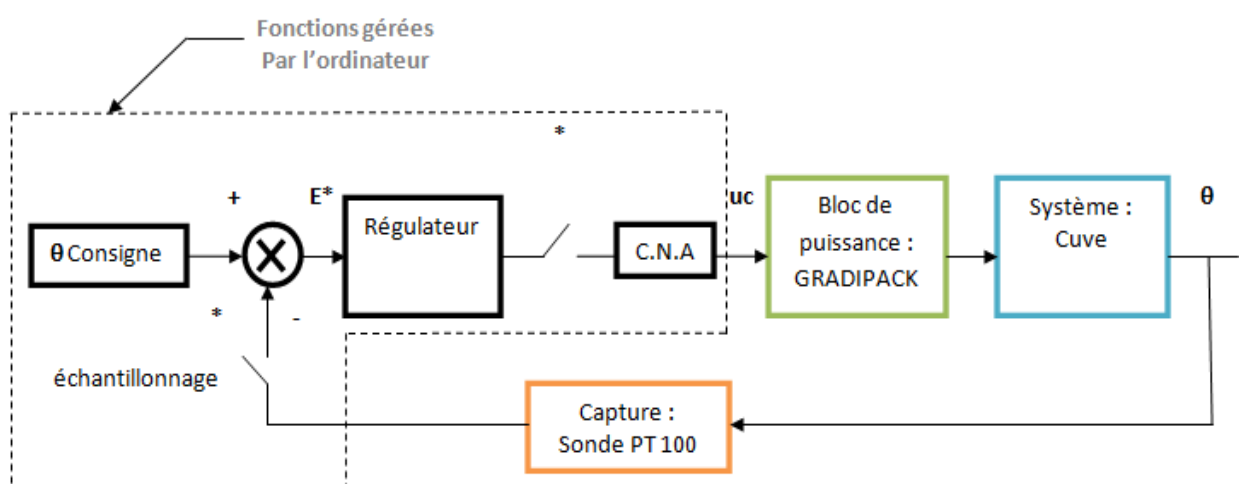
Il s'agit de réguler la température de l'eau d'une **cuve** (seau d'une contenance de quelques litres) équipée d'un **thermoplongeur** apportant l'énergie calorifique. Une **sonde de température (PT100)** permet de mesurer la température réelle de l'eau. Il est bon de prévoir un brassage de l'eau dans la cuve afin d'homogénéiser sa température.

La puissance nominale du **thermoplongeur (1 kW)** est modulée grâce à un bloc de puissance « **GRADIPACK** » (dénomination commerciale). Il s'agit d'un ensemble de 2 thyristors montés tête-bêche (gradateur) permettant de faire varier la puissance électrique dissipée par variation de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors. Celle-ci est contrôlée par une tension de commande 0-10V continue (**Ucom**) qui permet de faire varier la tension efficace (**Ueff**) appliquée au thermoplongeur.

Le rôle du micro-ordinateur sera de faire la mesure de la température de la cuve à partir du signal délivré par la sonde PT100 et sa mise à l'échelle, de comparer cette valeur avec la température de consigne, de traiter l'écart entre ces 2 valeurs et de fournir une tension de commande utile pour le « GRADIPACK ». Tout cela nécessite la mise en oeuvre d'une carte d'entrées-sorties analogiques.

### II.3 Représentation synoptique de la régulation de température à réaliser

La **Figure (II -6)** présente le système de la régulation de température à réaliser placé dans une boucle d'asservissement contenant un régulateur flou [10].



**Figure (II-6) :** Représentation synoptique de la régulation de température

**II.4 Modélisation du système**

**II.4.1 Cuve à chauffer**

On supposera que la capacité calorifique de la cuve à chauffer se réduit à l'eau qu'elle contient.

En prenant un volume de 3 litres, on obtient :

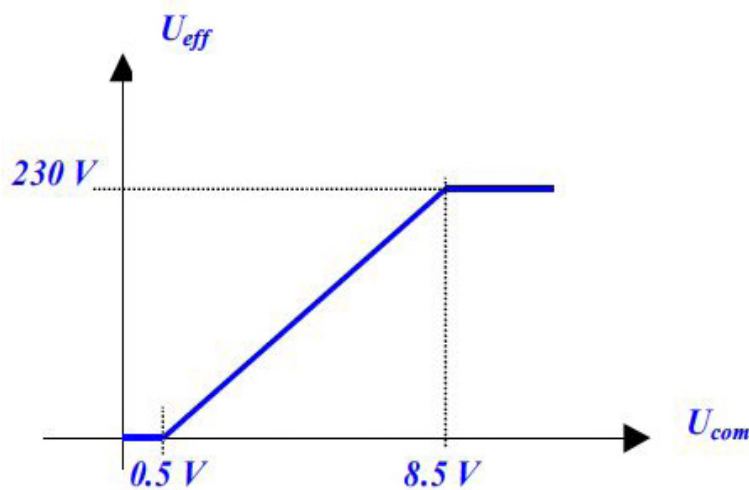
$$C = v * c = 3 * 4.18E3 \approx 1.25E4 JK^{-1} \tag{II.2}$$

**C** : Capacité calorifique.

**v** : Volume.

**c** = 4 .18 E3.

**II.4.2 Contrôle du thermoplongeur**



**Figure (II-7) :** La modélisation du fonctionnement « GRADIPACK »

La tension efficace appliquée au thermoplongeur passe de 0 à 230V si la tension de commande évolue de 0.5V à 8.5V. On pourra donc écrire :

$$U_{eff} = \frac{230}{8} \cdot (U_{com} - 0.5) \tag{II-3}$$

La puissance de chauffe sera donnée par :

$$P = P_N \frac{(U_{eff})^2}{(U_N)^2} \tag{II-4}$$

Soit en tenant compte de l'expression précédente :

$$P = \frac{P_N}{8^2} (U_{com} - 0.5)^2 = 15.6(U_{com} - 0.5)^2 \text{ (en watts)} \quad [\text{II-5}]$$

Avec  $P_N = 8^2 * 15.6$  [II-6]

### II.4.3 Evaluation des pertes thermiques

Les pertes thermiques peuvent se mettre sous la forme

$$P_{th} = K. (\theta - \theta_{ext}) \quad (\text{Loi de FOURIER}) \quad [\text{II-7}]$$

L'expérience montre qu'elles sont faibles. On les estimera à 50 W pour un  $\Delta\theta = 25^\circ\text{C}$ . D'où :

$$K = 2\text{WK}^{-1} \quad [\text{II-8}]$$

### II.4.4 Bilan de puissance sur la cuve

La puissance fournie par le thermoplongeur :  $P_T$ , sert à élever la température de l'eau et participe aux pertes soit :

$$P_T = C. \frac{d(\theta - \theta_{ini})}{dt} + K. (\theta - \theta_{ext}) \quad [\text{II-9}]$$

Avec :

$\theta$  : température de l'eau.

$\theta_{ini}$  : Température initiale de l'eau.

$\theta_{ext}$  : Température extérieure à la cuve.

