

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE**  
**N° : AUT-04**



**DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : AUTOMATIQUE**  
**OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par : MAHMOUDI Yasmine & KIRECHE Manal**

**Intitulé**

**Commande par l'intelligence artificielle d'un**  
**satellite (SATLAN system)**

**Soutenu le 12/ 06/ 2024, devant le jury composé de :**

ZEGHLACHE Samir	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
LOUKAL Keltoum	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
BOUGUERRA abderrahmen	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Co-rapporteur
BAHIEDDINE Miloud	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

**Année universitaire :2023/2024**

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout-puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire, Madame **LOUKAL Keltoum** Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je tiens également à remercier mon professeur **BOUGUERRA Abderrahmen** et tous les enseignants qui nous aidaient pendant la période d'étude à l'université.

Je désire aussi remercier les professeurs de département génie électrique université de **Mohamed Boudiaf-M'sila**, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires et les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin, Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

Pour mes parents qui m'ont soutenu et encadré jusqu'à ce jour.

Pour toute ma famille mes chers frères et sœurs.

Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref passage à  
l'université.

*Yasmine Mahmoudi & Kireche Manal*

# Table des matières

Table des matières .....	I
Liste des figures.....	V
Liste des Tableaux.....	VII
Symboles.....	VIII
Introduction générale.....	1

## *Chapitre 01 : Etat de l'art et modélisation d'un satellite (SATLAN system)*

1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique.....	3
1.3 Définition d'un satellite.....	3
1.4 Types des satellites.....	4
1.4.1 Satellite scientifique.....	4
1.4.2 Satellite d'applications.....	4
1.5 Applications des satellites.....	6
1.6 Architecture d'un satellite.....	6
1.6.1 La plateforme.....	7
1.6.2 Charge utile.....	8
1.7 Vie d'un satellite.....	9
1.8 Les Avantages et inconvénients de satellite.....	9
1.8.1 Les Avantages.....	10
1.8.2 Les Inconvénients.....	10
1.9 Modélisation d'un satellite (SATLAN).....	11
1.9.1 Le satellite.....	11

1.10 Simulation en boucle ouverte du satellite.....	11
1.11 Résultat de simulation de système par le régulateur PID.....	12
1.12 Conclusion.....	14

### ***Chapitre 02 : Commande par la logique floue type-1 d'un satellite (SATLAN system)***

2.1 Introduction.....	15
2.2 Historique.....	15
2.3 Domaines d'application.....	16
2.4 La logique floue type1.....	16
2.4.1 Introduction.....	16
2.4.2 Les concepts de bases.....	17
2.4.2.1 L'ensemble.....	17
2.4.2.2 Univers de discours.....	17
2.4.2.3 Les variables et les valeurs linguistiques.....	17
2.4.2.4 Fonction d'appartenance.....	18
2.4.2.5. Opérateurs de la logique floue.....	19
2.4.2.6 Règles linguistiques.....	19
2.5 Structure d'un régulateur flou type 1.....	20
2.5.1 Fuzzification.....	21
2.5.2 Base de règle.....	21
2.5.3 Mécanisme d'inférence flou.....	22
2.5.4Défuzzification.....	22
2.5.4.1Méthode de la moyenne des maxima(MOM).....	23
2.5.4.2 La méthode des centres de gravité "centroïde"(COG).....	23
2.6 Les Avantages et les inconvénients de la logique floue.....	23
2.7 Application de la commande logique floue type 1 d'un satellite (SATLAN system).....	24

3.8 Résultats de simulation de la commande floue type 1 d'un satellite (SATALN system) ..... 25

3.9 Interprétation les résultats de simulation..... 26

3.10 Conclusion..... 26

***Chapitre 03 : Commande par la logique floue type-2 d'un satellite  
(SATLAN system)***

3.1 Introduction..... 27

3.2 Concept de base..... 27

3.2.1 Les ensembles flous..... 27

3.2.1.1 Définition 1..... 27

3.2.1.2 Définition 2..... 27

3.2.1.3 Définition 3..... 28

3.2.1.4 Définition 4..... 28

3.2.1.5 Définition 5..... 28

3.2.1.6 Définition 6..... 29

3.2.1.7 Définition 7..... 29

3.3 Différents types d'ensembles flous type-2..... 30

3.4 Les fonctions d'appartenance..... 30

3.5 Opération sur les ensembles flous type 2..... 32

3.6 Structure d'un contrôleur flou type 2..... 32

3.6.1 Fuzzification..... 33

3.6.2 .1Base de règles..... 33

3.6.2.2Mécanisme d'inférence..... 33

3.6.3 Réduction de type..... 35

3.6.4 Défuzzification..... 35

3.7 Application de la commande floue type 2 d'un satellite (SATLAN system) ..... 36

## Table des Matières

---

3.8 Résultats de simulation de la commande floue type 2 d'un satellite (SATLAN system)	38
3.8.1 Interprétation des résultats de simulation.....	40
3.9 Étude comparative entre les résultats de simulations des différentes lois de commande développées.....	40
3.10 Conclusion.....	42
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>43</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>44</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>45</b>

## Liste des figures

### Chapitre 01

Figure 1.1 : Schéma de satellite SATLAN.....	4
Figure 1.2 : Les différents types de satellite.....	6
Figure 1.3 : Composition d'un satellite artificiel.....	8
Figure 1.4 : Vie d'un satellite.....	9
Figure 1.5 : Schéma bloc de la boucle ouverte du satellite.....	12
Figure 1.6 : Réponses du système pour un signal de référence échelon.....	12
Figure.1.7 : Les résultats de simulations du système pour un régulateur PID en boucle fermée.....	13

### Chapitre 02

Figure 2.1 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 1.....	20
Figure 2.2 : schéma block de la commande par logique floue type 1 d'un satellite (SATLAN system) .....	24
Figure 3.10 : Fonction d'appartenance de l'erreur.....	25
Figure 3.11 : Fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.....	25
Figure 3.12 : Fonction d'appartenance de la sortie.....	25
Figure 2.3 : Résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée échelon.....	26

### Chapitre 03

Figure 3.1 : Tranche verticale pour $x'=5$ .....	28
Figure 3.2: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle.....	30
Figure 3.3: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 de forme triangulaire (a) Appartenance primaire. (b) Appartenance secondaire.....	31
Figure 3.4 : Fonction d'appartenance triangulaire type 2.....	33
Figure 3.5 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 2.....	34

## Liste des figures

---

Figure 3.6: Fonction d'appartenance à fuzzifier.....	35
Figure 3.7: Deux fonctions d'appartenance à fuzzifier.....	35
Figure 3.8: Empreinte d'incertitude et fonctions d'appartenance supérieures et inférieures.....	36
Figure 3.9: Schéma block de la commande par logique floue type 2 d'un satellite (SATLAN system) .....	37
Figure 3.10: Résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée échelon.....	37
Figure 3.11 : Fonction d'appartenance de l'erreur.....	37
Figure 3.12 : Fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.....	38
Figure 3.13 : Fonction d'appartenance de la sortie.....	38
Figure 3.14: Les résultats de simulation les sorties des commandes (PID, la logique floue type-1, la logique floue type-2) .....	41

## Liste des Tableaux

Tableau 2.1: fonctions d'appartenance de la logique floue type 1.....	18
Tableau 2.2 : Matrice d'inférence ....	20
Tableau.2.3 : Synthèse des différentes méthodes d'inférences.....	22
Tableau 2.4 : Table de règles .....	24
Tableau 3.1: Les fonctions d'appartenance triangulaires, gaussiens et trapézoïdaux de type2.....	33
Tableau 3.3 : Étude comparative entre les commandes développées pour le premier sortie $\theta$ .....	40
Tableau 3.4 : Étude comparative entre les commandes développées pour le deuxième sortie $r$ .....	41

## Symboles

$U_A(x)$  : Fonction d'appartenance d'une variable floue.

**Min**: Minimum.

**Max**: Maximum.

**FLS**: Fuzzy logic systems.

**FS** : Fuzzy systems.

**FAS** : Fonction d'appartenance supérieure.

**FAI** : Fonction d'appartenance inférieure.

**FOU** : Footprint Of Uncertainty.

**FL** : Fuzzy Logic.

$f_u$  : La fonction d'appartenance supérieure.

$f_L$  : La fonction d'appartenance inférieure.

**NG** : Négatif grand.

**EZ** : Environ de zéro.

**PG** : Positif grand.

**PM** : Positif moyen.

**NM** : Négatif moyen.

**PVB** : Positive very big.

**NVB**: Negative very big.

$W_u$  : La valeur maximale d'une plage de forces de déclenchement.

$W_L$  : La valeur minimale d'une plage de forces de déclenchement.

$\ddot{\theta}$  : l'accélération de l'angle  $\theta$ .

## Symboles

---

$\ddot{r}$  : l'accélération de la position radiale  $r$ .

$\dot{\theta}$  : la vitesse angulaire.

$\dot{r}$  : la vitesse.

# Introduction générale

Toutefois, quand on parle de satellites artificiels, on fait référence à tout objet non naturel orbitant autour d'un corps céleste. En général, ces objets ont un but précis, comme une meilleure compréhension de l'univers. Ils ont vu le jour grâce à l'intelligence humaine et servent à collecter des données sur le corps céleste qu'il explore. Les satellites artificiels tournent principalement autour de la Terre. Ils jouent un rôle crucial dans le progrès de la technique humaine et aujourd'hui, ils sont indispensables pour notre existence [1].

Les satellites sont des lunes qui orbitent autour d'une planète sous la forme de leur courbure. Ils sont scientifiquement lancés dans l'espace extra-atmosphérique pour faire le tour de la Terre ou d'un autre corps [2].

Les satellites artificiels sont des outils indispensables qui nous permettent de mieux comprendre et interagir avec notre planète, d'améliorer notre communication et de progresser dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques [2].

L'objectif de notre thème est d'appliquer deux types de commande : une commande PID et une commande par la logique floue sur notre système afin de comparer les résultats et les performances de chacune. Pour garantir la stabilité, l'orientation et le positionnement dans l'espace, il est essentiel d'utiliser des techniques avancées de contrôle pour commander des satellites artificiels, ce qui est une tâche complexe. Deux approches couramment utilisées dans ce domaine, le contrôle par PID et la logique floue pour le pilotage d'un satellite artificiel sont des domaines de recherche essentiels dans l'ingénierie spatiale moderne.

Les satellites artificiels nécessitent une régulation précise et fiable de leur position et orientation pour accomplir diverses missions telles que les télécommunications, l'observation de la Terre et la navigation.

Le contrôle PID est une méthode traditionnelle largement utilisée en raison de sa simplicité et de son efficacité éprouvée. Ce type de contrôle repose sur trois paramètres : proportionnels, intégral et dérivé, qui sont ajustés pour minimiser l'erreur entre la position désirée et la position réelle du satellite. Cependant, le PID peut rencontrer des limitations dans des environnements hautement non linéaires ou avec des perturbations imprévues, typiques des conditions spatiales.

En revanche, la logique floue offre une alternative moderne en utilisant des règles linguistiques basées sur l'expérience humaine pour gérer les incertitudes et les non-linéarités du système, on utilise la logique floue pour résoudre principalement les problèmes ou les données qui ne peuvent pas être

## Introduction générale

---

formulées de manière explicite. Avec ses applications dans le contrôle et la gestion des processus, le flux logique est fréquemment utilisé par automatique. Son objectif est de résoudre les problèmes de contrôle des processus en utilisant une méthodologie différente de l'automatisation traditionnelle, un peu comme un contrôleur (ou correcteur) traditionnel [3].

Contrairement au PID, qui nécessite un modèle mathématique précis, la logique floue peut fonctionner efficacement avec des informations imprécises ou incomplètes. Cela permet une plus grande flexibilité et adaptabilité, ce qui est particulièrement avantageux dans le contexte dynamique et complexe de l'espace [3].

Notre travail est présenté dans un mémoire organisé en trois chapitres :

**Chapitre 1** : Nous avons présenté dans ce chapitre l'état de l'art et la modalisation d'un satellite (SATLAN system), simulation en boucle ouverte et la commande par PID.

**Chapitre 2** : Ce chapitre traite d'une technique d'intelligence artificielle, la logique floue type 1., nous concentrerons sur tous les concepts et définitions nécessaires pour comprendre cette technologie ainsi nous définirons les contrôleurs flous, et nous appliquons ces commandes sur satellite.

**Chapitre 3** : Le dernier chapitre sera consacré à la présentation de floue type 2, étude comparative entre ces commandes et exposée en chapitre trois celle-ci est accomplie sur la base des résultats obtenus par les simulations.

Enfin on terminera cette mémoire par une conclusion générale et les perspectives.

## 1.1 Introduction

Les satellites artificiels ont été utilisés dans de nombreux secteurs applicatifs et civils à la fin des années 1960, suite à la guerre froide. (Militaires, tels que les télécommunications, l'observation de la Terre et la navigation), pour compter environ 2 000 objets en orbite à la fin des années 2010.

Depuis une dizaine d'années, les ruptures technologiques ont accéléré la démocratisation de l'espace et le déploiement de constellations, modifiant l'écosystème existant. Et les modèles économiques traditionnels. Cette accélération de l'occupation de l'espace, consécutive à la multiplication des usages et des services [4].

Dans un contexte de commercialisation accrue de l'orbite, ainsi qu'au renforcement de la militarisation du secteur pose en toile de fond la question de la pérennité de son utilisation. Ce chapitre sera consacré aux satellites, avec un regard historique sur les satellites et leur domaine d'application, ses caractéristiques ainsi que ses avantages et inconvénients.

## 1.2 Historique

Le 4 octobre 1957, pour la première fois, un satellite artificiel (spoutnik 1) fut lancé autour de la terre. Conçu par la Russie (ex-URSS) ce satellite ouvrait l'ère spatiale, alors que l'homme rêvait de voyager dans l'espace depuis très longtemps, il parvenait enfin à mettre au point une fusée (lanceur) suffisamment puissante pour vaincre la pesanteur terrestre. La voie a été entrouverte par l'Allemagne en 1942 par la construction de la première fusée moderne (V2) qui avait permis d'établir les fondements des technologies de propulsion et de guidage. Puis, entre 1945 et 1957, des progrès technologiques avaient été réalisés par le biais des missiles, ce qui permet d'aboutir au lanceur spatial. La Russie (ex-URSS) et les Américains vont s'engager dans le déploiement de satellites militaires pour la reconnaissance photographique (espionnage), la navigation et la détection des différentes menaces, etc. D'autres pays accéderont à l'espace comme la France, le Japon, la Chine, l'Inde... [5].

