

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa -

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Electronique**

Spécialité: Instrumentation

Par : **Daani Nourelhouda et Bouchoucha Soumaya**

Sujet :

Influence du nombre de règles floues d'un contrôleur FLC à entrée unique : Application à un véhicule sous-marin sans pilote.

Présenté et soutenu publiquement, le 12 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M.Saigaa Mohammed

MAA

Président

M.Djari Abdelhamid

MCA

Rapporteur

M.Aouiche Abdelaziz

MCA

Examineur

Promotion : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Avant toute

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'études. Dieu ALLAH, dont tous les mérites lui en reviennent, El Hamde lilléh...

Ensuite

Je désire exprimer mes sincères remerciements a la personne qui mérite tous mon reconnaissance, notre encadreur Dr Abdelhamid Djari pour son soutien, sa gentillesse, ses encouragements, ses conseils et sa patience pendant la période de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aussi aux enseignants du département de génie électrique de la spécialité Electronique qui ont contribué à notre formation.

Aussi

Je tiens à remercier tous les membres de jury qui ont fait l'honneur d'avoir accepté de juger ce travail.

NOUR & SOUMAYA

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde
et les protège pour leurs soutien moral et
financier, pour leurs encouragements et les
sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mes frères,

A toute ma famille,

A tous ceux qui me sont chers,

A mes chers amis,

*Enfin à mon encadreur Djari Abdelhamid qui a contribué à la réalisation
de ce travail.*

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et Abréviations	
Introduction Générale	01

Chapitre I

Contrôleur FLC à entrée unique

I.1	Introduction	03
I.2	Historique de la logique floue	03
I.2.1	Apparition de la logique Floue	03
I.2.2	Premières applications	03
I.2.3	Essor	03
I.3	Théorie de la logique floue	04
I.3.1	Variables linguistiques	04
I.3.2	Les ensembles flous et les Fonctions d'appartenance	05
I.3.3	Opération de réglages flous	06
I.3.4	La logique floue	07
I.3.5	Règles d'inférence floue	08
I.4	Types des systèmes flous	08
I.4.1	Modèle flou de type Mamdani	08
I.4.2	Modèle flou de type Sugeno	09
I.4.3	Modèle flou de type Tsukamoto	10
I.4.4	Règle du produit de Larsen	10
I.5	Contrôleur à logique floue	11
I.5.1	Interface fuzzification	12
I.5.2	Base de connaissances	12
I.5.3	Logique de décision (moteur d'inférence)	13
I.5.4	Défuzzification	13
I.6	Paramètres de conception d'un FLC	13
I.6.1	Stratégie de fuzzification	13
I.6.2	Base de données	13
I.6.3	Base de règle	13
I.6.4	Inférence	14
I.6.5	Stratégie de défuzzification	16

I.7	Avantages et inconvénients de la commande floue	17
I.7.1	Avantages	17
I.7.2	Inconvénients	17
I.8	Types de contrôleur flou	17
I.8.1	FLC de type P	18
I.8.2	FLC de type	18
I.8.3	FLC de type PI	20
I.8.4	FLC de type PID	21
I.9	Surface de décision floue	22
I.10	Architecture d'une commande floue	23
I.11	Conclusion	24

Chapitre II

Véhicule sous-marin sans pilote

II.1	Introduction	25
II.2	Historique des véhicules sous-marins	25
II.3	Principe de fonctionnement d'un sous-marin en général	29
II.3.1	Principe d'Archimède	29
II.3.2	Principe de Pascal	29
II.4	Les différents types de véhicules sous-marins	30
II.5	Formes des véhicules Sous-marins autonomes	32
II.6	Structure de la navigation d'un véhicule sous-marin	33
II.7	Fonctionnement d'un AUV	34
II.7.1	Paramètres hydrodynamiques d'un AUV	35
II.7.2	Architecture logicielle	35
II.7.3	Lois de commande existantes	36
II.8	Modélisation générale du véhicule ' robot ' sous-marin autonome	36
II.9	Conclusion	42