**II.5 Modélisation de la cuve**

En reprenant le bilan de puissance sur la cuve, il vient en utilisant la notation de Laplace :

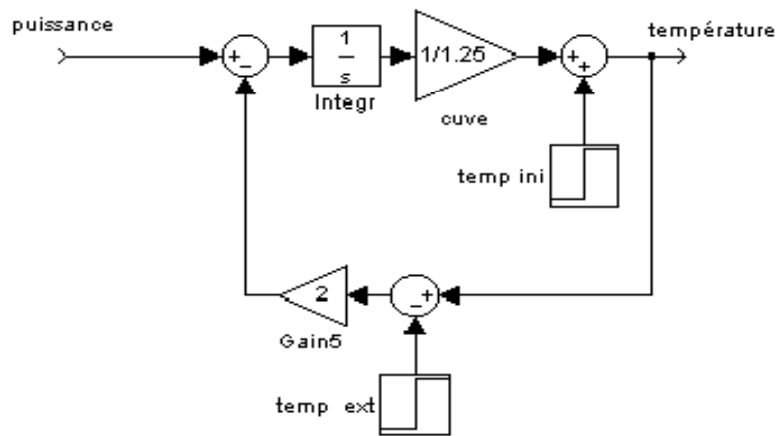
$$P_T = C.P(\theta - \theta_{ini}) + K(\theta - \theta_{ext})$$

$$P_T - K(\theta - \theta_{ext}) = C.P(\theta - \theta_{ini})$$

$$(\theta - \theta_{ini}) = [P_T - K(\theta - \theta_{ext})] \frac{1}{C.P}$$

$$\theta = \theta_{ini} + \frac{1}{C.P} [P_T - K(\theta - \theta_{ext})]$$

Ce qui se traduit par le schéma **simulink** ci dessous :



**Figure (II-8) :** Schéma bloc d'un asservissement de modélisation de la cuve

**II.6 Modélisation du gradateur de puissance**

Rappelons la relation donnant la puissance de chauffe en fonction de la tension de commande.

$$P = \frac{P_N}{8^2} (U_{com} - 0.5)^2 = 15.6(U_{com} - 0.5)^2$$

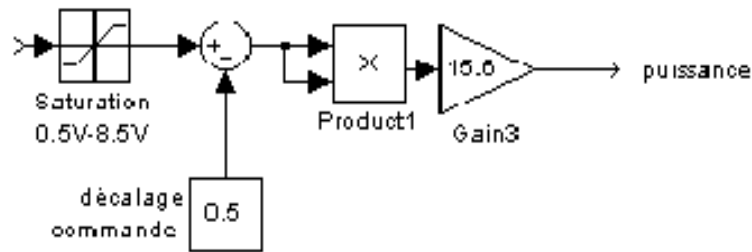


Figure (II-9) : Schéma bloc d'un asservissement de puissance

La saturation permet de limiter la tension de commande à la plage 0.5V-8.5V et le bloc produit permet de faire l'élévation au carré.

### II.7 Système commande, en boucle ouverte et en boucle ferme

Dans un système commandé, la grandeur de sortie dépend de la grandeur d'entrée (appelé aussi grandeur de commande).

#### II.7.1 Boucle ouverte

Un système de commande est dit en en boucle ouverte si le signal de commande est indépendant du signal de sortie. Dans ce type de systèmes de commande, les perturbations influencent grandement la sortie et l'asservissement de la sortie vis-à-vis de l'entrée n'est pas assuré. La Figure (II-10) représente le schéma bloc d'un asservissement de modélisation de notre système en boucle ouverte.

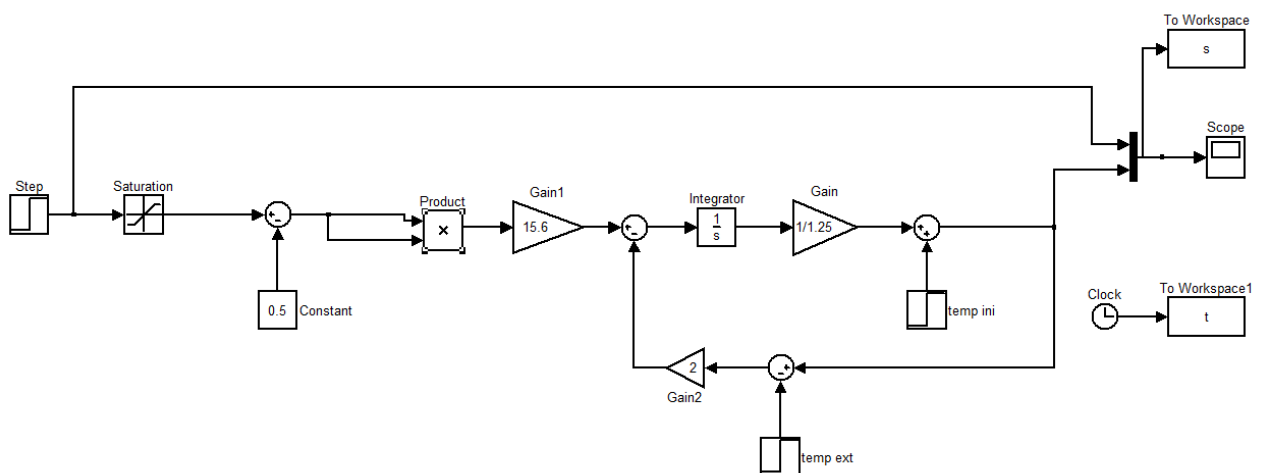
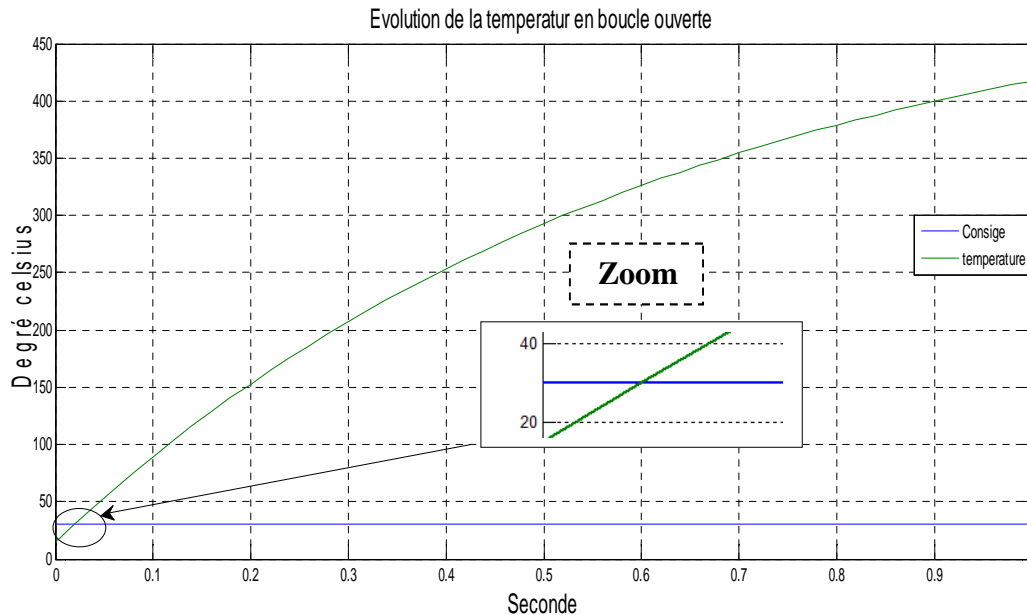


Figure (II-10) : Le système en boucle ouverte



Après avoir simulé le système en boucle ouverte (MATLAB SUMULINK), avec une consigne de température est réglée à  $30^{\circ}\text{C}$ , alors que la température initiale est de  $15^{\circ}\text{C}$ , Les résultats obtenus sont illustrés par la **Figure (II-11)**.



**Figure (II-11) :** Evolution de la température en boucle ouverte

### Interprétation

En imposant une consigne en entrée, l'organe de commande impose au système une modification de sa sortie. Mais dans une régulation, ce qui est recherché c'est que la grandeur réglée atteigne une valeur proche de la consigne et se stabilise autour de celle-ci. Or sur la figure (II-1), il n'y a aucune information de l'état de la sortie par rapport à l'état de l'entrée. En conséquence, l'organe de commande pilote le système à partir de la consigne sans savoir dans quel état se trouve la sortie (soumise à des perturbations de tout ordre).

La régulation en boucle ouverte ne peut être mise en œuvre que si l'on connaît la loi régissant le fonctionnement du processus (autrement dit, il faut connaître la corrélation entre la valeur mesurée et la grandeur réglant).

II.7.2 Boucle Fermée

Un système est dit bouclé (boucle ferme) dès lors que l'on prend en compte en permanence l'état réel du système, observé à sa sortie. On adapte alors l'entrée en fonction de la grandeur mesurée. Un capteur donne une image de la sortie que l'on doit comparer à la grandeur de consigne.

La **Figure (II-12)** représente le schéma bloc d'un asservissement de modélisation de notre système en boucle ferme.