## 1.3 Définition d'un satellite

Les satellites artificiels sont des objets construits par l'homme, envoyés dans l'espace par un lanceur et orbitant autour d'une planète ou d'un satellite naturel tel que la Lune. La fusée imprime une vitesse au satellite qui lui permet de rester presque indéfiniment dans l'espace pour décrire une orbite autour du corps céleste. Elle peut prendre diverses formes selon la mission du satellite : héliosynchrone, géostationnaire, elliptique, circulaire, et se trouver à des altitudes plus ou moins élevées, classées en orbite basse, moyenne ou haute [6].

### 1.3.1 Le satellite artificiel

Le satellite artificiel est un objet placé par un système de transport spatial (fusée, navette) en orbite autour d'un astre, en particulier de la terre [7].

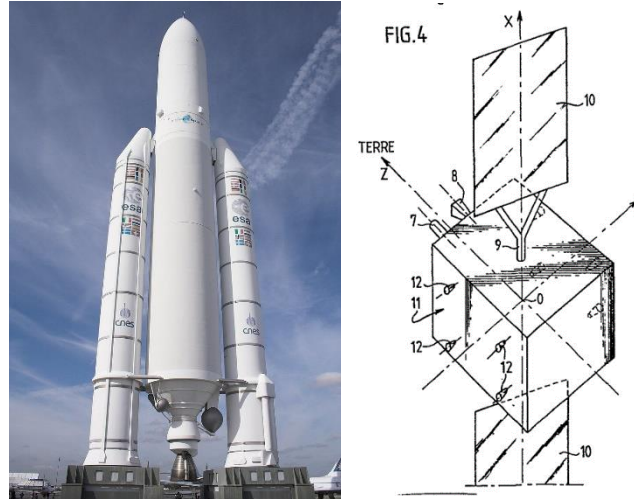


Figure 1.1 : Schéma de satellite SATLAN [7].

## 1.4 Types des satellites

Les satellites sont classés généralement en deux classes :

### 1.4.1 Satellite scientifique

Ils sont consacrés à la recherche exclusive en astronomie (les télescopes sont en orbite avec des champs d'observation plus ou moins larges et surveillent l'ensemble du spectre électromagnétique), en géodésie, géodynamique, etc. C'est généralement un objet unique. Rarement, s'ils sont perdus lors du lancement, ils sont remplacés [8].

### 1.4.2 Satellite d'applications

Ils ont une application commerciale dans les domaines de la météorologie, de l'observation de la Terre (dite télédétection), des télécommunications, de la navigation. Ils génèrent des revenus directs (satellites de communications) ou induits (météorologie, observation de la terre civile et militaire, navigation, etc.). Leur service ne devant pas s'interrompre, ils nécessitent des redondances en orbite et des remplacements par de nouvelles générations. C'est un vrai marché des satellites et de leurs applications. Les applications peuvent être civiles ou militaires. Certains satellites ont une dualité d'application, pouvant avoir plusieurs applications (météorologie et télécommunications, civile et militaire, par exemple, etc.) [8]. On trouve :

- **Satellites de télécommunications**

Les satellites sont utilisés pour transférer des données à partir de la Terre, telles que des communications téléphoniques ou de données, des communications satellitaires et des programmes télévisés [8].

- **Satellites de télédétection**

Ces appareils surveillent la Terre dans des buts scientifiques (mesurant la température de la mer, le manteau neigeux, la sécheresse...), économiques (mesurant les ressources naturelles, l'agriculture...) ou militaires. Le spectre d'observation est large, incluant l'observation par l'optique, le radar, l'infrarouge et l'ultraviolet, ainsi que l'écoute de signaux radioélectriques [9].

- **Satellites de positionnement**

Les satellites sont utilisés pour localiser des objets à la surface de la Terre, dans l'espace (avions, missiles) et dans l'air [8].

- **Satellites militaires**

Ils peuvent être utilisés pour les télécommunications et l'observation de la Terre ou pour l'écoute électronique (satellite espion) [8].

- **Satellites météorologiques**

Il existe deux types de satellites météorologiques : les géostationnaires et les défilements. Les géostationnaires sont stationnaires pour les observateurs terrestres, tandis que les satellites de défilement ont des orbites plus basses et couvrent de nombreuses régions. Ces satellites permettent aux images terrestres et aux stations météorologiques de prédire les phénomènes naturels [7].

- **Satellites de navigation**

Ils permettent de prendre des mesures qui sont difficiles à accomplir sur terre et qui, en les combinant avec les mesures rapportées par d'autres satellites, offrent des informations précieuses sur notre planète. Les satellites de navigation sont utilisés pour identifier les appels de détresse, localiser la position d'un navire avec une marge d'erreur minimale et créer une carte des courants marins [7].

## **1.5 Applications des satellites**

Les satellites artificiels lancés dans l'espace sont utilisés dans divers domaines pour leurs applications. On distingue les satellites scientifiques qui sont destinés à la recherche scientifique et les satellites d'application qui apportent une contribution pratique au fonctionnement de la société dans des domaines comme la météorologie, les télécommunications, la navigation, la gestion des ressources naturelles, la sécurité maritime, la prévention et le suivi des risques naturels. Depuis l'apparition des

satellites à la fin des années 1950, les domaines d'application tendent à se multiplier et à se banaliser en influençant en profondeur la société et en donnant naissance à un nouveau secteur commercial. Malgré tout, quelques puissances spatiales se concentrent sur le développement des satellites [9].



Figure 1.2 : Les différents types de satellite [7].

## 1.6 Architecture d'un satellite

L'architecture du satellite est déterminée par les objectifs de la mission et les contraintes spécifiques liées à son évolution dans l'espace.

Tout satellite possède une charge utile (par exemple un module de communication pour les satellites de télécommunications), constituée par les instruments liés aux objectifs de la mission et une plateforme de service (ou module de service) comportant tout ce qui est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des instruments pendant la durée de vie prévue [10].

### 1.6.1 La plateforme

La plateforme est le pilier principal du vaisseau spatial. C'est là qu'on trouve les systèmes d'alimentation et de propulsion, ainsi que le système de communication et, habituellement, la charge utile (voir ci-dessous). La plateforme inclut aussi le matériel et les logiciels nécessaires pour contrôler le vaisseau spatial, ainsi que les systèmes électroniques ou avioniques [11].

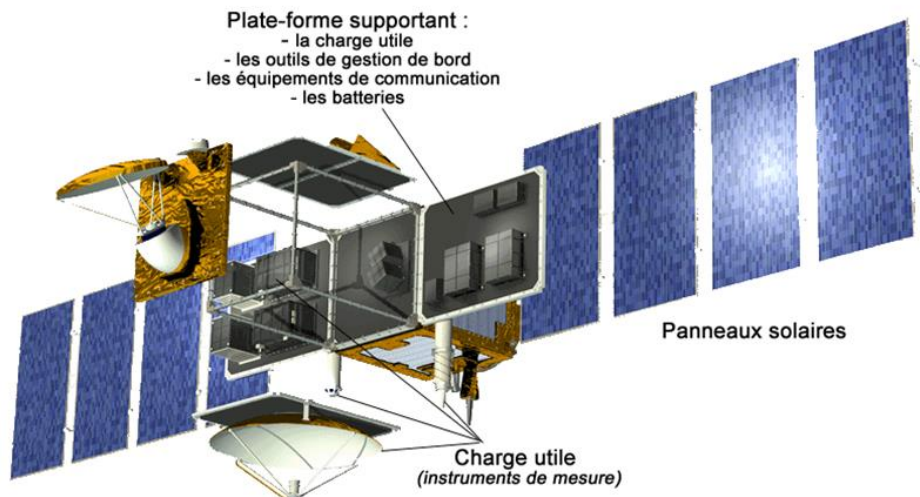
- **Système d'alimentation :** Les satellites dépendent de l'énergie des panneaux solaires, des batteries ou d'une combinaison des deux pour la propulsion. Ils utilisent généralement des hélices chimiques, mais ces dernières années, de plus en plus de satellites électriques utilisent des gaz électrostatiques, électromagnétiques ou ioniques pour la propulsion [11].
- **Guidance Navigation & Control (GNC) :** Le GNC est un domaine d'ingénierie et d'expertise spécifique axé sur le "pilotage" de satellites à l'aide de divers contrôleurs, algorithmes et mécanismes de contrôle. Il gère également les ajustements et corrections du pointeur en cas de perturbations satellitaires, telles que la pression solaire ou atmosphérique [11].
- **Antenne :** Antennes sont indispensables pour les satellites pour la transmission de données, agir des commandes GNC et instructions d'alimentation, et sont plus grandes pour transmise des données en continu vers la Terre [11].
- **Avionique :** Les satellites maintiennent leur survie et leur équilibre énergétique en produisant de l'électricité, et l'avionique la gère pour assurer leur bon fonctionnement. Il contrôle tous les aspects de l'engin spatial, y compris le logiciel de vol principal, qui automatise la plupart des fonctions du satellite telles que le contrôle de position et la capture et le traitement des mesures [11].

La plate-forme est généralement fabriquée par des opérateurs de satellites comme E-Space ou par des fournisseurs comme Boeing ou Airbus, avec une longue histoire de fabrication de grands éléments spatiaux, tels que des Cube Sats ou des satellites plus petits [11].

### 1.6.2 Charge utile

- La charge utile est composée d'équipements ou de composants spécifiques conçus pour des fonctions ou des missions spécifiques, telles que la collecte de données, des expériences scientifiques ou des services de communication, tels que des caméras, des antennes et des transpondeurs [11].
- La charge utile d'un satellite terrestre comprend le matériel et les logiciels pour les caméras, les connexions Internet et les antennes. Les satellites militaires peuvent inclure des composants pour la surveillance, la reconnaissance et le ciblage, tandis que les télescopes comme Hubble et James Webb disposent d'équipements d'observation [11].

- Les charges utiles d'autres satellites scientifiques pourraient inclure des éléments tels que des imageurs multi spectraux, des capteurs infrarouges ou UV et d'autres qui aident à créer des cartes détaillées de la surface de la Terre - ou à pointer vers l'espace pour mieux comprendre le système solaire et l'univers [11].
- Une autre catégorie de satellites bien connue sont les systèmes de positionnement global (GPS), dont les charges utiles incluent des émetteurs et des récepteurs radio qui leur permettent de communiquer avec des stations terrestres. Ces signaux sont utilisés pour localiser le récepteur GPS, comme votre smartphone, à la surface de la Terre [11].
- Les fournisseurs de télévision utilisent également des satellites bien connus pour diffuser leurs émissions à l'extérieur de votre maison via une antenne parabolique. Souvent, ces appareils spatiaux sont de taille importante et puissante et en orbite terrestre élevée, tout comme les satellites à large bande. La charge utile est un peu plus simple car ils ne transmettent que des signaux vers le bas plutôt que dans les deux sens comme le ferait un satellite internet [11].



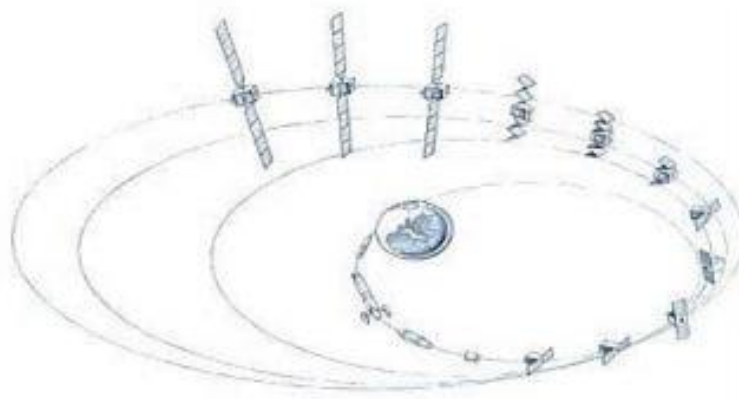
**Figure 1.3 :** Composition d'un satellite artificiel [12].

## 1.7 Vie d'un satellite

La conception, la mission et l'environnement spatial d'un satellite détermine sa durée de vie. La durée de vie d'un satellite est généralement d'environ 5 à 15 ans.

Cependant, grâce à leurs performances et à la maintenance régulière effectuée par les équipes au sol, certains satellites peuvent fonctionner pendant plus longtemps, voire dépasser leur durée de vie initialement prévue. Il est crucial de souligner que certains facteurs peuvent considérablement réduire la durée de vie d'un satellite. Par exemple, l'exposition aux radiations intenses dans l'espace peut causer des dommages aux composants électroniques et avoir un impact sur la performance du satellite.

De plus, l'épuisement des réserves d'énergie comme les batteries peut également réduire la durée de vie d'un satellite. Le satellite peut ne plus fonctionner correctement une fois ces réserves épuisées. En résumé, la durée de vie d'un satellite varie généralement de 5 à 15 ans et dépend de nombreux facteurs. Cependant, au-delà de cette période, certains satellites peuvent continuer à fonctionner, tandis que d'autres peuvent rencontrer des problèmes précoces qui réduisent considérablement leur durée de vie [13].



**Figure 1.4 :** Vie d'un satellite [13].

## 1.8 Les Avantages et inconvénients de satellite

Les satellites sont devenus indispensables dans notre société moderne, offrant de nombreux avantages ainsi que quelques inconvénients. Voici un aperçu des deux côtés :

### 1.8.1 Les Avantages

- Communication mondiale instantanée : Les satellites permettent la transmission rapide de données, de voix et d'images entre différentes régions du monde. Ils favorisent le développement des télécommunications et des réseaux Internet à l'échelle mondiale [13].
- Observation de la Terre : Les satellites d'observation fournissent des images et des données essentielles pour l'étude des phénomènes météorologiques, du changement climatique, de la géographie, de l'agriculture et de la cartographie. Ces informations sont cruciales pour la prise de décisions en matière d'environnement et de développement durable [13].
- Navigation : Les systèmes de positionnement par satellite, comme le GPS (Global Positioning System), permettent une localisation précise et une navigation facilitée. Cela a un impact majeur dans les domaines du transport, de la logistique, de l'aviation, de la navigation maritime et de l'exploration [13].
- Recherche spatiale : Les satellites sont indispensables pour l'exploration de l'espace et la recherche scientifique. Ils collectent des données sur les planètes, les étoiles, les galaxies et l'origine de l'univers. Ils contribuent également à l'étude de l'astronomie et de l'astrophysique [13].
- Sécurité et défense : Les satellites de reconnaissance offrent des capacités de surveillance et de collecte de renseignements essentielles pour la sécurité nationale et internationale. Ils détectent les menaces potentielles, surveillent les mouvements militaires et évaluent les catastrophes naturelles [13].