Chapitre III

Application du FLC sur un modèle linéaire d'un véhicule sous-marin

III.1.	Introduction	43
III.2.	Simulation du FLC à seule entrée au AUV	43

III.3. Application du FLC à deux entrées au AUV	46
III.3.a. Simulation sans perturbations à deux entrées (erreur et sa variation).	46
III.3.b. Simulation avec perturbations à deux entrées (erreur et perturba- tions). .50	
III.4. Conclusion	54
Conclusion Générale	55

Référence bibliographique

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Figure I.1 les différentes fonctions d'appartenances	6
Figure I.2 Opérateurs logiques: (a) A et B; (b) $A \cap B$; (c) $A \cup B$; (d) \bar{A}	7
Figure I.3 Modèle flou de type Mamdani	9
Figure I.4 Modèle flou de type Sugeno	10
Figure I.5 Modèle flou de type Tsukamoto	10
Figure I.6 modèle de règle de Larsen sur les produits	11
Figure I.7 Synoptique d'un contrôleur flou	12
Figure I.8 Exemple d'inférence à plusieurs règles	14
Figure I.9 Schéma fonctionnel d'un CLF de type P avec erreur	18
Figure I.10 Fonction de la sortie de commande pour les systèmes SISO	19
Figure I.11 Schéma fonctionnel d'un CLF de type PD	19
Figure I.12 Surface de contrôle d'un système à sortie unique à deux entrées	20
Figure I.13 Schéma fonctionnel d'un CLF de type PI	21
Figure I.14 Schéma fonctionnel de CLF de type PID	22
Figure I.15 Exemple d'un système de notation floue	22
Figure 1.16 Surface de décision floue	23
Figure I.17 Architecture d'une commande floue	23
Figure II.1 Tortue en 1775 en bois	27
Figure II.2 Nautilus en 1797 en acier	27
Figure II.3 Le Gymnote, lancé en 1888 en France	28

Figure II.4 Les premiers sous marins autonomes. (a)Le SPURV (USA, 1977), (b)L'epaulard (France,1967)	28
Figure II.5 Principe d'Archimède	29
Figure II.6 Principe de Pascal	30
Figure II.7 Exemples d'AUV grand fond. (a)AstrX et IdefX, Ifremer, (b)Daurade, ECA/GESMA	31
Figure II.8 Exemples d'AUV côtiers.(a)Remus, d'hydroid robot camera, (b)Lirmia2, LAFAMIA/LIRMM	31
Figure II.9 Les différents types de véhicules sous-marins	32
Figure II.10 AUV forme cylindrique	32
Figure II.11 AUV forme parallélépipédique	33
Figure II.12 AUV forme ellipsoïdale	33
Figure II.13 La structure GNC pour un système marin	34
Figure II.14 Tenue en immersion	36
Figure II.15 Repères fixe et inertiel, Variables d'état	37
Figure III.1 Modèle de simulation du 1 ^{er} cas (seule entrée)	43
Figure III.2 La position angulaire $w(t)$ du 1 ^{er} cas (et leur agrandissement 'zoom')	45
Figure III.3 L'erreur du 1 ^{er} cas (et leur agrandissement « zoom »)	45
Figure III.4 La commande du 1 ^{er} cas (et leur agrandissement « zoom »)	45
Figure III.5 Modèle de simulation du 2 ^{ème} cas (deux entrées) sans perturbations	46
Figure III.6 La position angulaire $w(t)$ du 2 ^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom') ...	48
Figure III.7 L'erreur du 2 ^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom')	49
Figure III.8 La commande du 2 ^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom')	49
Figure III.9 Modèle de simulation du 3 ^{ème} cas (deux entrées) avec perturbations	50

Figure III.10 (a) La position angulaire $w(t)$ du 3^{ième} cas, (b) et (c) leur agrandissement 'zoom' 52

Figure III.11 L'erreur du 3^{ième} cas (et leur agrandissement 'zoom') 53

Figure III.12 La commande du 3^{ième} cas, (b) et (c) leur agrandissement 'zoom' 53