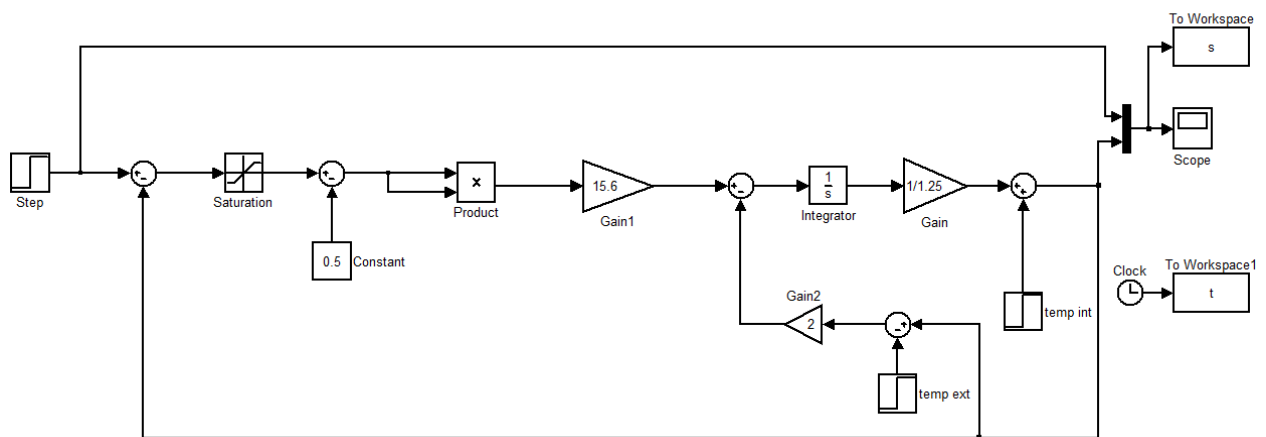


Figure (II-12) : Le système en boucle fermée.

On garde la valeur de la consigne de température réglée à 30°C, alors que la température initiale est de 15°C, Les résultats obtenus sont illustrés par la **Figure (II-13)**.

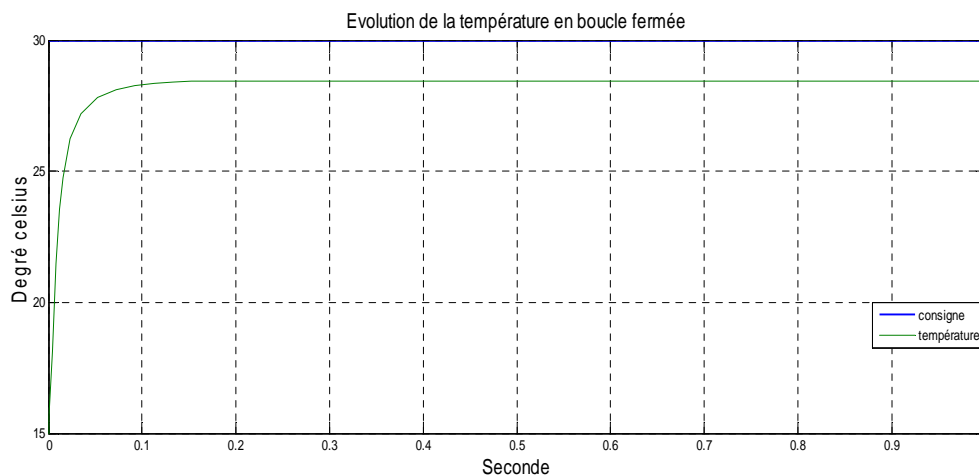


Figure (II-13) : Evolution de la température en boucle fermée sans correcteur

**Interprétation**

D'après la **Figure (II-13)**, on voit bien que la réponse de système dans cet asservissement est instable, d'où la nécessité une régulation pour stabiliser la réponse et améliorer les performances en température.

**II.8 Intérêt d'une régulation**

Le contrôle en boucle fermée, régulation ou asservissement, est le plus populaire chez la majorité des industriels car il possède les avantages suivants :

- Il compense toute sorte de perturbation.
- Il nécessite un minimum de connaissance sur la dynamique du procédé en particulier
- Le modèle dynamique du procédé n'est pas nécessaire pour réguler le procédé mais il peut être très utile pour la conception d'un système performant de commande et régulation.
- Il est à la fois polyvalent et robuste pour certains procédés et s'adapte facilement au changement du point de fonctionnement du procédé.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, on a détaillé le fonctionnement de notre système et en précisant le rôle de chaque paramètre, ensuite, on a présenté un certain nombre d'approches pour calculer le bilan de puissance sur la cuve.

De même, nous avons abordé la modélisation de notre système, commandé en boucle ouvert, en boucle fermée.

Ensuite, on constate que notre système nécessite une régulation pour stabiliser la réponse et améliorer les performances en température. Pour cette raison on synthétise un régulateur flou qui fera l'objet du prochain chapitre.

# **Chapitre III**

## **Résultats de la simulation**

---

### III.1 Introduction

Ce chapitre a pour but, d'implémenter la commande floue pour un système de commande de la température d'eau dans un cuve, dos objectif d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.

Le réglage des coefficients (paramètres) de la commande flou est basé sur le type de **MAMDANI**.

### III.2 Application de la commande floue sur le système

Nous avons synthétisé le régulateur à logique floue du type MAMDANI pour le réglage de température. Le signal de sortie est déterminé en fonction des signaux d'entrée par l'intermédiaire des règles, comme il est illustré dans le **tableau (III-1)**. Ce tableau résume l'ensemble des règles de savoir-faire humain, basées sur l'expérience, la connaissance du système à piloter ainsi que sur une part d'intuition.

e \ de /dt	P	M	G
Né	P	M	G
Po	P	G	G

**Tableau (III-1) :** Règles d'inférences.

Les classes sont notées comme suit:

- P : Petite
- M : Moyenne
- G : Grand
- Po : Positive
- Né: Négative

Les fonctions d'appartenances sont du type triangulaire et trapézoïdal sur les limites.

L'intervalle d'intérêt des variables d'entrée est subdivisé en trois classes pour l'erreur « e » et en deux classes pour sa dérivée « de/dt », alors que celui de la variable de sortie « C » est subdivisé en trois classes.

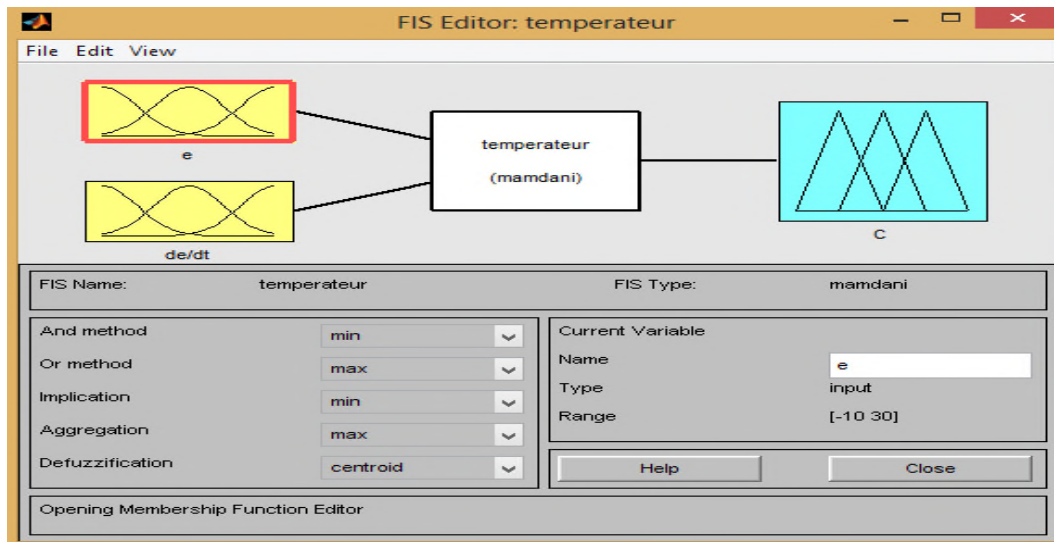


Figure (III-1) : Définition de la structure globale (entrée, sortie, type d'opérateurs)

Chaque grandeur est caractérisée par sa fonction d'appartenance. On utilise ici un éditeur graphique, illustré par la figure (III-2), pour définir ces fonctions.