### 1.8.2 Les Inconvénients

- Coûts élevés : La conception, le lancement et la maintenance des satellites sont coûteux.
- Difficulté d'entretien : Les satellites en orbite nécessitent une maintenance régulière, ce qui peut être complexe.
- Fiabilité variable : Certains satellites peuvent rencontrer des problèmes techniques ou

dysfonctionner.

- Latence : Les signaux doivent parcourir de longues distances entre la Terre et les satellites, entraînant une latence dans les communications [13].

## 1.9 Modélisation d'un satellite (SATLAN)

### 1.9.1 Le satellite

On considère les équations linéarisées d'un satellite au voisinage d'une orbite circulaire parcourue à vitesse  $\omega$  constante :

$$\ddot{r} = 3\omega^2 r + 2\omega\dot{\theta} + u_r \quad (1.1)$$

$$\ddot{\theta} = -2\omega\dot{r} + u_\theta \quad (1.2)$$

Le satellite est commandé par deux moteurs. Le premier fournit une force radiale  $u_r$  et le second fournit une force tangentielle  $u_\theta$ .

Les sorties mesurées  $y_{1,2}$  sont la position radiale  $r$  et l'angle  $\theta$ .

Nous pouvons écrire le modèle d'état simplifié suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = 3\omega^2 x_1 + 2\omega x_4 + u_r \\ \dot{x}_4 = -2\omega x_3 + u_\theta \end{cases} \quad \text{Avec : } y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Où  $x_1 = r$ ,  $x_2 = \theta$ ,  $x_3 = \dot{r}$  et  $x_4 = \dot{\theta}$

### 1.10 Simulation en boucle ouverte du satellite

En prennent les références suivantes :  $r_{ref}=5$  m,  $\theta_{ref}=1$  rad,

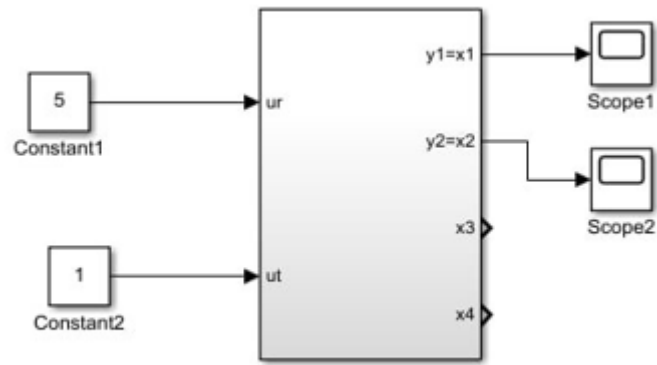


Figure 1.5 : Schéma bloc de la boucle ouverte du satellite.

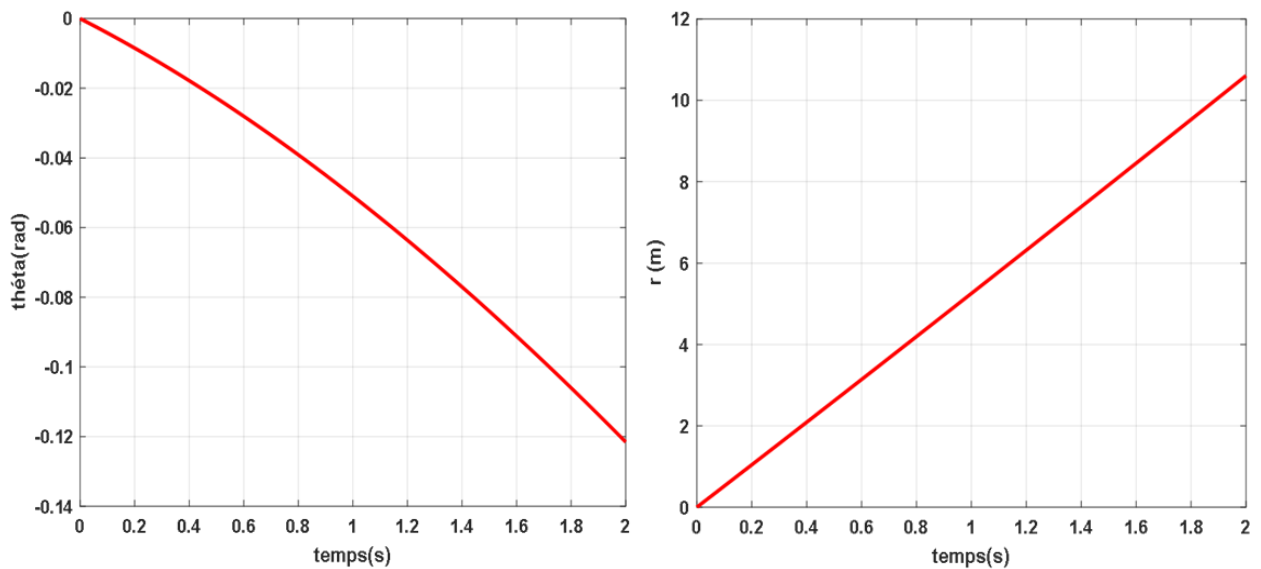


Figure 1.6 : Réponses du système pour un signal de référence échelon.

### 1.11 Résultat de simulation de système par le régulateur PID

Les régulateurs PID est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances mois c'est une méthode classique utilise pour la commande d'un satellite (Figure 1.7).

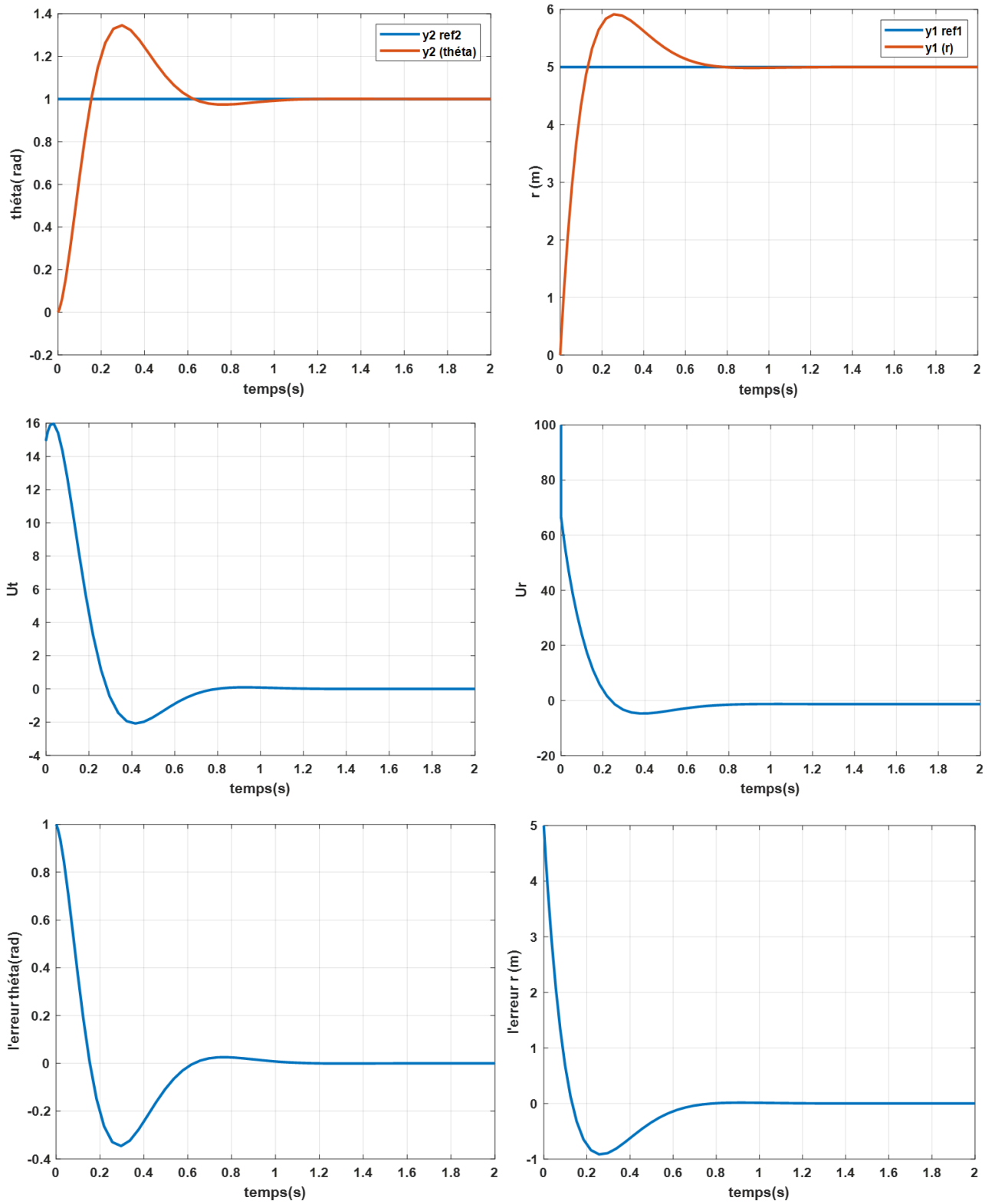


Figure.1.7 : Les résultats de simulations du système pour un régulateur PID en boucle fermée.

D'après le résultat de simulation nous avons remarqué que les erreurs sont diminuées, mais le problème dans le dépassement est très grand, c'est les aspects négatifs du régulateur PID.

## 1.12 Conclusion

En conclusion, les satellites jouent un rôle crucial dans notre société moderne, apportant des avantages significatifs en termes de communication, d'observation de la terre, de navigation, de recherche spatiale et de sécurité. Leur durée de vie prévue est généralement d'environ 5 à 15 ans, mais certains peuvent fonctionner plus longtemps grâce à leur performance et à la maintenance régulière. Dans ce chapitre, nous avons vu la modalisation d'un satellite. Ensuite, nous avons vu la simulation de ce système en boucle ouvert et la commande par PID. Le chapitre suivant a donné une idée générale sur la commande par la logique floue type1 et ses principes de fonctionnement bien détaillés.

## **2.1 Introduction**

La logique classique joue un rôle immense dans différents domaines, sa structure ne peut exprimer que des faits avec "vrai" ou "faux" qui limite son champ d'action dans des techniques et des applications comme l'intelligence Artificielle, la prise de décision des données incertaines, etc., qui veulent imiter le raisonnement et l'esprit humain, c'est-à-dire des techniques qui s'appuient sur l'incertitude pour leur bon fonctionnement. La logique floue est justement conçue pour régler ce problème, pour permettre la caractérisation des éléments de façon "graduelle". Notre perception du monde réel est imprégnée de concepts qui n'ont pas de limites clairement définies, par exemple, beaucoup, grands, beaucoup plus grands que les jeunes, etc. ne sont vrais que dans une certaine mesure et ils sont faux à un certain degré. Ces concepts peuvent être appelés concepts flous ou vagues, un cerveau humain travaille avec eux, tandis que les ordinateurs ne peuvent pas le faire [14].

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition de la logique floue type1 en plus de son historique et leurs applications d'un satellite avec des détails du système plus précisément.

## **2.2 Historique**

- En 1965, Lotfi A. Zadeh a été un professeur d'électronique à l'Université de Californie. Berkeley publie "Fuzzy Sets", qui présente la théorie des ensembles flous par extension. De la logique floue. Zadeh a remarqué que la logique classique a des limites. Elle ne peut pas. Représenter des idées artificielles ou vagues, d'où il a inventé la logique floue pour Permettre aux ordinateurs d'être semblables au processus de raisonnement humain.
- La première application de la logique floue a été effectuée par Mamdani en 1975 à Londres qui applique la théorie inventée par Zadeh sur la conduite d'un moteur à vapeur.
- Différentes utilisations ont été observées en Europe, pour des systèmes parfois extrêmement complexes, comme la régulation des fours de cimenterie effectuée par la société F. L. SMIDT-FULLER.
- Seiji Yasunobu et Suji Miyamoto d'Hitachi, en 1985, ont effectué des simulations. Il a démontré les systèmes de contrôle brumeux du chemin de fer de Sendai, utilisé des

systèmes de contrôle flous lors de l'ouverture de la ligne en 1987 et augmenté les vitesses d'accélération et de freinage.

- En 1987, au cours d'une réunion internationale de chercheurs flous à Tokyo, Takeshi Yamakawa a démontré l'utilisation du contrôle flou, en utilisant un ensemble de puces logiques floues dédiées, dans une expérience de "pendule inversé". Qui a été un problème de contrôle classique. Aussi, le métro de Sendai.
- Grâce au chercheur japonais M. Suzuki, il est possible d'immerger une logique floue, en particulier au Japon. En 1990, l'utilisation de cette technique a été généralisée. [15]

### **2.3 Domaines d'application**

La logique floue est présente presque dans tous les domaines, on cite quelques domaines d'applications de logique floue [15] :

- Robotique
- Systèmes experts
- Reconnaissance des formes
- Classification
- Traitement d'images
- Recherche documentaire
- Langage de programmation
- Commande de processus
- L'intelligence artificielle.