Liste des tableaux

Tab II.1. Paramètres, dérivées hydrodynamiques et dimensions principales 41

Tab III.1. Cas de 3 règles floues (3 fonctions d'appartenances) 44

Tab III.2. Cas de 5 règles floues (5 fonctions d'appartenances) 44

Tab III.3. Cas de 7 règles floues (7 fonctions d'appartenances) 44

Tab III.4. Cas de 9 règles floues (9 fonctions d'appartenances) 44

Tab III.5. Cas de 11 règles floues (11 fonctions d'appartenances) 44

Tab III.6. Performances temporelles obtenues en 1^{er} cas 46

Tab III.7. Cas de 7 règles floues (3 fonctions d'appartenances) 47

Tab III.8. Cas de 13 règles floues (5 fonctions d'appartenances) 47

Tab III.9. Cas de 29 règles floues (7 fonctions d'appartenances) 47

Tab III.10. Cas de 51 règles floues (9 fonctions d'appartenances) 48

Tab III.11. Cas de 91 règles floues (11 fonctions d'appartenances) 48

Tab III.12. Performances temporelles obtenues en 2^{ième} cas 49

Tab III.13. cas 9 règles floues (3 fonctions d'appartenances) 51

Tab III.14. cas 25 règles floues (5 fonctions d'appartenances) 51

Tab III.15. cas 49 règles floues (7 fonctions d'appartenances) 51

Tab III.16. cas 91 règles floues (9 fonctions d'appartenances) 51

Tab III.17. cas 121 règles floues (11 fonctions d'appartenances) 52

Tab III.18. Performances temporelles obtenues en 3^{ième} cas 54

Notations et Abréviations

FLC : Fuzzy Logic Contrôle.

CLF : Contrôle de Logique Floue.

PD : Proportionnel Différentiel.

PI : Proportionnel-Intégral.

PID : Proportionnelle Intégrale Dérivée.

K_P : Les coefficients de gain proportionnel.

K_I : Les coefficients de gain Intégral.

K_D : Les coefficients de gain Dérivée.

SPURV : Self-Propelled Underwater Research Vehicle.

UUV : Unmanned Underwater Vehicles.

AUV : Autonomous Underwater Vehicles.

ROV : Remotely Operated Vehicle .

SMC : Sliding Mode Control.

x₀ : l'axe longitudinal coïncide avec le nord géographique.

y₀ : l'axe transversal est dirigé vers l'est.

z₀ : axe normal dirigé vers le bas (fond sous-marin).

X_v : un axe longitudinal dirigé de l'arrière de l'engin vers l'avant.

Y_v : axe transversal orienté vers tribord.

z_v : axe normal dirigé du haut vers le bas.

u : vitesse d'avancement.

v : vitesse de glissement.

w : vitesse de descente.

p = $\dot{\phi}$: vitesse de Roulis.

q = $\dot{\theta}$: vitesse de Tangage.

$r = \dot{\psi}$: vitesse de Lacet.

φ : l'angle de Roulis.

θ : l'angle de Tangage.

ψ : l'angle de Lacet.

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, la logique floue est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver, fours à micro-onde), que dans le domaine industriel (classification, aide à la décision, réglage et commande de processus, complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils). Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises [1]. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle a été utilisée dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie électrique. Le principe de la commande par la logique floue s'approche de la démarche humaine, elle permet d'exploiter l'expérience humaine dans le domaine de la commande avec la capacité de traiter les informations incertaines. Ainsi, elle présente l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique. Sur la base de ce principe, différentes réalisations ont vu le jour [2].

Le contrôle flou est considéré comme une technique de contrôle intelligent, il a été utilisé pour obtenir des résultats prometteurs pour nombreuses applications qui sont difficiles à traiter par des techniques classiques. Les implémentations de contrôle flou dans des différents domaines tels que l'environnement, médecine, transport... ect, a montré son efficacité et sa robustesse quant aux systèmes mal posés, il s'agit de contrôler les systèmes avec l'expertise humaine sans la connaissance de ses modèles mathématiques. Bien que les méthodes classiques de contrôle soient basées sur l'analyse quantitative du modèle mathématique d'un système, les contrôleurs flous opèrent sur une description linguistique de l'action de contrôle [3].