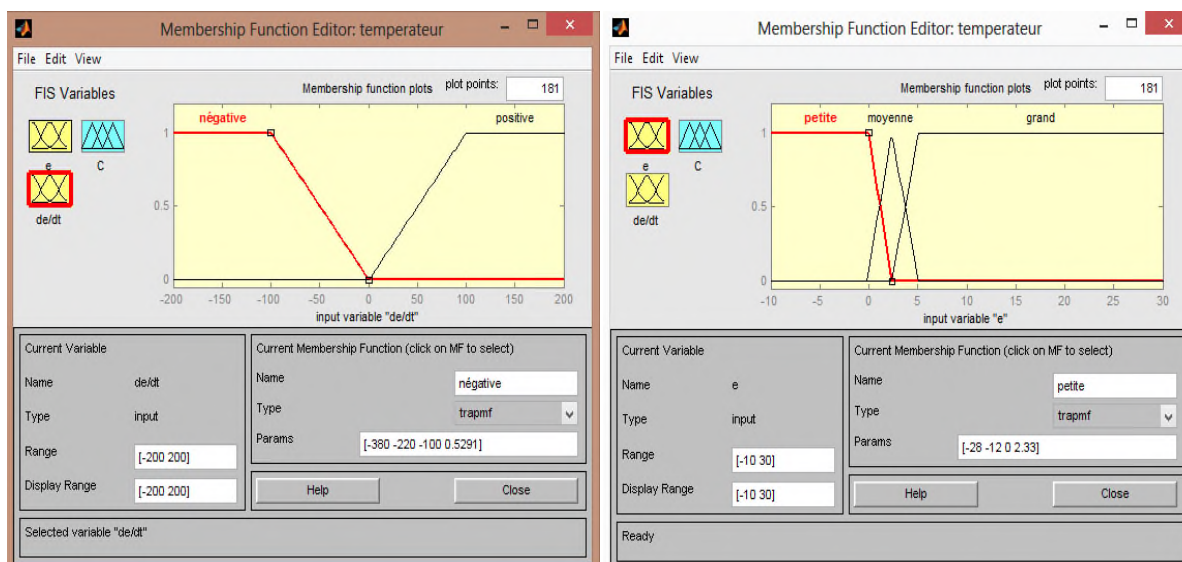


Figure (III-2.a) : Définition des fonctions d'appartenance pour « e », « de/dt ».

L'entrée  $e$  et  $\Delta e$  sont deux valeurs linguistiques, situées sur un intervalle de  $[-10,30]$  et  $[-200,200]$  respectivement pour  $e$  et  $\Delta e$ .

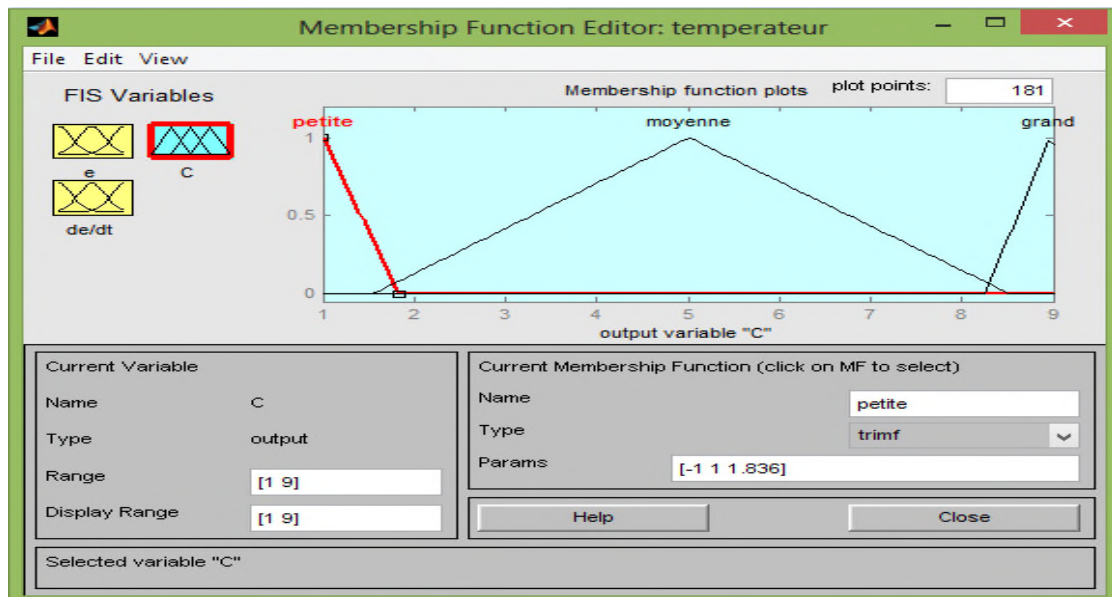


Figure (III-2.b) : Définition des fonctions d'appartenances pour « c »

Les règles sont saisies à l'aide d'un formulaire représenté sur la figure (III-3) :

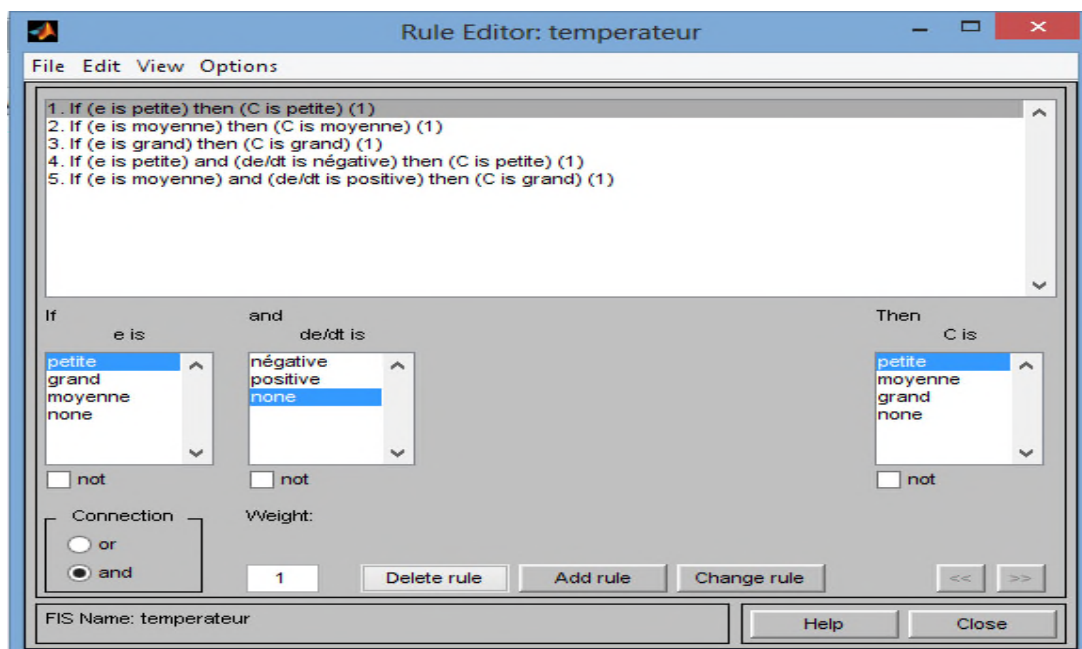
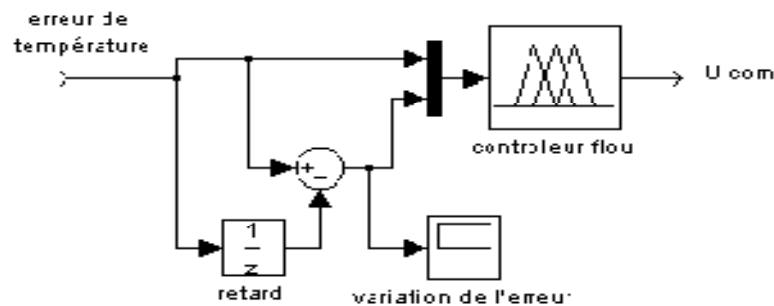


Figure (III-3) : Écran de saisie des règles

### III.3 Système commande, en boucle fermée avec le régulateur flou

L'identification en boucle fermée doit permettre d'obtenir un modèle de procédé décrivant le plus fidèlement possible le comportement du système réel avec un régulateur donné, pour cette raison on s'intéresse au régulateur flou, qui convertit des grandeurs d'entrée en grandeurs de sortie qui agissent ensuite sur le processus ou le système réglé.