### **2.4 La logique floue type1**

#### **2.4.1 Introduction**

L'une des méthodes les plus appréciées de manipulation de l'information linguistique est d'utiliser le FLS. (Fuzzy logic systems) basé sur les règles Si-Alors, une méthode qui peut être facilement utilisé pour développer Les modèles et le contrôle des algorithmes sont bien éloignés de la perception humaine et de la pensée. Il existe également des solutions de rechange à l'utilisation de systèmes fondés sur des règles impliquant des. Approches arithmétiques basées sur le principe d'extension. Pour formuler les énoncés logiques requis, ce principe réorganise les opérations algébriques communes, comme l'addition. La multiplication, parmi d'autres en ce qui concerne les ensembles flous. Il peut être compliqué de définir les règles Si-Alors à l'aide d'opérations algébriques compactes. Cependant, cette approche est particulièrement utile dans les situations où le problème A une haute dimensionnalité, c'est-à-dire que le nombre de règles

existantes utilisées pour décrire le système est si élevé. Un processus informatiquement inefficace est aussi élevé qu'il peut. Un système de logique floue basé sur les FS (Fuzzy systems) de type 1 est constitué de trois éléments principaux : Fuzzification, Inférence floue selon une base de règle, Défuzzification [14]

### 2.4.2 Les concepts de bases

#### 2.4.2.1 L'ensemble

Un ensemble, noté  $A$ , est une collection d'éléments ou d'objets qui partagent une ou plusieurs propriétés communes. Il peut être défini en listant explicitement tous ses éléments  $X \in A$ . Une autre manière de définir un ensemble est de spécifier une ou plusieurs conditions que doivent satisfaire les éléments  $X \in A$ . Dans ce cas,  $A$  peut être défini comme suit [16] :

$$A = \{x | x \text{ satisfait quelques conditions}\}$$

On peut donc définir une fonction d'appartenance zéro/un (fonction caractéristique) pour  $A$ , notée  $\mu_A(x)$ , telle que :

$$A \Rightarrow \mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

#### 2.4.2.2 Univers de discours

La variable floue peut être prise en compte par l'ensemble des valeurs réelles (l'intervalle numérique). Pour identifier l'univers de discours, on utilise généralement des lettres majuscules comme « U, W, ... ». Un processus de projection sera appliqué aux valeurs linguistiques, les transformant en sous-ensembles correspondants dans l'univers de discours [17] :

#### 3.4.2.3 Les variables et les valeurs linguistiques

La logique floue utilise des variables floues, dénommées variables linguistiques, dont les valeurs appartiennent à l'univers de discours U. Dans le contexte des systèmes flous, les variables linguistiques représentent les états du système à réguler et les paramètres de réglage des contrôleurs flous. Chaque valeur représente un ensemble flou dans l'univers du discours. En général, une variable linguistique est caractérisée par [17] :

- Un nom de la variable linguistique.
- Un ensemble des valeurs linguistique qui peut prendre la variable linguistique.
- L'univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numérique sur lesquelles est défini.

### 2.4.2.4 Fonction d'appartenance

Il s'agit de mettre en relation le degré de vérité de la variable floue avec la grandeur d'entrée correspondante, on peut identifier les sous-ensembles flous par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  définie sur  $[0,1]$ . Ce tableau présente les fonctions d'appartenance les plus couramment utilisées dans les systèmes flous [17] :

**Tableau 2.1:** fonctions d'appartenance de la logique floue type 1. [21]

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{d-x}{d-c} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\mu(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$	
Fonction singleton	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$	

Les formes des fonctions d'appartenance sont choisies de manière arbitraire. Des études comparatives ont démontré que les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée avec les différentes formes de fonctions d'appartenance. En commande floue, la forme triangulaire est la plus souvent utilisée. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartit autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le nombre sélectionné dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent se présenter de manière symétrique, non symétrique et équidistante, ou non équidistante [17].

### 2.4.2.5. Opérateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, on identifie l'intersection ( $\cap$ ) et l'union ( $\cup$ ) des ensembles flous et le complémentaire ( $\bar{\phantom{x}}$ ) d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs 'et', 'ou' et 'non'. De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies :

- **L'intersection** :  $x \in A \cap B \Leftrightarrow x \in \mu_{A \cap B} \mid \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ .
- **L'union** :  $x \in A \cup B \Leftrightarrow x \in \mu_{A \cup B} \mid \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ .
- **Le complément(négation)** :  $\forall x \in X, \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ . [18]

### 2.4.2.6 Règles linguistiques

Dans cette étape on a fait entrer les règles floues qui relié les sous-ensembles d'entrées et sortie. Cette étape est destinée à déterminer les relations entre l'ensemble d'entrée et la sortie. Les règles d'inférence s'écrivent de trois manières différentes :

#### • La forme linguistique :

Si (x est positif) et (y est zéro) alors (z est positive).

#### • La forme symbolique :

Est une simplification de la forme linguistique ; aux cinq ensembles flous de la variable de sortie correspondent cinq déductions floues [19] :

**Si** (x1 NG et x2 EZ) **Alors** xr PG **ou**

**Si** (x1 NG et x2 PM) **Alors** xr PM **ou**

**Si** (x1 NM et x2 EZ) **Alors** xr PM **ou**

**Si** (x1 NM et x2 PM) **Alors** xr EZ **ou**

**Si** (x1 NM et x2 PG) **Alors** xr NM **ou**

.....

**Si** (x1 PG et x2 EZ) **Alors** xr NG.

• **La matrice d'inférence** : qui est une autre simplification de la forme linguistique en utilisant une représentation graphique. La forme symbolique écrite précédemment se traduit par [19] :

**Tableau 2.2** : Matrice d'inférence [19].

X1 \ X2	NG	NM	EZ	PM	PG
NG			PG	PM	
NM			PM	EZ	NM
EZ	PG	PM	EZ	NM	NG
PM	PM	EZ	NM		
PG		NM	NG		

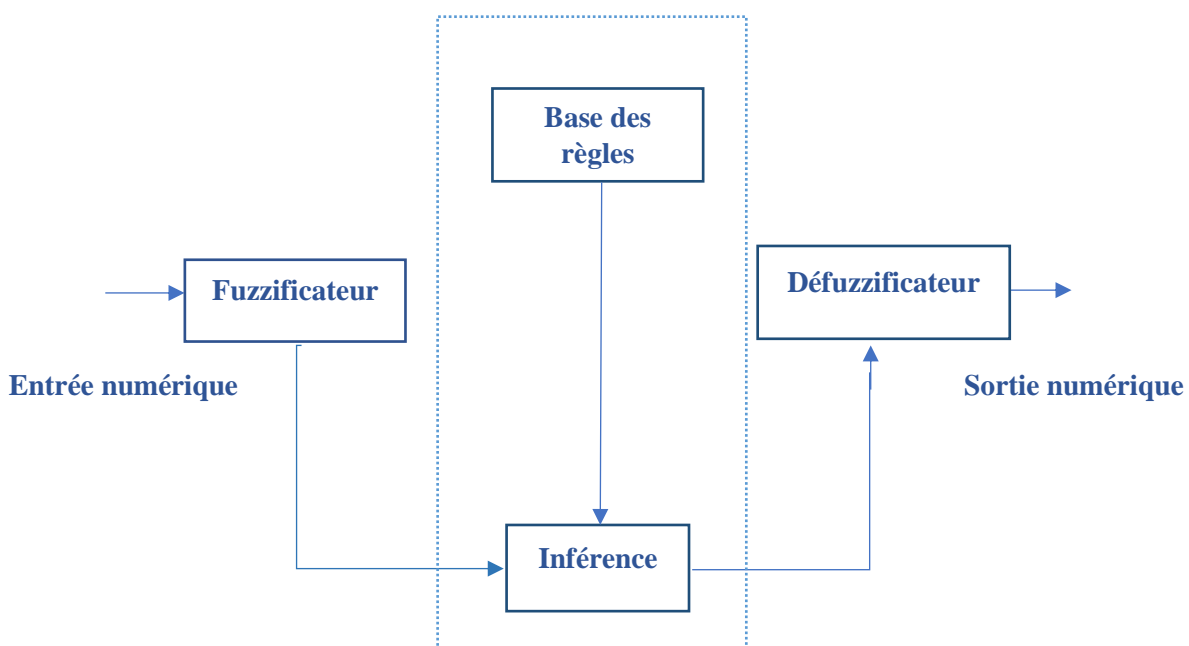
En générale, le nombre de règle est inférieur à  $r_{max}$  et le tableau n'est pas forcément complet.

### 2.5 Structure d'un régulateur flou type 1

La logique floue est constituée de trois éléments principaux :

1. La fuzzification des entrées et sorties.
2. L'inférence floue selon une base de règle.
3. La défuzzification des sorties.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :



**Figure 2.1** Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 1 [17].

### 2.5.1 Fuzzification

La fuzzification consiste à convertir les valeurs numériques des entrées/sorties en ensembles flous. Ainsi, ils sont représentés en variables linguistiques avec une adhésion appelée sous-ensemble, qui correspond à chaque point d'entrée, appelé l'univers du discours. Pour une fonction d'adhésion, on donne généralement l'estimation en degré plutôt qu'en valeur. Selon la logique booléenne, si la réponse est soit 0, soit 1, le degré de fonction d'adhésion prend différentes valeurs, allant de 0 à 1 [19].

Deux méthodes de fuzzification sont disponibles à cet effet :

- Définition des classes d'appartenances de toutes les variables d'entrée.
- Passage de la grandeur physique (température, pression, âge...) à une variable linguistique.

Choix de l'opérateur de fuzzification :

- L'opérateur de fuzzification associe à une mesure de la variable  $X_0$  une fonction d'appartenance  $\mu_{X_0}(x)$ .
- Si la mesure de  $X_0$  est exacte, la fonction d'appartenance utilisée est le **singleton**.
- Si la mesure est incertaine, la fonction d'appartenance généralement utilisée est de forme **triangulaire** ou **trapézoïdale**.

### 2.5.2 Base de règle

Elle possède toutes les connaissances concernant le domaine d'application et les objectifs de commande prévus. Elle est constituée de [19] :

**a)** Une base de données qui fournit les définitions nécessaires à l'utilisation des règles floues.

Voici comment cela se résume :

- Une normalisation des univers de discours.
- Un choix des fonctions d'appartenances.

**b)** Une base de règles floues caractérisant la stratégie de la commande au moyen d'un ensemble de citations conditionnelles. Elle se résume en :

- Choix de variables d'entrées.
- Source de règles floues de contrôle.

### 2.5.3 Mécanisme d'inférence flou

Méthodes d'inférence permettant d'effectuer divers opérateurs ET, OU, ALORS, ... intervenant dans les règles d'inférences et s'appliquant aux fonctions d'appartenances [19].

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Méthode d'inférence Max - Min de MAMDANI ;
- Méthode d'inférence Max - Prod de LARSEN ;
- Méthode d'inférence Somme - Prod de ZADAH.

Dans le but d'éclairer le principe de chaque méthode, on propose un tableau récapitulatif basé sur la règle suivante : **Si** condition **Alors** conclusion.

**Tableau.2.3** : Synthèse des différentes méthodes d'inférences [19].

Méthodes	Au niveau de la condition	Au niveau de la conclusion	Entre deux règles
<b>Méthode Max-Min</b>	<b>ET</b> : est réalisé par la formation du Min. <b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max .	<b>ALORS</b> : est réalisé par la formation du Min .	<b>OU</b> : est réalisé par la formation du Max .
<b>Méthode Max-Prod</b>	<b>ET</b> : est réalisé par La formation du Min. <b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max .	<b>ALORS</b> :est réalisé par le produit .	<b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max .
<b>Méthode Somme-Prod</b>	<b>ET</b> : est réalisé par le produit <b>Ou</b> : est réalisé par la somme.	<b>ALORS</b> : est réalisé par le produit .	<b>OU</b> :est réalisé par la somme .

### 2.5.4 Défuzzification

La défuzzification est la dernière étape de la logique floue, elle a pour convertir la courbe d'activation finale obtenue lors de l'étape d'agrégation en une valeur réelle.

Il existe deux méthodes pour déterminer la valeur retenue de la variable à prédire :

- La méthode de la moyenne des maxima(**MOM**) : correspond à la moyenne des valeurs de sortie les plus vraisemblables.

- La méthode des centres de gravité "centroïde" (COG) : abscisse du centre de gravité de la surface de la courbe de résultats [19].

### 2.5.4.1. Méthode de la moyenne des maxima(MOM)

Dans le cas où plusieurs ensembles auraient la même hauteur maximale, on utilise cette méthode pour calculer leur moyenne. On prend la moyenne des abscisses du maximum.

### 3.5.4.2. La méthode des centres de gravité "centroïde"(COG)

La sortie correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante [19].

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} X_{ri} \mu(X_{ri})}{\sum_{i=1}^{n_i} \mu(X_{ri})} \quad (2.2)$$

Cette méthode est la plus onéreuse en termes de temps de calcul, mais elle est la plus utilisée. Elle est divisée en deux parties :

- On prend l'union des sous-ensembles flous de sortie et on en tire le centroïde globale (calcul très lourd)
- Le centroïde de chaque sous-ensemble est calculé séparément, puis la moyenne de tous ces centroïdes est obtenue

## 2.6 Les Avantages et les inconvénients de la logique floue

Il est évident que le réglage par la logique floue comporte à la fois des avantages et des inconvénients.

- Malgré la complexité des systèmes, la théorie s'y applique aisément grâce à sa simplicité
- Robustesse de la commande floue vis-à-vis des incertitudes.
- Possibilités de commander auto-adaptative aux variations du procédé.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe.
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire) [20]

D'un autre côté, il y a plusieurs inconvénients à prendre en compte :

- Le processus de réglage repose essentiellement sur une approche empirique.
- L'obtention de bonnes performances requiert une expertise avérée.
- Il n'y a pas de directives précises pour concevoir un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification). [20]

3.7 Application de la commande logique floue type 1 d'un satellite (SATLAN system)

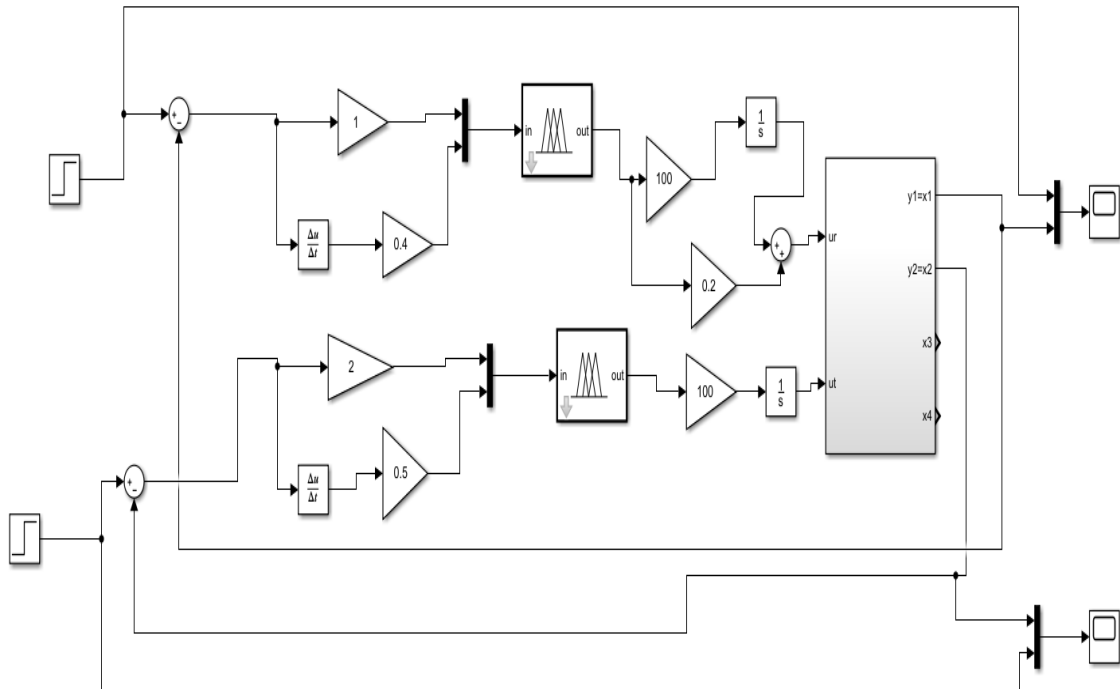


Figure 2.2 : schéma block de la commande par logique floue type 1 d'un satellite (SATLAN system).