Le but de notre travail est d'étudier l'influence du nombre de règles floues d'un contrôleur flou (FLC) à entrée unique pour un modèle de véhicule sous-marin.

Afin de bien présenter notre travail, le mémoire s'articule sur les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous avons d'abord présenté les notions de base de contrôleur FLC à entrée unique, le fonctionnement des contrôleurs à logique floue, historique de la logique floue, Les types des systèmes flous, paramètres de conception d'un FLC, avantages, inconvénients de la commande floue et leurs types .

Le deuxième chapitre sera consacré à présenté la modélisation d'un véhicule sous-marin sans pilote (AUV), historique des véhicules sous-marins, principe de fonctionnement d'un sous-marin en général, Les différents types de véhicules sous-marins et leurs classification et la modélisation générale du véhicule ' robot ' sous-marin autonome.

Le dernier chapitre, porte essentiellement sur l'application et simulation du FLC sur un modèle linéaire d'un véhicule sous-marin sans pilote. Plusieurs stratégies et cas sont détaillés dans cette simulation selon le nombre de règles floues (RF), nombre d'entrées au FLC et l'absence ou la présence de la perturbation. L'objectif de cette application porte essentiellement sur l'influence du nombre de règles floues sur les performances du système régulé. Une comparaison de résultats de simulation obtenus se faite selon le changement à chaque fois du nombre de règles floues.

Enfin, une conclusion générale viendra faire le point sur notre travail et mettra en évidence les principaux résultats aux quels nous avons abouti ainsi que des perspectives qu'il permet d'ouvrir.

Chapitre I

Contrôleur FLC à entrée unique

I.1 Introduction

Le contrôle par logique floue (FLC) est le domaine de recherche le plus actif dans l'application de la théorie des ensembles flous, de l'inférence floue et de la logique floue. L'application du FLC s'étend du contrôle des processus industriels à l'instrumentation biomédicale et à la sécurité. Par rapport aux techniques de contrôle traditionnelles, le FLC a été mieux utilisé pour des problèmes complexes indéfinis, qui peuvent être contrôlés par un opérateur humain efficace sans connaître leur dynamique de base.

Dans ce chapitre, on va présenter le fonctionnement des contrôleurs à logique floue partant de la théorie de la logique floue.

I.2 Historique de la logique floue

I.2.1 Apparition de la logique Floue

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous ». Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques [4].

I.2.2 Premières applications

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smith réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue [4].

I.2.3 Essor

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « fuzzylogic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre

ainsi qu'à une moindre échelle aux USA. Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité [4].

I.3 Théorie de la logique floue

Le concept des ensembles flous a été introduit en 1965, comme moyen de représenter le flou dans les applications. Il a suggéré une théorie des ensembles modifiée dans laquelle un individu peut avoir une valeur qui varie sur un ensemble de valeurs au lieu d'être 0 ou 1, la théorie des ensembles floue est une extension à la théorie traditionnelle et la logique floue est la logique correspondante à la manipulation des ensembles flous.

Grâce à la logique floue, un système peut non seulement représenter des concepts imprécis tels que Rapide, Grand, etc., mais aussi, grâce à un ensemble de principes mathématiques solides, il peut également utiliser ces concepts pour faire des déductions sur le système. La logique floue vise à modéliser un raisonnement imprécis ou de bon sens pour des processus incertains, mal définis et complexes qui ne nécessitent pas un haut niveau de précision [5].

Un contrôleur de logique floue (CLF) utilise la logique floue pour déterminer le plan d'action. Il fournit un algorithme qui convertit la stratégie de contrôle linguistique basée sur les connaissances des experts en une stratégie de contrôle automatique. Le processus est contrôlé par des variables linguistiques plutôt que par des variables numériques [5].