### III.4 Vectorisation du contrôleur flou



**Figure (III-4) :** Schéma bloc d'un asservissement de contrôleur

L'opérateur retard «  $\frac{1}{z}$  » est un opérateur échantillonné, sa sortie est mise à jour toutes les 5 secondes. Il permet de mémoriser la valeur de l'erreur à l'instant «  $t-1$  ». Ainsi, le circuit de différence permet d'obtenir la variation de l'erreur entre 2 instants d'échantillonnage.

Le contrôleur sera donc sensible à l'erreur de température et à sa variation.

### III.5 Construction du modèle

Le schéma fonctionnel ci dessous présente la modélisation du système à étudier à partir des éléments de base décrits plus haut.

La **Figure (III.5)** présente le système étudié placé dans une boucle d'asservissement contenant un régulateur flou.

Il a une structure identique à un système à réglage par retour classique (ou réglage par contre réaction d'état).



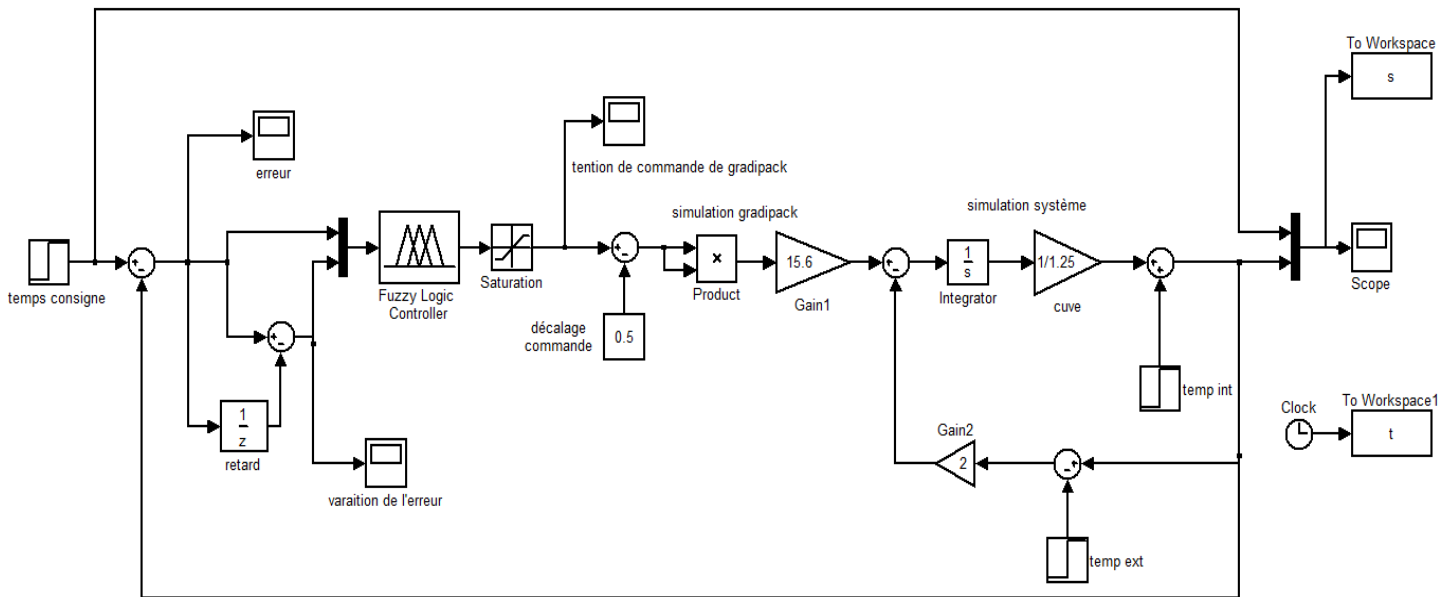


Figure (III-5) : Le système commandé avec le régulateur flou

Résultats de simulation

Une fois le régulateur est chargé dans le bloc fuzzy du simulink La consigne de température est réglée à 30°C alors que la température initiale est de 15°C, on simule le système et on obtient la réponse suivante Figure (III-6).

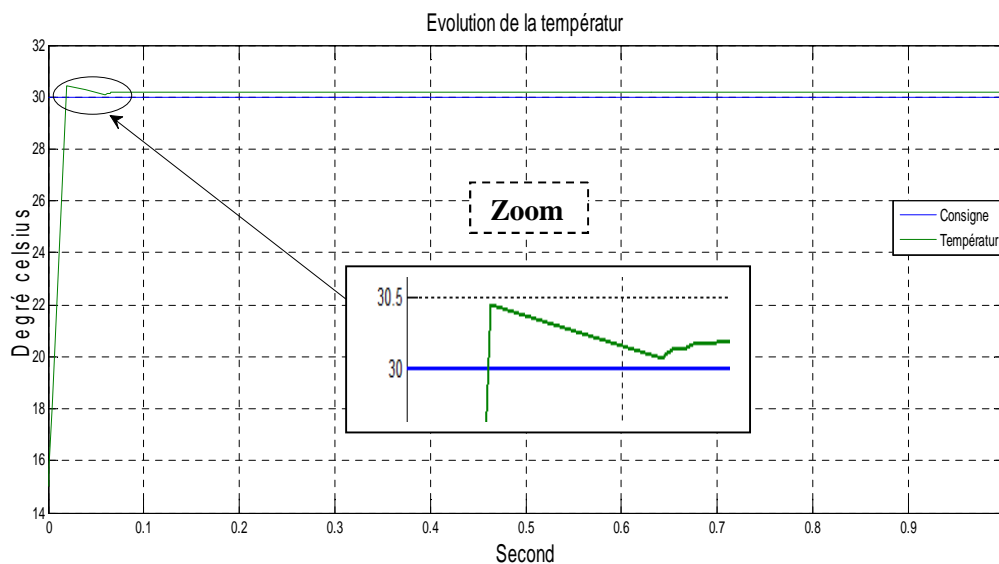


Figure (III-6) : Evolution de la température avec le régulateur flou

On remarque qu'à chaque fois, on intervient sur le gain de la sortie du système, on agit sur la précision.

### Interprétation

La **Figure (III-6)** illustrent les résultats de simulation obtenus, les conditions de simulations étant les même que dans le chapitre précédent, mais cette fois ci en ajoutent le régulateur flou.

Les observations faites montrent qu'il est possible de réaliser avec des réglages adéquats, des contrôleurs flous ayant des comportements similaires.

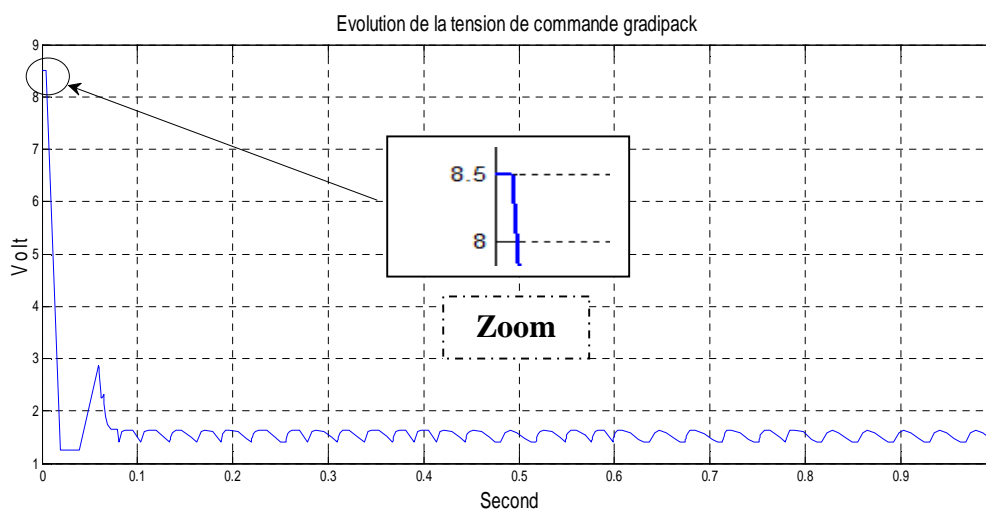
En effet le temps de réponse est faible qui égal à  $0.02$  s, et un temps de montée  $t_m = 0.018$  secondes, la précision =  $0.014$  °C, le dépassement et de  $1.5$  %.