Tableau 2. 4 : Table de règles

		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
de	NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

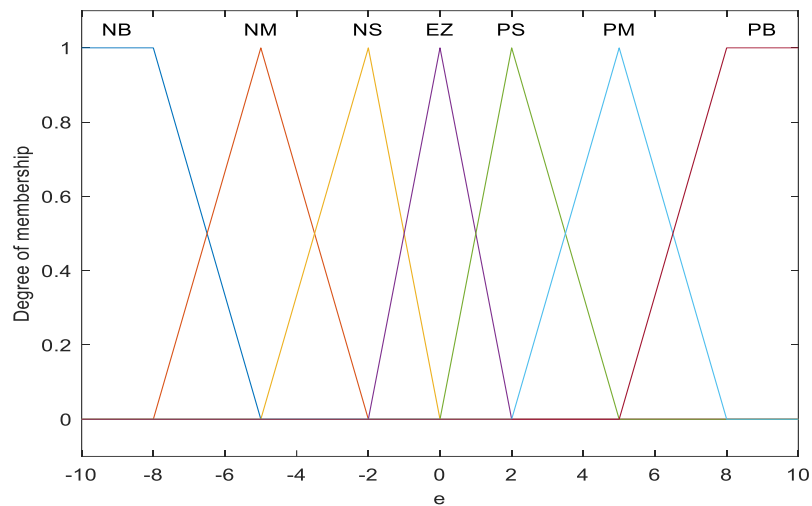


Figure 2.3 : fonction d'appartenance de l'erreur.

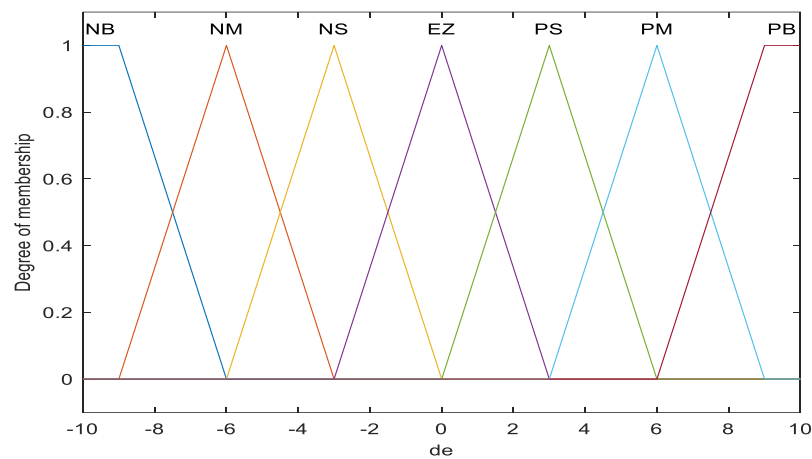


Figure 2.4 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

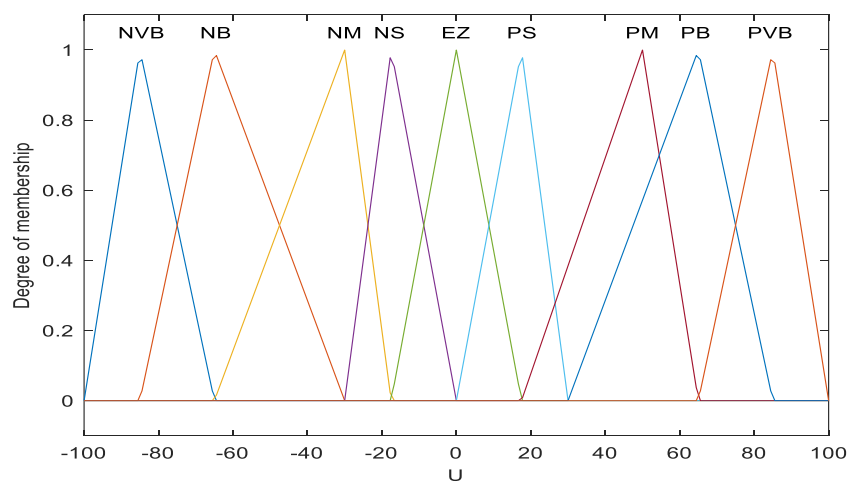


Figure 2.5 : fonction d'appartenance de la sortie.

### 3.8 Résultats de simulation de la commande floue type 1 d'un satellite (SATLAN system)

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la figure 2.6 :

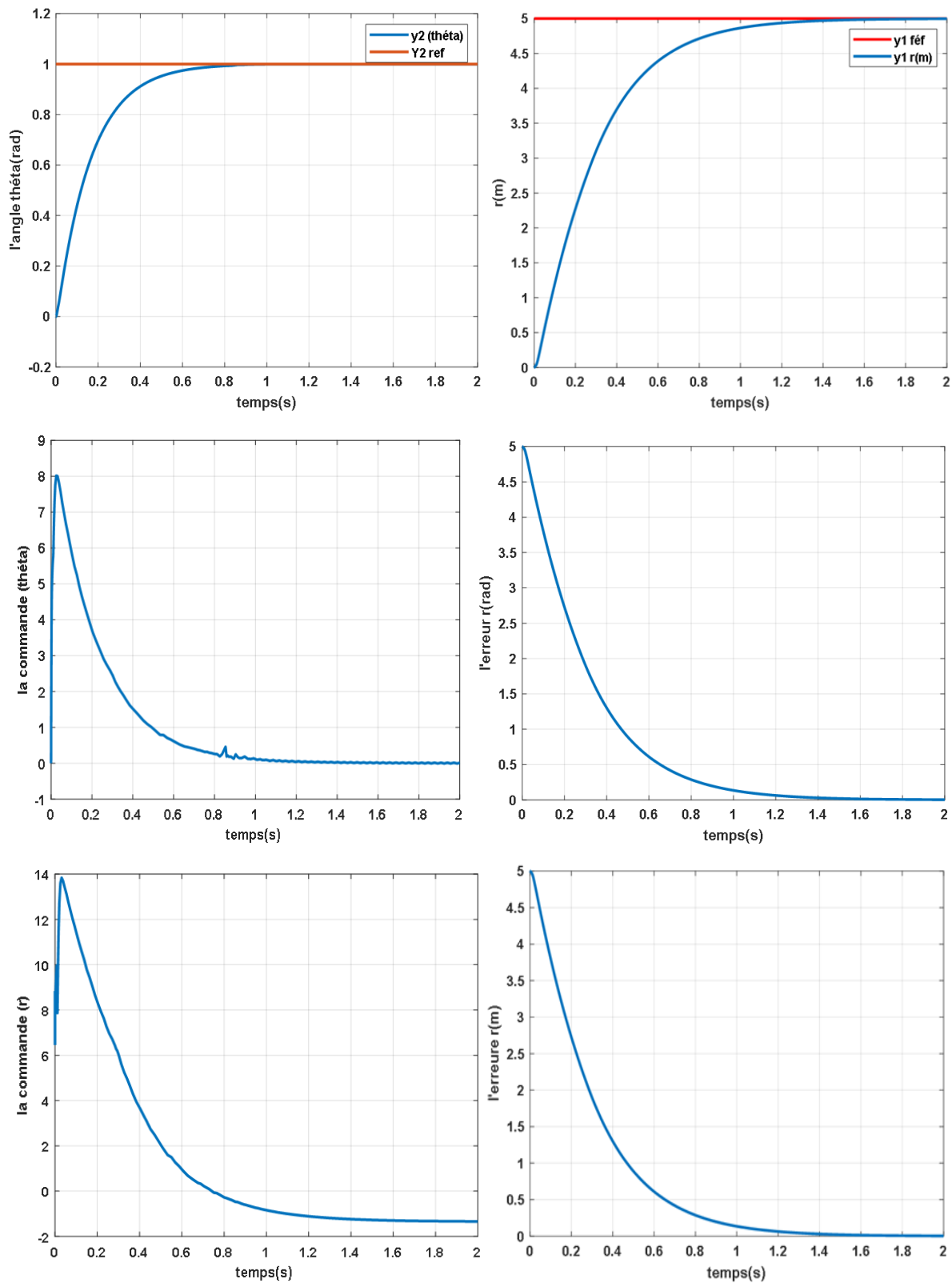


Figure 2.6 : Résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée échelon.

### **3.9 Interprétation les résultats de simulation**

A partir du résultat de simulation, en utilisant la commande logique floue type 1 appliquée sur le système d'un satellite (SATLAN system) sont présentés sur la figure (2.6). On observe que les performances sont acceptables en le temps de réponse et la stabilité de systèmes et la précision de convergence vers leurs pour une entrée échelon.

### **3.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les différents concepts de la logique floue et ses différents éléments. On a parlé premièrement de quelques définitions comme les variables linguistiques, univers de discours et la fonction d'appartenance, on prend aussi quelques opérateurs de la logique floue les plus utilisés, ensuite on a présenté la structure d'un système flou avec de courtes explications des différentes parties de sa constitution (fuzzification, défuzzification...). La logique floue est la solution appropriée pour éviter les opérations mal organisées résultant des méthodes conventionnelles, dans le prochain chapitre, nous allons utiliser une autre méthode de commande en utilisant la logique floue type2., nous allons utiliser une autre méthode de commande en utilisant la logique floue type2.

### 3.1 Introduction

Ce chapitre aborde une méthode de contrôle moderne, la logique floue se distingue de la logique classique en permettant une définition partielle ou 'floue' des règles de contrôle. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou un processus spécifique avec des mots, puis a utilisé un petit nombre de règles pour représenter ce phénomène. Les règles et les ensembles flous sont des éléments essentiels pour comprendre les systèmes flous, car ils fournissent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question [3]. Dans ce chapitre nous allons définir la logique floue, son principe et nous allons présenter les principes de base et le fondement théorique de la théorie de la logique floue type-2.

### 3.2 Concept de base

#### 3.2.1 Les ensembles flous

##### 3.2.1.1 Définition 1

Un ensemble flou type-2, noté  $\tilde{A}$  est défini par une fonction d'appartenance tridimensionnelle.

$u_{\tilde{A}}(x, u)$  c.à.d. :

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} u_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) J_x \subseteq [0, 1] \quad (3.1)$$

Où  $\int$  dénote l'union de tous les éléments du produit cartésien sur  $x$  et  $u$  avec :

$$0 \leq u_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$$

A chaque point fixe  $x$  de  $X$ ,  $J_x$  est l'appartenance primaire de  $x$ , et  $x$  appelé variable primaire [22].

##### 3.2.1.2 Définition 2

A chaque valeur de  $x$ , défini  $x = x'$ , le plan 2 dimensionnel dont les axes sont  $u$  et  $u_{\tilde{A}}(x, u)$  est appelé tranche verticale (vertical slice) de  $u_{\tilde{A}}(x, u)$ . La tranche verticale pour  $x'=5$  est représentée dans la figure (3.1) [22].

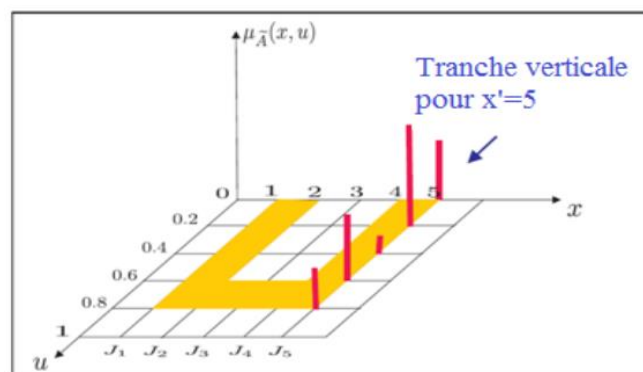


Figure 3.1 : Tranche verticale pour  $x'=5$  [22].

Donc pour  $x' \in X$  et  $\forall u \in J_{x'} \subseteq [0, 1]$  on a :

$$u_{\tilde{A}}(x = x', u) = u_{\tilde{A}}(x') = \frac{\int_{J_{x'}} f_{x'}(u)}{J_{x'}} \subseteq [0, 1] \quad (3.2)$$

Où :  $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$ .

Puisque  $\forall x'$ , ce  $x'$  va appartenir à  $X$ , c.à.d.  $x' \in X$ , donc nous écrivons la fonction d'appartenance secondaire par  $u_{\tilde{A}}(x)$  comme une fonction d'appartenance floue de type 1.

En se basant sur le concept des ensembles secondaires, on peut réinterpréter un ensemble flou type-2 comme l'union de tous les ensembles secondaires, c.à.d. en utilisant l'équation (3.2) [22].

On peut écrire  $\tilde{A}$  sous la forme suivante :

$$\tilde{A} = \{(x, u_{\tilde{A}}(x)) / \forall x \in X\} \quad (3.3)$$

Où sous la forme :  $\tilde{A} = \int_{x \in X} u_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} [\int_{u \in J_x} f_x(u) / u] / x J_x \subseteq [0, 1]$ .

### 3.2.1.3 Définition 3

Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé appartenance primaire de  $x$  noté  $J_x$  telle que  $J_x \subseteq [0, 1] \forall x \in X$  [22].

### 3.2.1.4 Définition 4

L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée degré d'appartenance secondaire noté  $f_x(u)$  [22].