Les CLFs sont une option attrayante lorsque le processus à contrôler est mal défini et nécessite normalement un opérateur humain qualifié. Au cours des dernières années, le contrôle par logique floue a été largement appliqué à une variété de problèmes de contrôle et s'est avéré être une bonne alternative aux méthodes de contrôle conventionnelles. Parmi les applications, mentionnons le contrôle des procédés de fours à ciment, le contrôle des robots, le traitement des images et l'exploitation automatique des trains [5].

I.3.1 Variables linguistiques

La notion essentielle de variable linguistique a été introduite, elle suggère d'emblée que les valeurs de cette variable ne sont pas numériques, mais plutôt symboliques, en termes de mots ou d'expressions du langage naturel [6].

Généralement une variable floue peut être représentée par un triplet (u, U, T_u) pour lequel u représente la variable définie sur un ensemble de référence U . L'ensemble $T_u = \{$

A_1, A_2, \dots fini ou infini, contient des sous ensembles flous dans un univers de discours normalisé U utilisables pour caractériser u .

Exemple:

u : Désigne la taille d'un être humain, l'univers des tailles en centimeters est :

$U = \{80 \ 90 \ 100 \ 110 \ 120 \ 130 \ 140 \ 150 \ 160 \ 170 \ 180 \ 191 \ 200 \ 205\}$

L'ensemble T_u est constitué par cinq ensembles flous :

$T_u = \{\text{très petit} \quad \text{petit} \quad \text{moyen} \quad \text{grand} \quad \text{très grand}\}$

L'ensemble T_u peut être écrit comme suit :

$0 \quad T_u \quad = \{TP \quad P \quad M \quad G \quad TG\}$

Avec:

$TP = \{80 \ 90 \ 100\}$, $P = \{110 \ 120 \ 130\}$, $M = \{140 \ 150 \ 160 \}$

$G = \{170 \ 180 \ 191\}$, $TG = \{200 \ 205\}$ [6]

I.3.2 Les ensembles flous et les Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est une classe d'objets dans laquelle la transition de l'appartenance aux non appartenances est graduelle au lieu d'être brusque. Une définition plus mathématique peut être établie comme suit [6]:

Si U est une collection d'objets ou de valeurs notés par " u ", alors un ensemble flou A dans U est défini par l'ensemble des paires ordonnées:

$$A = \{(u, \mu_a(u)) / u \in U\} \tag{I.1}$$

Où $\mu_a(u)$ est une fonction qui prend des valeurs comprises entre 0 et 1 et est appelée fonction d'appartenance. Elle caractérise l'ensemble flou A et fournit une mesure du degré d'appartenance d'un objet u de U dans l'ensemble flou A . Elle peut être notée comme suit [6]:

$$\mu_a: U \rightarrow [0,1]$$

$$U \rightarrow \mu_a(u)$$

U Peut contenir des valeurs continues ou discrètes.

Généralement, A s'écrit sous la forme:

$$A = \int \mu_a(u) / u \quad \text{Si } U \text{ est continu} \tag{I.2}$$

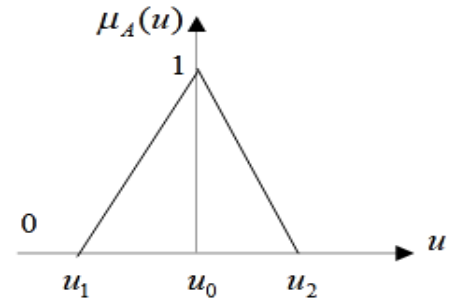
$$A = \sum_{u_i \in U} \mu_a(u_i) / u_i \quad \text{Si } U \text{ est discret} \tag{I.3}$$

Dans ces équations les signes d'intégral et de sommation ne désignent pas une intégration ou une addition arithmétique, respectivement, mais une collection de tous les points $u \in U$ avec leur fonction d'appartenance $\mu_a(u)$. Il existe différentes formes de

fonctions d'appartenances dont on peut signaler quelques unes: Les forms trapézoïdales et triangulaires sont les plus utilisées[6].