Les résultats obtenus montrent que le **FLC** présente des performances de poursuite très satisfaisantes, il a amélioré la dynamique de température par rapport à celle du commande sans régulateur.

Cela est dû à l'utilisation du régulateur de **Mamdani** à cinq classes. Ce nombre de règles permet d'obtenir des effets non linéaires influant favorablement sur le comportement global du système.

### III.6 La tension de commande Gradipack

La tension efficace appliquée au thermoplongeur passe de 0 à 230V, la tension de commande atteint 8.5V. Après la simulation, les résultats sont illustrés par la **Figure (III-7)**.



**Figure (III-7) :** Evolution de la tension de commande Gradipack.

### III.7 Prise en compte d'une perturbation

La perturbation pourra être simulée par un créneau de puissance négatif limité dans le temps (et décalé par rapport au début de la simulation) traduisant un apport d'eau froide par exemple.

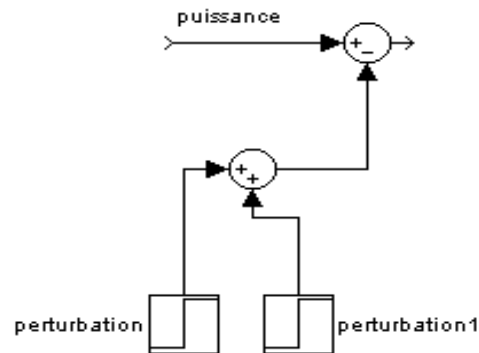


Figure (III-8) : Schéma bloc d'un asservissement de perturbation

Dans cette partie, nous allons ajouter une perturbation au schéma bloc (voir annexe) de la commande de notre système avec le régulateur flou.

Pour les valeurs de la consigne de température et la température initiale, on garde les mêmes valeurs précédentes,  $30^{\circ}\text{C}$  et  $15^{\circ}\text{C}$ . Résultats de simulation et illustré par la **Figure (III-9)**.

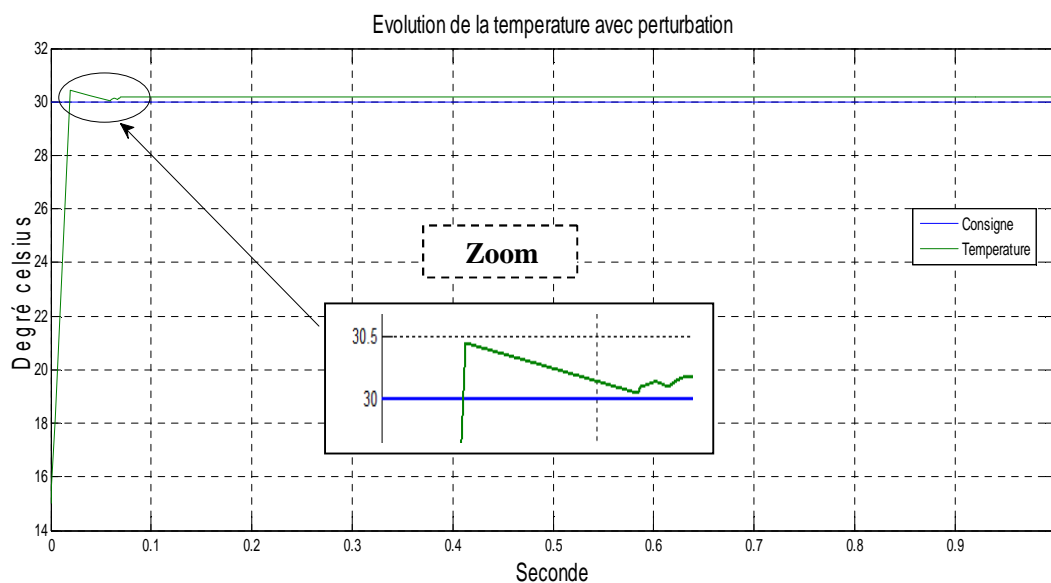


Figure (III-9) : Evolution de la température avec perturbation

**Interprétation**

La **Figure (III-9)** montre l'évolution de la température avec perturbation, et d'après ce dernier en conclut que le régulateur flou permet de contrer l'effet de perturbation.

**Conclusion**

L'introduction de la logique floue au niveau de la commande de la température d'eau dans une cuve a donné de meilleurs résultats, au niveau du temps de réponse, sans dépassement et oscillations très minimales, ce qui rend l'utilisation de cette dernière très prometteuse.

Les résultats de la simulation nous ont montré de bonnes performances même en présence des perturbations grâce à la robustesse du régulateur flou. Ce qui nous a permis de conclure que la logique floue est un moyen intéressant pour la régulation de la température.

Le régulateur Flou présente un net avantage. Un meilleur temps de montée, une réponse rapide avec un petit dépassement, l'effet de perturbations est moins important.

# **Conclusion générale**

Notre étude nous a permis de faire la modélisation et la commande par la logique floue d'un système de température d'eau dans une cuve, dous le but est d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.

L'approche de commande par logique floue a été choisie dans ce mémoire. Les notions de bases ont été présentées au premier chapitre. Les principes de la commande par logique floue ont été introduits tout en orientant notre choix sur un régulateur de type **Mamdani**.

De même, nous avons présenté notre système et on a expliqué le principe de chaque bloc qui possède ses propres conditions de fonctionnement.

Nous avons exploité **Simulink** pour notre simulation sous plusieurs conditions de fonctionnement afin d'exploiter avec rigueur les différents résultats obtenus.

Ainsi on a démontré clairement que le régulateur **RLF** possède de bonnes performances même en présence de perturbations externes. Les avantages de ce type de régulateur sont nombreux il possède un meilleur temps de montée, une réponse rapide avec un petit dépassement, l'effet de perturbations est moins important. Les différents résultats obtenus de simulation montrent la robustesse du régulateur utilisé.

L'expérience a montré que le contrôleur flou qui peut être considéré comme un cas de commande expert reposant sur les jugements de l'être humain représentant un mécanisme souvent incertain.

La logique floue offre un cadre formel pour une synthèse linguistique intégrant des considérations heuristiques.