### 3.2.1.5 Définition 5

Un ensemble flou type-2 se compose de fonctions d'appartenance secondaires qui sont des ensembles type-1 de formes intervalles :

$$f_x(u) = 1, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1], \forall x \in X \quad (3.4)$$

Les ensembles flous type-2 intervalle reflètent l'uniformité de l'incertitude au niveau de la fonction d'appartenance primaire, ce type de fonctions d'appartenance est le plus souvent utilisé dans les systèmes flous type-2. Il est important de noter que ce type de fonctions d'appartenance ne se différencie que par ses domaines (intervalles), qui peuvent être décrits en utilisant les bornes de

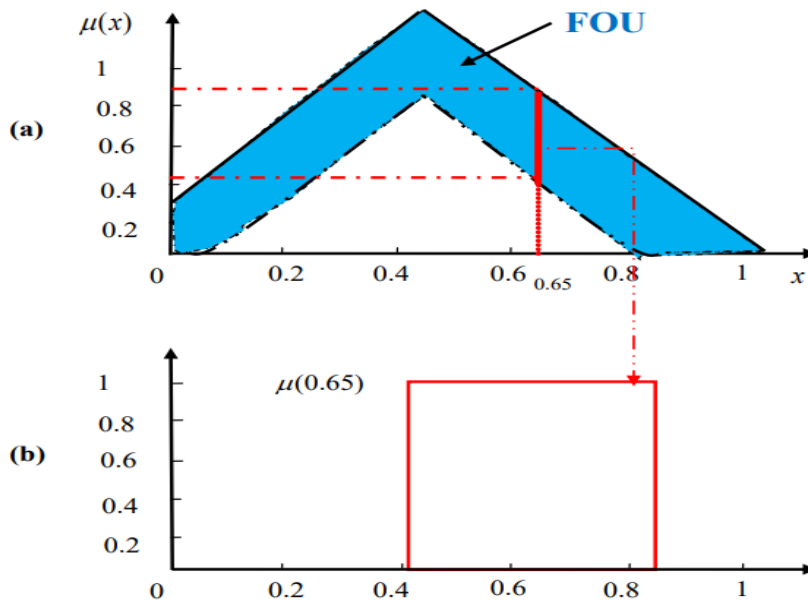
gauche et de droite.  $[l, r]$  ou par leurs centres et largeurs  $[c - s, c + s]$  où  $c = (l + r) / 2$  et  $s = (r - l) / 2$  [22].

**3.2.1.6 Définition 6**

Considérons que chaque fonction d'appartenance secondaire d'un ensemble flou type 2 a un seul degré d'appartenance unitaire. On définit alors une fonction d'appartenance principale comme l'union de tous ces points : [22]

$$M_{\text{principale}}(x) = \int_{x \in X} u / x \quad \text{où } f_x(u) = 1 \quad (3.5)$$

Dans l'intervalle flou de type 2, la fonction d'appartenance principale est l'union de toutes les valeurs d'appartenance moyennes de la fonction d'appartenance principale. Notez que lorsque l'incertitude des fonctions d'appartenance disparaît, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou de type 2 est réduite à la fonction d'appartenance principale [22].



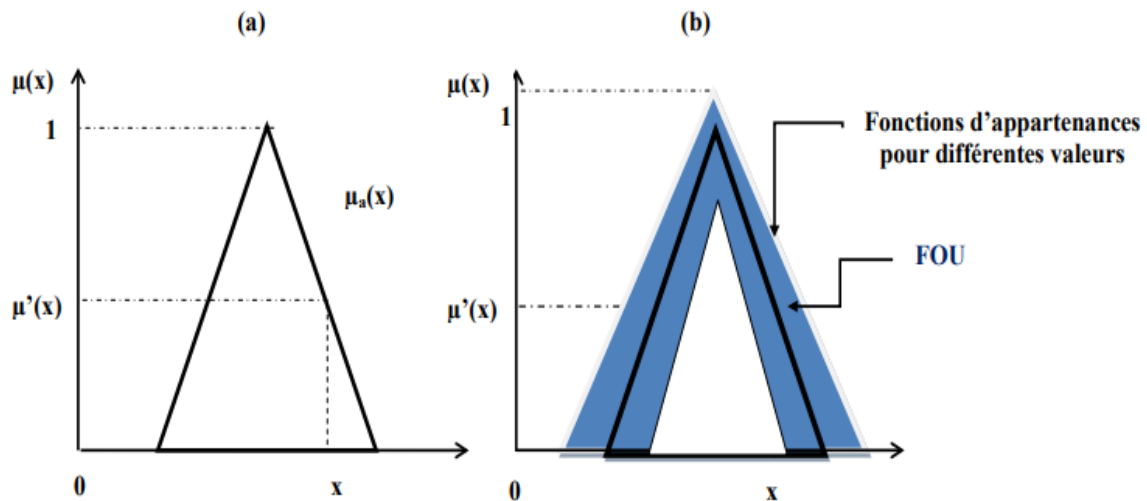
**Figure 3.2 :** Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle [22].

(a) Appartenance primaire. (b) Appartenance secondaire.

**3.2.1.7 Définition 7**

Dans un ensemble flou type-2  $\tilde{A}$  est représentée par une région bornée nommée « Footprint Of Uncertainty » FOU. C'est l'union de toutes les appartenances primaires : [22]

$$\text{FOU}(\tilde{A}) = \cup_{x \in X} J_x \quad (3.6)$$



**Figure 3.3:** Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 de forme triangulaire

(a) Appartenance primaire. (b) Appartenance secondaire [22].

### 3.3 Différents types d'ensembles flous type-2

- **Ensemble flou type-2 gaussien :** Chaque point a un degré d'appartenance de type-1 gaussien, et son domaine de définition est inclus dans l'intervalle.  $[0, 1]$ .
- **Ensemble flou type-2 triangulaire :** Chaque point est considéré comme un ensemble flou type-1 de forme triangulaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle  $[0, 1]$ .
- **Ensemble flou type-2 intervalle :** Chaque point appartient à un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Les appartenances secondaires sont égales à 1 dans ce cas [17].

### 3.4 Les fonctions d'appartenance

Il n'y a aucune modification des ensembles flous de type 1 à type 2 dans les bases de la logique floue, et en général, elles ne varient pour aucun type  $n$ . Lorsque le nombre de types augmente, cela modifie la nature des fonctions d'appartenance.

Dans ce cas, les appartenances secondaires sont égales à 1. Le tableau ci-dessous illustre les fonctions d'appartenance les plus fréquemment utilisées [3] :

Tableau 3.1: Les fonctions d'appartenance triangulaires, gaussiens et trapézoïdaux de type 2 [21].

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & b \leq x \leq (c - \alpha) \\ 0 & x > (c - \alpha) \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\overline{\mu_{A(x,u)}} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{(d - a) - x}{(d - a) - c} & b \leq x \leq (d - \alpha) \\ 0 & x > (d - \alpha) \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\overline{\mu_{A}(x, u)} = \exp(-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\sigma})^2)$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = (1 - \alpha)\exp(-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\sigma})^2)$	

La définition d'une fonction d'appartenance d'intervalle de type 2 repose sur la présence d'une fonction d'appartenance supérieure et inférieure. La fonction d'appartenance supérieure (FAS) est équivalente à une fonction d'appartenance traditionnelle de type 1.

La fonction d'appartenance inférieure (FAI) est inférieure ou égale à la fonction d'appartenance supérieure pour toutes les valeurs d'entrée possibles. La région entre FAS et FAI est l'empreinte de l'incertitude (en anglais, FOU : Footprint Of Uncertainty). Le diagramme ci-dessous illustre FAS (rouge), le FAI (bleu) et le FOU (ombré) pour une fonction d'appartenance triangulaire de type 2 (Figure 3.4) [3].

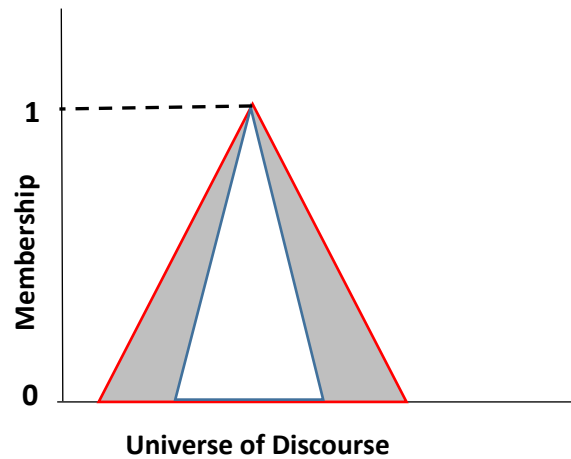


Figure 3. 4 : Fonction d'appartenance triangulaire type 2 [3].

### 3.5 Opération sur les ensembles flous type 2

Rappelons que le degré d'appartenance à deux ensembles flous type-2  $\tilde{A} \in X$  et  $\tilde{B} \in X$  est celui des ensembles flous type 1. Donc, pour effectuer le calcul de l'union, l'intersection et le complément de  $\tilde{A}$  et  $\tilde{B}$ , Il sera nécessaire d'étendre (généraliser) les opérations *min*, *max* et l'opération de *négation*, qui commencent par manipuler des valeurs ordinaires, puis se dirigent vers des ensembles flous [10]. Nous allons utiliser le célèbre principe d'extension de Zadeh à cette fin.

Les fonctions d'appartenance pour l'intersection, l'union et la complémentation [18] :

- **L'intersection :**  $\tilde{A} \cap \tilde{B} = \sum_{i,j} (f_x(u_i) \wedge g_x(w_j)) / u_i \wedge w_j$ .
- **L'union :**  $\tilde{A} \cup \tilde{B} = \sum_{i,j} (f_x(u_i) \vee g_x(w_j)) / u_i \vee w_j$ .
- **Le complément :**  $\bar{\tilde{A}} = \sum_i f_x(u_i) / (1 - \mu_i)$  ;  $\bar{\tilde{B}} = \sum_i g_x(w_j) / (1 - w_j)$ .

### 3.6 Structure d'un contrôleur flou type 2

La logique floue est constituée de quatre éléments principaux :

- Interface de fuzzification.
- Base de règles.
- La réduction de type.
- Interface de defuzzification.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

Les systèmes flous type-2 sont dotés d'un nouveau module appelé réducteur de type, permettant de réduire des ensembles flous de type-2 à des ensembles flous de type-1 [17].

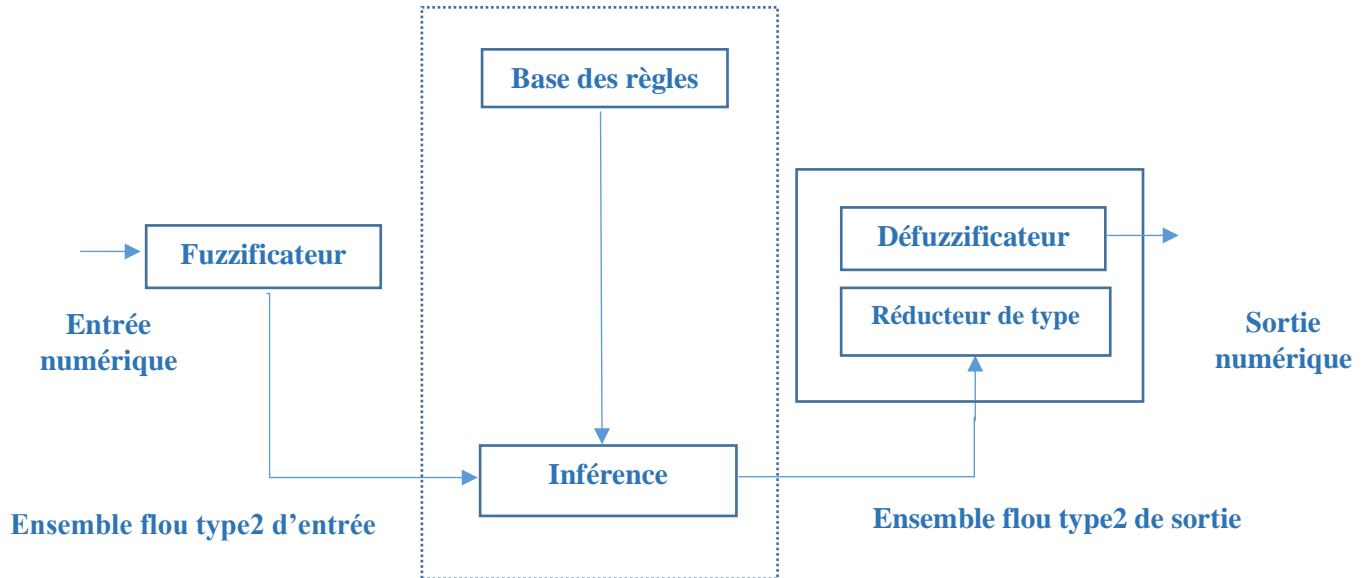


Figure 3.5 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 2 [17].

### 3.6.1 Fuzzification

Contrairement à la fonction d'appartenance type 1, La fonction d'appartenance type-2 implique plusieurs degrés d'appartenance (ou dimensions) pour chaque entrée. En conséquence, l'incertitude sera mieux représentée [14].

#### 3.6.2 .1Base de règles

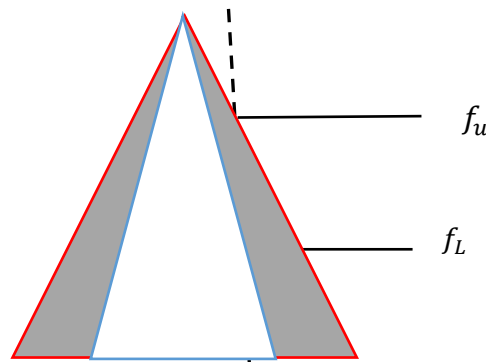
Les règles floues de type 2 ont la même structure que celles du type 1. La différence entre ces deux types est associée à la nature des fonctions d'appartenance.