• **Triangulaire**

$$\mu_a(u) = \begin{cases} \frac{u_1-u}{u_1-u_0} & \text{si } u \in [u_1, u_0] \\ \frac{u-u_2}{u_0-u_2} & \text{si } u \in [u_0, u_2] \end{cases}$$



• **Trapèze**

$$\mu_a(u) = \begin{cases} \frac{u-u_1}{u_2-u_1} & \text{si } u \in [u_1, u_2] \\ 1 & \text{si } u \in [u_2, u_3] \\ \frac{u-u_4}{u_3-u_4} & \text{si } u \in [u_3, u_4] \end{cases}$$

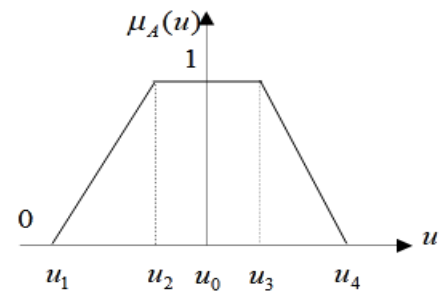


Figure I.1 les différentes fonctions d'appartenances.

Toutes les opérations normales de réglage peuvent être définies sur des réglages flous. Ce sont des opérateurs de logique floue qui agissent sur des fonctions organiques qui représentent des variables linguistiques. Soit A et B deux ensembles flous en U avec les fonctions appurtenance μ_A et μ_B . Les opérations traditionnelles de théorie des ensembles d'union, d'intersection et decomplément des sous-ensembles classiques de X peuvent être étendues aux ensembles flous par leurs fonctions d'appartenance [5],[7].

• **Opérateur OU (l'union)**

La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ pour l'ensemble flou $A \cup B$ est définie comme suit:

$$\mu_{\cup}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \text{ pour } u \in U \tag{I.4}$$

• **Opérateur ET (l'intersection)**

La fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ pour l'ensemble flou $A \cap B$ est définie comme suit :

$$\mu_{\cap}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \text{ pour } u \in U \tag{I.5}$$

• **Opérateurs NON (complément)**

On définit la fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ pour l'ensemble flou \bar{A} par :

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \text{ pour } u \in U \quad (I.6)$$