# **Annexes**

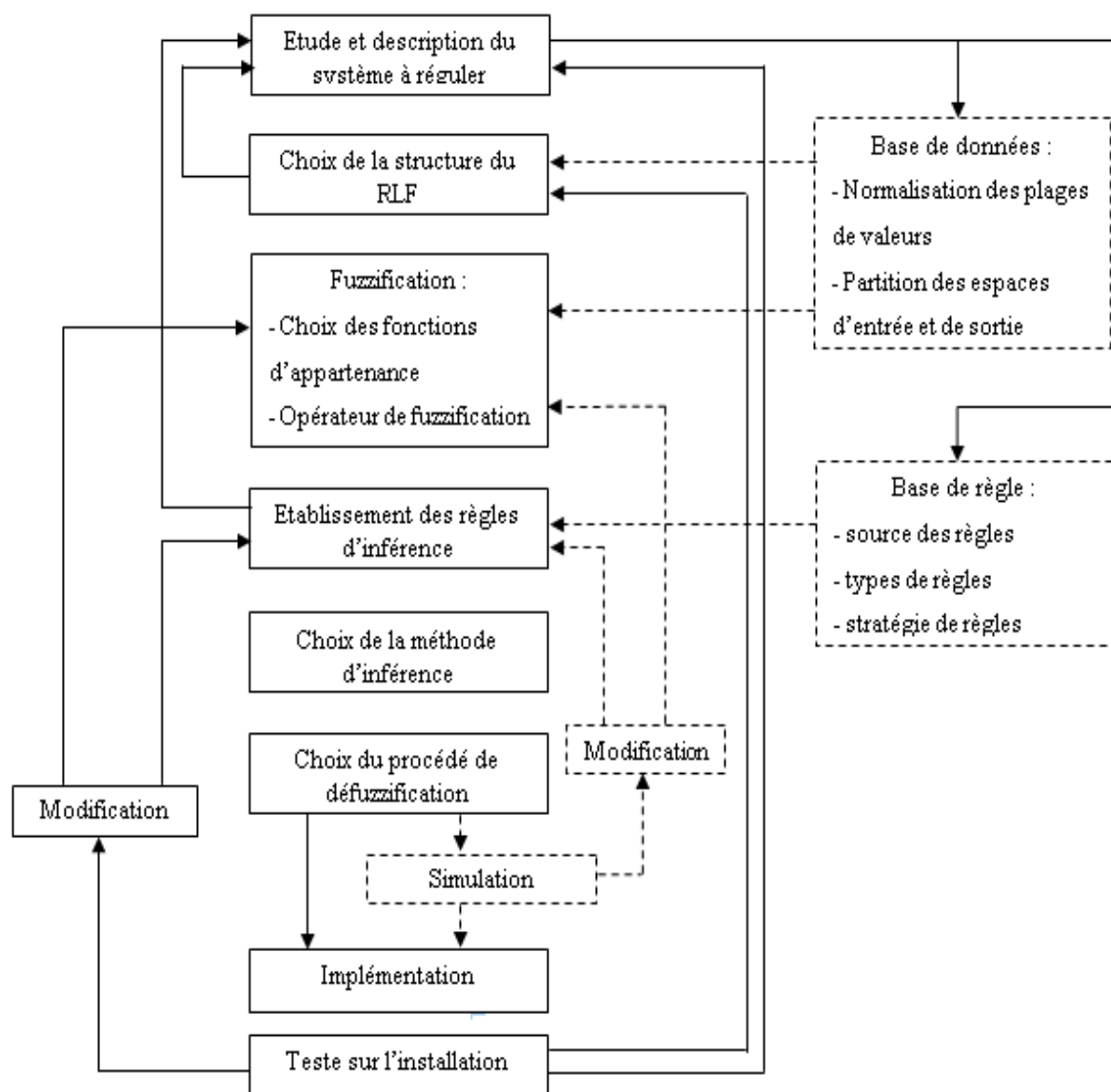
## Annexe 1

Type de régulateur	Vers Série	Vers Parallèle	Vers Mixte
De Série	/	$K_{c,p} = K_{c,s} \frac{T_{i,s} + T_{d,s}}{T_{i,s}}$ $T_{i,p} = \frac{T_{i,s}}{K_{c,s}}$ $T_{d,p} = K_{c,s} T_{d,s}$	$K_{c,m} = K_{c,s} \frac{T_{i,s} + T_{d,s}}{T_{i,s}}$ $T_{i,m} = T_{i,s} + T_{d,s}$ $T_{d,m} = \frac{T_{i,s} T_{d,s}}{T_{i,s} + T_{d,s}}$
De Parallèle	$K_{c,s} = \frac{K_{c,p} + \sqrt{K_{c,p}^2 + 4T_{d,p}/T_{i,p}}}{2}$ $T_{i,s} = K_{c,s} T_{i,p}$ $T_{d,s} = T_{d,p}/K_{c,s}$	/	$K_{c,m} = K_{c,p}$ $T_{i,m} = T_{i,p} K_{c,m}$ $T_{d,m} = \frac{T_{i,p}}{K_{c,p}}$
De Mixte	$K_{c,s} = \frac{K_{c,m} + (1 + \sqrt{1 - 4T_{d,m}/T_{i,m}})}{2}$ $T_{i,s} = K_{c,s} T_{i,m} / K_{c,m}$ $T_{d,s} = K_{c,m} T_{d,p} / K_{c,s}$	$K_{c,p} = K_{c,m}$ $T_{i,p} = T_{i,m} / K_{c,m}$ $T_{d,p} = K_{c,m} T_{d,m}$	/

Tableau (I) : Passage d'une structure à une autre



## Annexes 2



**Figure (I) :** Méthodologie de la synthèse d'une commande floue

## Annexe 3

**Précision**

On souhaite que la sortie du système, soit la plus proche possible de l'entrée. Pour cela, il suffit que l'écart  $\varepsilon_0$  soit le plus faible possible.

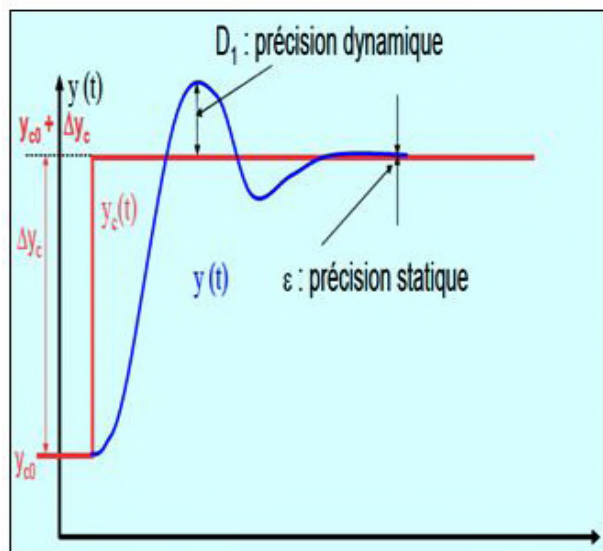


Figure (II) : Réponse à un échelon de consigne

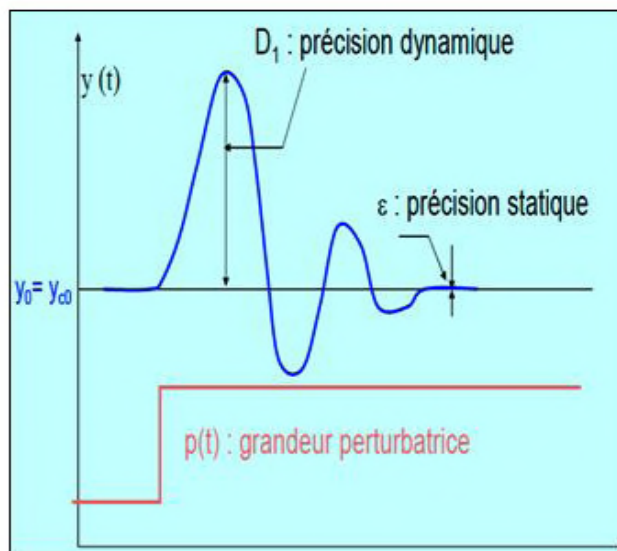


Figure (III) : Réponse à un échelon de perturbation

**La précision dynamique :**

Est caractérisée par le dépassement  $D_1$  lors du régime transitoire de la réponse de la grandeur réglée suite à un échelon de consigne ou de perturbation.

Cette précision est liée directement au degré de stabilité du procédé ; c'est un critère de performance qui peut être défini par les marges de gain et de phase.

**La précision statique :**

Soit  $e(t)$  l'écart entre la consigne  $y_c(t)$  et la mesure de la grandeur réglée  $y(t)$ .

$$\text{On a aussi } E(t) = Y_c(t) - Y(t).$$

Donc l'écart résiduel ou écart statique, en régime permanent est :

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \lim_{s \rightarrow 0} S * E(s)$$

## Rapidité

Le critère standard de rapidité utilisé est le temps de réponse à 5% de la sortie lorsque le système est soumis à une entrée en échelon.