Donc, la seule différence réside dans le fait que maintenant certains ou tous les ensembles flous impliqués dans les règles sont de type 2. Dans un système flou de type 1, l'ensemble de sortie est un ensemble flou de type 1 [3]

#### 3.6.2.2Mécanisme d'inférence

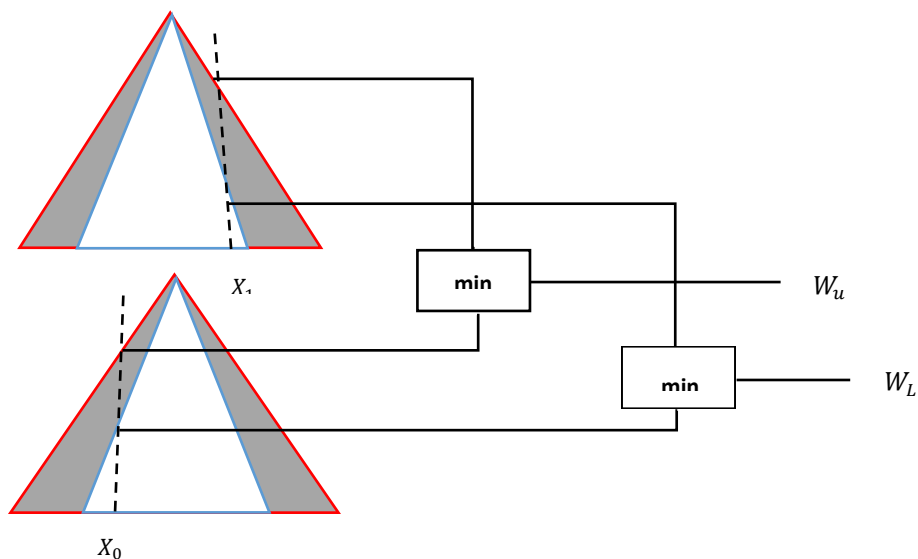
Les techniques d'inférence pour les ensembles flous de type 1 et de type 2 sont identiques, à la seule différence près que les valeurs d'entrée et de sortie pour le type 2 sont des ensembles  $\tilde{A}$ . Par conséquent, elle utilise les fonctions d'appartenance supérieures et inférieures pour l'efficacité de ces méthodes.

Dans les systèmes d'inférence floue de type 2, les valeurs d'entrée sont floues en trouvant le degré correspondant d'appartenance à la fois aux FAS et aux FAI à partir de l'antécédent de la règle. Chaque fonction d'appartenance de type 2 génère deux valeurs floues. Dans la figure (Figure 3.6), on peut voir la fuzzification montrant la valeur d'appartenance dans la fonction d'appartenance supérieure ( $f_u$ ) et la fonction d'appartenance inférieure ( $f_L$ ) [3].



**Figure 3.6:** Fonction d'appartenance à fuzzifier [3].

Par la suite, on détermine une plage de forces de déclenchement de règle en appliquant l'opérateur flou aux valeurs floues des fonctions d'appartenance de type 2, tel que montré dans la figure ci-dessous. La valeur maximale de cette plage ( $W_u$ ) est le résultat de l'application de l'opérateur flou aux valeurs floues des FAS. La valeur minimale ( $W_L$ ) est le résultat de l'application de l'opérateur flou aux valeurs floues des FAI [3].



**Figure 3.7:** Deux fonctions d'appartenance à fuzzifier [3].

### 3.6.3 Réduction de type

Pour le type 2, les ensembles de sortie sont des ensembles de type 2 ; donc il est nécessaire d'utiliser des versions étendues des méthodes de défuzzification de type 1 appelées la réduction de type. En utilisant cette opération, on va transformer l'ensemble flou type 2 en un ensemble flou type 1 appelé ensemble type réduit., qui sera défuzzifié par la suite. Cet ensemble de type réduit résultant prend en compte plus d'informations.au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre ordinaire).

On peut citer parmi les méthodes de réduction de type utilisées :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur.
- La réduction de type par le centre des ensembles [14].

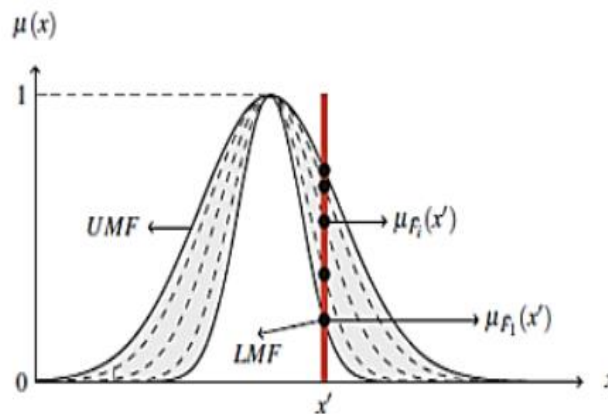


Figure 3.8: Empreinte d'incertitude et fonctions d'appartenance supérieures et inférieures [14].

### 3.6.4 Défuzzification

Pour les systèmes flous de type 2, l'opération de défuzzification étendue permet d'abord d'obtenir un ensemble flou de type 1. Cette opération, qui convertit un ensemble flou de type 2 en un ensemble flou de type 1, est appelée réduction de type. L'ensemble flou de type 1 obtenu est appelé ensemble de type réduit. Enfin, cet ensemble de type réduit doit être défuzzifié pour obtenir une valeur précise [14].

3.7 Application de la commande floue type 2 d'un satellite (SATLAN system)

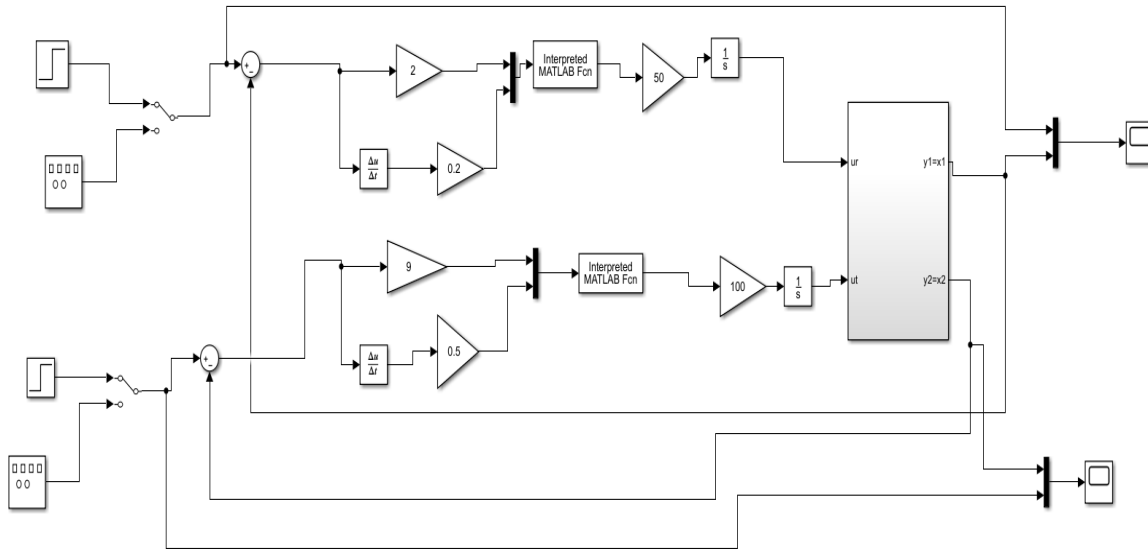


Figure 3.9: schéma block de la commande par logique floue type 2 d'un satellite (SATLAN system).

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 3.10, 3.11 et 3.12).

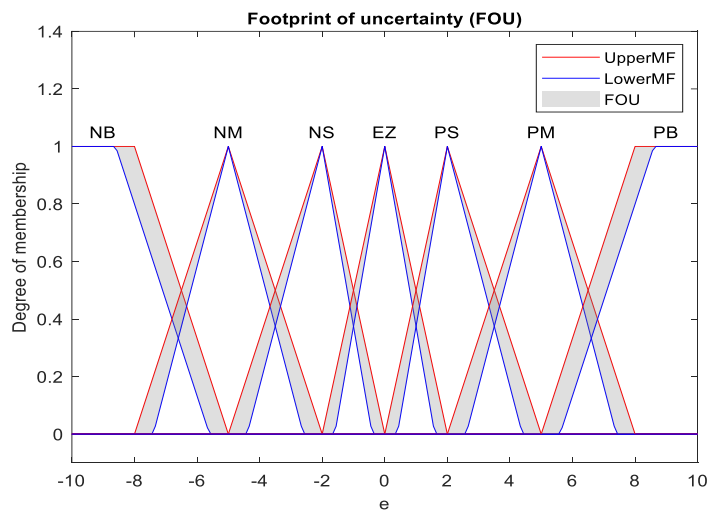


Figure 3.10 : fonction d'appartenance de l'erreur.

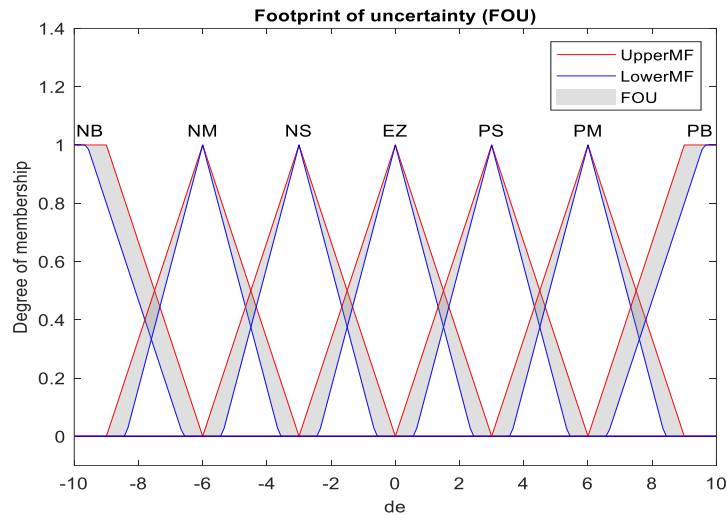


Figure 3.11 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

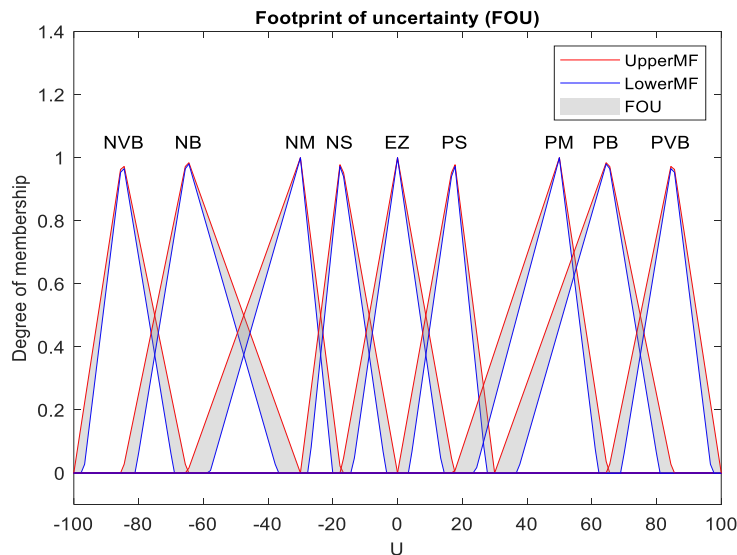


Figure 3.12 : fonction d'appartenance de la sortie.

### 3.8 Résultats de simulation de la commande floue type 2 d'un satellite (SATLAN system)

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la figure 3.13 :

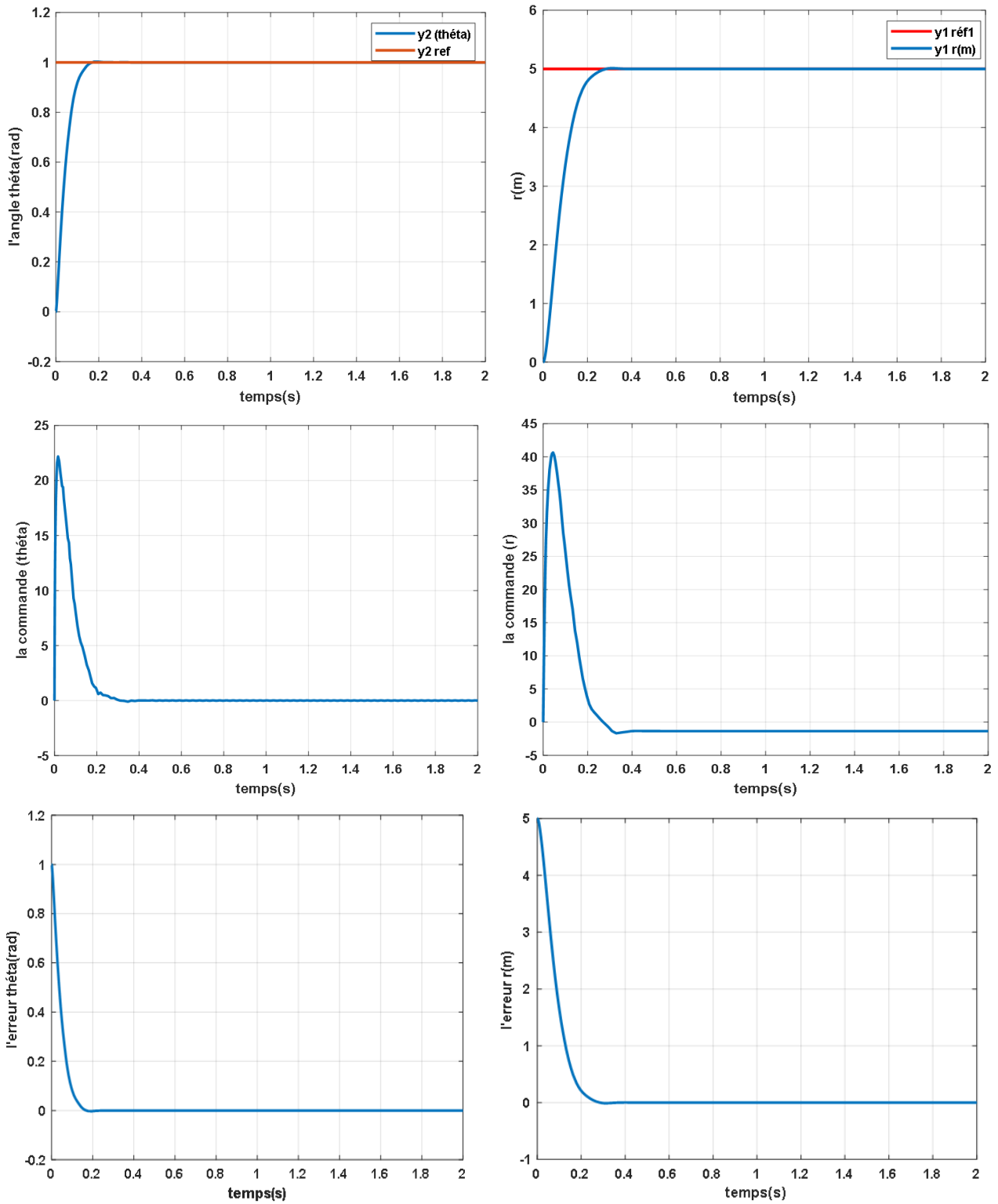


Figure 3.13: résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée échelon.