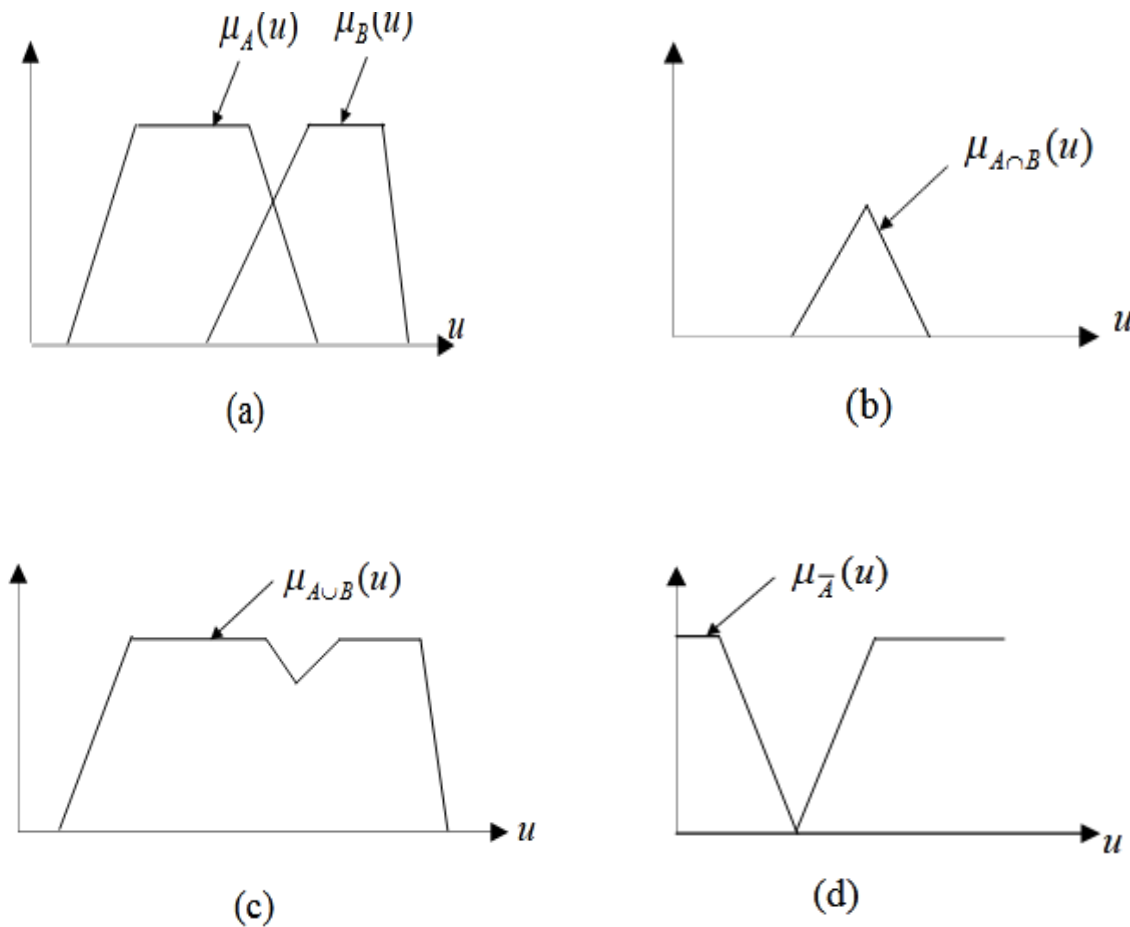


Figure I.2 Opérateurs logiques: (a) A et B; (b) $A \cap B$; (c) $A \cup B$; (d) \bar{A}

I.3.4 Logique floue

La logique floue est la logique correspondant aux ensembles flous. Dans la logique à deux valeurs classiques, ou la logique booléenne ou binaire, une proposition est soit vraie, soit fausse. Les seules valeurs d'appartenance permises sont 0 ou 1. Chaque élément de l'univers du discours est soit un membre à part entière de l'ensemble, ne soit pas du tout un membre. Deux logiques importantes fonctionnent bien pour les problèmes qui sont linéaires et les systèmes qui peuvent être modélisés avec précision et elle s'est avérée efficace pour résoudre ces problèmes. Dans une logique multi-valeur, une proposition peut être vraie, fausse ou avoir une valeur de vérité intermédiaire. L'ensemble des valeurs de vérité est censé être également réparti sur l'intervalle $[0, 1]$. En logique floue, la fonction d'appartenance peut avoir des valeurs comprises entre 0 et 1 [5].

I.3.5 Règles d'inférence floue

Une règle d'inférence floue ou une relation floue est souvent exprimée par la structure logique conditionnelle 'Si-alors'. Ils sont de la forme "Si A alors B", où A et B sont des ensembles flous caractérisés par des fonctions d'appartenance appropriées. Ces règles tendent à rendre compte de l'imprécision du raisonnement humain lorsqu'il s'agit de prendre une décision dans un environnement d'incertitude et d'imprécision. Par exemple, une règle floue pour contrôler le courant dans le compresseur à l'intérieur d'un climatiseur pourrait s'écrire comme suit : " Si la température est élevée et que l'humidité est basse, Alors fournissez une quantité modérée de courant ". La condition "Si" s'appelle l'antécédent et "Alors" s'appelle la conséquence. De telles règles sont généralement obtenues à partir des connaissances de système et reflètent l'expérience et le savoir-faire d'experts humains [5].