Pour un système bouclé c'est la FTBF(s) qu'il faut considérer l'entrée est la consigne  $y_c(t)$  et la sortie est la mesure  $y(t)$

Grandeur réglée La réponse à une entrée en échelon d'un système dynamique linéaire stable se présente en général sous la forme suivante :

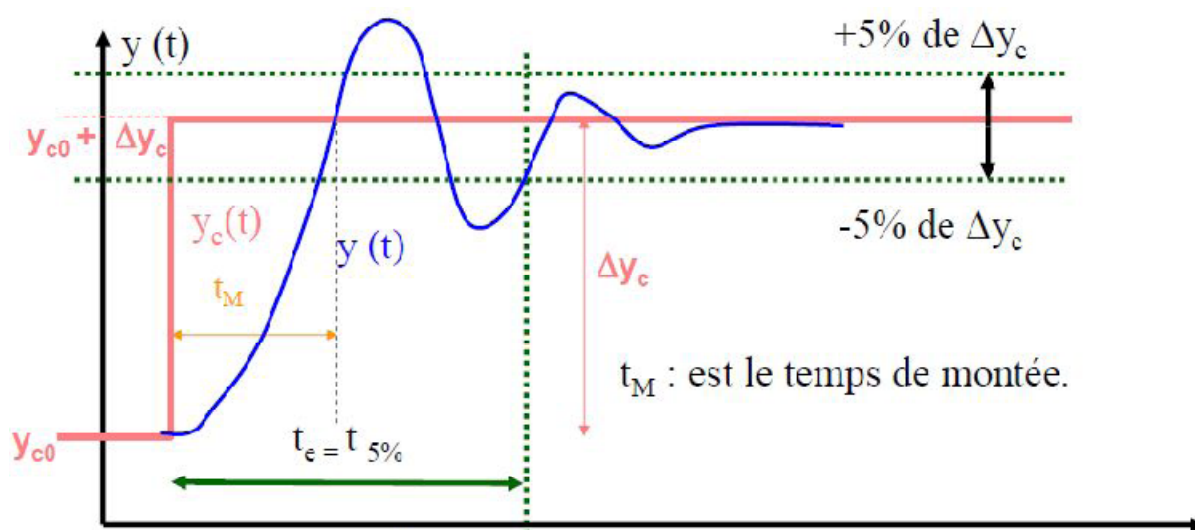


Figure (IV) : Temps de réponse 5% d'un système

## Temps de montée

Le temps de montée d'un système est le temps mis par sa sortie pour passer de 10% de sa valeur finale à 90% de sa valeur finale.

## Dépassement

Un critère important de la stabilité est le dépassement. Ce critère permet de définir la notion de stabilité relative.

Le dépassement est mesuré par le taux de dépassement. On définit le premier dépassement par

$$D_1 \% = \frac{S(t_1) - S_\infty}{S_\infty} = \frac{\Delta_1}{S_\infty}$$

$S_\infty$  : La valeur finale de la sortie.

$S(t_1)$  : La valeur de la sortie à l'instant du premier dépassement.

## Annexe 4

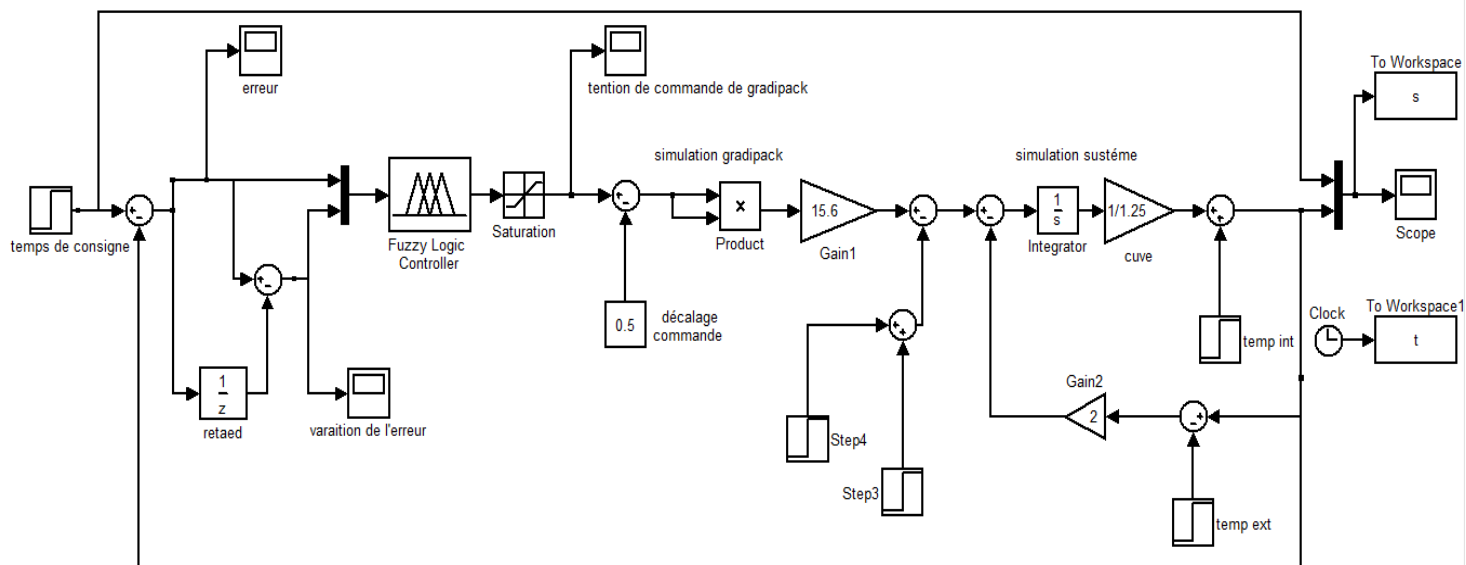


Figure (V) : Le régulateur flou de température avec perturbation



# **Bibliographie**

- [1] **François CHEVRIE** et **François GUELY**. La logique floue cahier technique Schneider n° 191 Edition mars 1998.
- [2] **LAOUFI Mourad, BABA Nawel** et **DJAMAI Hayet**. Planification de la trajectoire d'un robot mobile par la logique floue. Mémoire de fin d'étude, l'université de Bechar promotion 2010.
- [3] **CHAKROUN.S** et **DJEBBAR.S**. Modélisation et application de la logique floue pour la commande de vitesse d'une machine asynchrone triphasée, projet de fin étude, université des sciences et de la technologie Mohamed boudi 1996.
- [4] **BENZENATI .S** et **RABIAI .M**. Commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparée, Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira Bejaia 2013.
- [5] **G.J. Klir** et **B. Yuan**. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America 1995.
- [6] **Y. ELBIA**. Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double alimentation et à Flux Orienté, thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Université de BATNA 2009.
- [7] **DJAABOUB Salim**. Logique floue et SMA, Aide à la décision floue dans les systèmes multi-agents, Mémoire Magister en informatique. Universitaire M'entouré de constantine 2009.
- [8] **LIVERE**. Le magazine Schneider éléctrice de l'enseignement technologique et professionnel juin 2004.
- [9] **N.AKKARI**. Contribution a l'amélioration de la robustesse de la commande d'une Machine asynchrone a double alimentation, Magister en Electrotechnique Université de **BATNA** 2010.
- [10] **SAKIL MOUADH**. Génie électrique et automatique ingénieur diplômé de l'école national d'ingénieurs de **GABES TUNISIE** 2006 et 2007.
- [11] **BOUISFI ACHRAF** et **BELRHALI YASSER**, étude en simulation d'une régulation floue pour serre agricole, université **sidi Mohamed ben Abdallah** école supérieure De Technologie – Fès département génie des procédés, 2009 et 2010.
-

[12] **TOURCHIAT.G** et **TAMERT.S.** Autopilotage vectorielle d'une machine asynchrone par la commande floue, Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira Bejaia 2013.

**Sites web :**

<http://www.siteduzero.com/informatique/tutoriels/introduction-a-la-logiquefloue>

<http://fr.scribd.com/doc/57496281/Memoire-1>

<http://elap.montefiore.ulg.ac.be/fuzzy/>

<http://www.l'électronique-pour-tous.com>

<http://www.abcelectronique.com>

---