### 3.8.1 Interprétation les résultats de simulation

D'après les résultats de simulation de la commande logique floue type 2 appliquées sur le système (SATLAN system) sont présentés sur la figure (3.13), les résultats montrent que le régulateur floue type 2 donne de meilleures réponses par rapport au flou type 1 à savoir un temps de montée plus court, une bonne précision, absence de dépassement. On peut déduire que la commande floue type 2 donne des résultats précieux.

### 3.9 Étude comparative entre les résultats de simulations des différentes lois de commande développées

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation concernant l'application des lois de commande par logique floue (type 1 et type 2), PID sur notre système (SATLAN system). Nous avons effectué des études comparatives en simulation pour comparer ces trois commandes. Pour cela, nous définissons deux critères, le premier est en fonction de la commande appliquée, on peut le considérer comme un critère énergétique, le deuxième est en fonction de l'erreur de position.

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (u^T u) \tag{3.6}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (e^T e) \tag{3.7}$$

Où :

$J_1$  est Le critère énergétique et  $J_2$  est le critère de l'erreur de position.

$u$  : est la commande à l'entrée du système et  $e$  l'erreur statique de réglage.

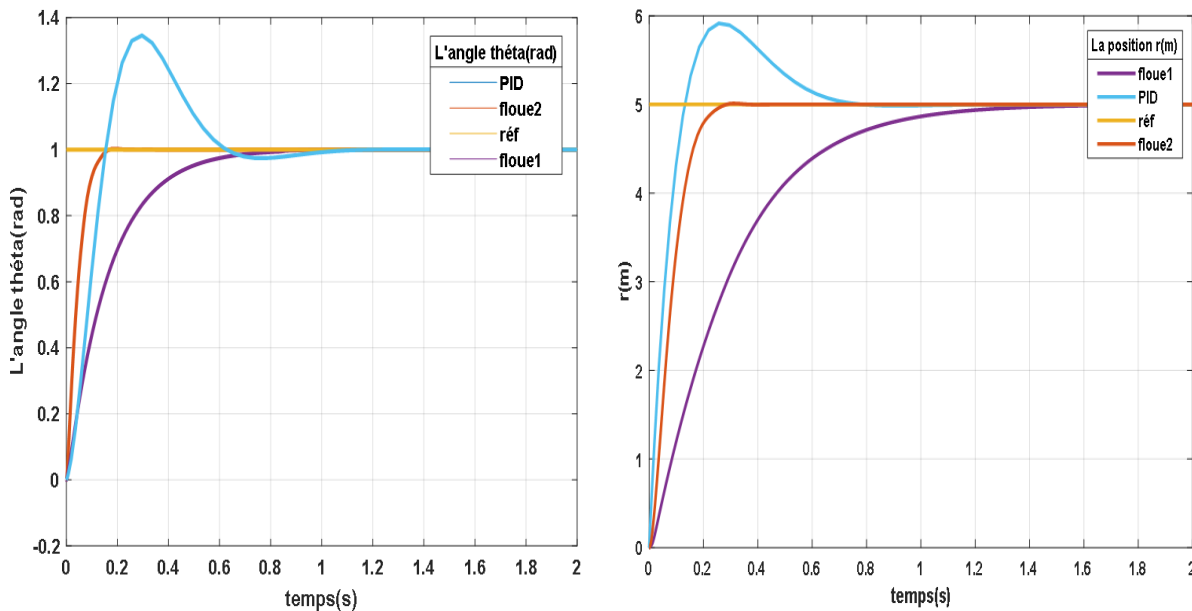
**Tableau 3.2:** Étude comparative entre les commandes développées pour le premier sortie  $r$ .

Critère	Commandes développées pour le satellite (sortie $r$ )		
	PID	Commande par LFT1	Commande par LFT2
$j_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (u^T u)$	3,1140.10 <sup>3</sup>	2,0752.10 <sup>4</sup>	2,0441.10 <sup>3</sup>
$j_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (e^T e)$	7,5466	3,5145.10 <sup>3</sup>	3,3749

**Tableau 3.3:** Étude comparative entre les commandes développées pour le deuxième sortie  $\theta$ .

Critère	Commandes développées pour le satellite (sortie $\theta$ )		
	PID	Commande par LFT1	Commande par LFT2
$j_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (u^T u)$	3,6037.10 <sup>4</sup>	2,3724.10 <sup>5</sup>	1,2070. 10 <sup>4</sup>
$j_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (e^T e)$	296 ,8020	8,8444.10 <sup>4</sup>	162.5278

Les résultats de la position  $r$ , l'angle  $\theta$  sont présentés sur la figures (3.14)



**Figure 3.14:** les résultats de simulation les sorties des commandes (PID, la logique floue type-1, la logique floue type-2).

L'objectif de cette section est d'examiner les différentes lois de contrôle résumées dans ce mémoire dans les mêmes conditions. Pour mettre en évidence la performance de chaque loi de contrôle, en termes d'erreur statique et la valeur de la commande nécessaire pour exécuter un tel ordre, nous avons adopté deux critères  $J_1$  et  $J_2$ . Cette comparaison est basée sur l'évolution temporelle de la commande et l'erreur qui en résulte.

Pour satellite (SATLAN), à partir de critère  $J1$  et  $J2$ . On peut déduire que la commande par la logique floue type2, le système est bien modélisé et pour cela les deux critères prennent la plus petite valeur.

D'après l'analyse précédente, nous pouvons dire que le contrôle par la logique floue type2 est le plus efficace du point de vue de la minimisation des deux critères par rapport à la régulation PID conventionnelle et logique flou type1. En général, les contrôles non linéaires garantissent de bonnes performances même en présence de perturbations externes et d'erreurs de modélisation.

### **3.10 Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, il y a une analyse approfondie de la logique floue type-2. Parmi les éléments que nous avons entamés la définition, il y a les concepts de la logique floue type 2., les Différents types d'ensemble, les opérations, ensuite on a présenté la structure d'un système flou type 2. La nouveauté dans cette logique, c'est que les fonctions d'appartenance ne sont pas définies d'une manière unique, mais d'une manière incertaine. Concernant les systèmes flous type-2, nous avons vu qu'ils sont dotés d'un nouveau module appelé réducteur de type, permettant de réduire des ensembles flous de type-2 à des ensembles flous de type-1. Enfin, nous avons exposé les résultats de simulation obtenus en appliquant la commande PID, flou type-1 et flou type-2 respectivement. En comparant avec les deux autres contrôleurs, nous avons constaté que le contrôleur flou de type 2 avait de très bonnes performances. Les résultats obtenus suggèrent que le contrôle flou de type 2 n'est pas seulement une extension, mais une amélioration du contrôle flou de type 1 dans le cadre de simulations.

### Conclusion générale

La commande floue est une méthode nouvelle et occupe aujourd'hui une place importante dans la commande des procédés industriels. Elle utilise des techniques s'appuyant sur le savoir-faire humain, exprimées en mots et en phrases ordinaires, plutôt que sur des équations.

L'objectif de ce mémoire était de réaliser une comparaison des performances de différentes commandes pouvant être utilisés pour la stabilisation d'un satellite (SATLAN system). Nous avons choisi trois types de commande non linéaire, pour réaliser la comparaison, la commande PID, la commande par la logique floue type 1 et la logique floue type- 2. Dans le premier chapitre, nous avons présenté les concepts de base tels que la définition de l'architecture, avec différents éléments de composition du satellite, notamment les domaines d'application. La modélisation de notre système (SATLAN system), le modèle mathématique et les résultats de simulation en boucle ouverte et PID ont été exposés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les notions de base des ensembles floue type 1. Après, nous avons illustré la structure élémentaire d'un contrôleur floue type-1 et on a précisé le rôle de chaque bloc (base des règles, moteur d'inférences floues, fuzzification, défuzzification). Puis faire une comparaison entre ces deux commandes pour en choisir la meilleure. D'après les résultats obtenus, on voit que le régulateur flou type1 est le mieux adapté par rapport au régulateur classique PID.

Dans le dernier chapitre, Nous avons abordé la notion de logique floue de type-2 où plusieurs points ont été traités : sa différence avec le contrôleur flou de type-1, ses définitions, opérations sur les ensembles flous, ainsi nous avons étudié la structure de contrôleurs flous type-2 puis, nous avons présenté les résultats de simulation de systèmes régulés par les deux types de régulateur précédentes. Les résultats de simulation nous ont montrés que le régulateur à base de la logique floue type-2 est caractérisé par de bonnes performances en termes de : stabilité, dépassement, temps de réponse égal et une bonne précision. Malgré les avantages du régulateur flou liés à sa mise en œuvre en comparaison avec le PID mais ce dernier reste encore le plus utilisé dans l'industrie.

Comme perspectives nous espérons d'appliquer ces méthodes expérimentalement sur un satellite (SATLAN system).

### Annexe

Les paramètres du satellite sont donnés au tableau 1 :

Définition	Symbole	La valeur
La position	$r$	5 m
L'angle théta	$\theta$	1 rad
La vitesse	$\omega$	0.1 rad/s

**Tableau 1** : Les paramètres du satellite (SATLAN system).

### Références bibliographiques

- [1] «Satellites artificiels» <https://www.meteorologiaenred.com/fr/satellites-artificiels.html>
- [2] ABDELADIM Othman & GACHOUCHE Abderrahmane « Surveillance à Distance des Etres Humains et d'Objets via des Satellites » Mémoire de Master Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [3] M. RAMDANI Iles & M. SADOK Yanis « Commande MPPT basée sur le contrôleur flou de type 2 sur un système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome » mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2021.
- [4] FOIX, V., & TAISANT, J. P « Les satellites » ,1996
- [5] M. BOUDJELLAL « les satellites et leurs application » Université Saad Dahlab de Blida ,2006-2007.
- [6] « Satellite artificiel » [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_artificiel](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Satellite_artificiel) ,2024
- [7] BOUDISSA Fadila « Commande non linéaire d'un satellite (SATLAN system) » mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2015.
- [8] « Applications des satellites » [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Applications\\_des\\_satellites](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Applications_des_satellites)
- [9] «Les satellites» <https://metiers-du-spatial.com/missions/>
- [10] <https://fr.e-space.com/article/what-are-the-components-of-a-satellite>
- [11] [https://audec.biz/sites/projets/satellites/fonctionnement\\_satellite.html](https://audec.biz/sites/projets/satellites/fonctionnement_satellite.html)
- [12] <https://acapros.fr/techno-et-conso/avantages-et-inconvenients-des-satellites2/>
- [13] Mechaar, K., & Khen, K. « Étude comparative des deux méthodes d'évaluation objective de la qualité d'expérience audiovisuelle par Logique Floue de type 1 et type 2 » Doctoral dissertation, Université jjel, 2021.
- [14] MEDJROUD, S. « Un système de navigation à base de la logique floue : Application sur un système multi robots » Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2019.
- [15] Boumella, N « Génération et Optimisation des Contrôleurs Flous Type-2 » Doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2013.

## Références bibliographiques

---

- [16] Billel, M. E. L. I. K., & BOUHABZA, N « Commande par logique floue de type 2 et commande neuro-floue appliquées à un pendule inversé. » Mémoire de Master, Université de Blida 1, 2015.
- [17] Mouloud IDER « Etude des systèmes flous type-2 : Application à la commande des systèmes non linéaires » Mémoire d'ingénieur d'état, 2006.
- [18] Houda, H. I. T. O. U. M., & Rahma, B. E. L. D. I « La commande floue : Application à la régulation de température », 2019.
- [19] Lahmar oussama - Djeddi seif eddine « Etude comparative entre la commande par logique floue et régulateur PI d'un MCC ». Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019.
- [20] L. Tsung, L.L Han, J.K et Ming: 'Direct adaptive intervalle type-2 fuzzy control of multivariable nonlinear systèmes', Engineering Application of artificiel intelligence, vol.22, issue.3, page 420-430, 2009
- [21] KHEMIS, A « Contribution à la commande adaptative de la machine à induction par l'application des techniques floues type-2 » Doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2018.
- [22] Rachid, A., & Said, B « Etude et Développement d'une Plateforme de Commande (TOR, PID et Floue) de la Station de Pression Sous Environnement LabVIEW » Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2015.

## Résumé

Le travail réalisé dans cette mémoire concerne la commande d'un satellite (SATLAN system) par l'intelligence artificielle, en utilisant des approches issues des théories de la PID, la logique floue type 1 et type 2, et leurs applications sur le système satellite. On a présenté un bref tour d'horizon sur généralités des satellite, puis la modélisation d'un satellite (SATLAN system), et les techniques des commandes par régulateur PID, la commande par la logique floue type 1 et type 2 du satellite. Des simulations sont effectuées pour valider chaque commande. Les résultats obtenus de cette technique de commande robuste basée sur les systèmes flous type-2 du satellite SATLAN se traduisent par de meilleures performances dynamiques.

**Mots clés :** satellite, SATLAN, intelligence artificielle, PID, la logique floue type1, floue type2.

## Abstract

The work carried out in this thesis concerns the control of a satellite (SATLAN system) by artificial intelligence, using approaches from the theories of PID, fuzzy logic type 1 and type 2, and their applications on the satellite system. We presented a brief overview of satellite generalities, then the modelling of a satellite (SATLAN system), and the techniques of PID control, control by the fuzzy logic type 1 and type 2 of the satellite. Simulations are performed to validate each order. The results obtained from this robust control technique based on the SATLAN Type-2 fuzzy systems result in better dynamic performance.

**Key words:** satellite, SATLAN, artificial intelligence, PID, fuzzy logic type1, fuzzy type2.

## المخلص

ويتعلق العمل المنجز في هذه الأطروحة بالتحكم في القمر الصناعي (ساتلان) بواسطة الذكاء الاصطناعي، باستخدام مناهج من نظريات PID، المنطق الغامض من النوع 1 و2، وتطبيقاتها على نظام القمر الصناعي (ساتلان)، وتقنيات التحكم في PID، والتحكم بالمنطق الغامض من النوع 1 والنوع 2 للقمر الصناعي. يتم إجراء عمليات المحاكاة للتحقق من صحة كل هذه النظريات كما تؤدي نتائج تقنية التحكم القوية هذه القائمة على أنظمة الأقمار الصناعية الضبابية من النوع 2 إلى أداء ديناميكي أفضل.

**الكلمات الرئيسية:** القمر الصناعي، ساتلان، الذكاء الاصطناعي، PID، المنطق الغامض نمط1، النمط الغامض 2.