Une autre forme de règles floues, proposée par Takagi et Sugeno, montre l'implication des ensembles flous uniquement dans la partie des prémisses. Un exemple de règle floue utilisant la règle d'inférence floue de Takagi et Sugeno peut être donné par :

Si la vitesse est élevée **Alors:**force= k *(vitesse)

Où une valeur linguistique représentée par une fonction d'appartenance est élevée dans la partie antécédente. Le résultat est une équation non floue, c'est-à-dire que les variables de sortie sont numériques. Pour la mise en oeuvre informatique d'une règle floue, les valeurs linguistiques haute, basse et modérée doivent être associées à des valeurs numériques. La théorie des ensembles flous permet de définir ces termes au moyen de fonctions d'appartenance et d'attribuer ces valeurs qualitatives aux ensembles flous[5].

I.4 Types des systèmes flous:

Il ya trois type de systèmes flous :

I.4.1 Modèle flou de type Mamdani

Le modèle flou de type Mamdani a d'abord été proposé pour tenter de contrôler une machine à vapeur et une chaudière en utilisant un ensemble de règles de contrôle linguistiques obtenues auprès d'un opérateur humain expérimenté (Mamdani et Assilian, 1974). La Figure I.3 illustre un modèle flou de type Mamdani à deux entrées et une sortie unique [4].

Une règle typique dans un modèle flou de type Mamdani à deux entrées et une sortie unique a la forme [4].

Si x est A et y est B, Alors z est C (I.6)

Dans le modèle flou de Mamdani, des valeurs précises sont utilisées comme entrées et la défuzzification est utilisée pour convertir un ensemble flou en une valeur précise.

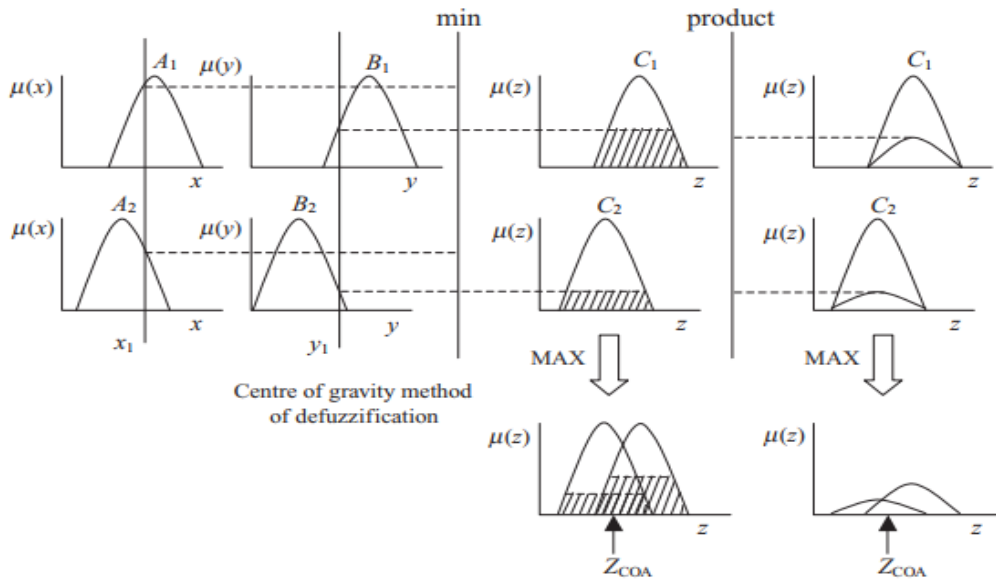


Figure I.3 Modèle flou de type Mamdani

I.4.2 Modèle flou de type Sugeno

Le modèle flou de type Sugeno, également connu sous le nom de modèle flou TSK, a été proposé par Takagi, Sugeno et Kang (Takagi et Sugeno, 1985 ; Sugeno et Kang, 1988) dans le but de développer une approche systématique pour générer des règles floues à partir d'un ensemble donné de données d'entrée/sortie. Une règle floue typique dans un modèle flou de Sugeno a la forme [4] :

Si x est A et y est B, Alors z = f (x,y) (I.7)

Habituellement, $f(x, y)$ est un polynôme dans les variables d'entrée x et y mais il peut s'agir de n'importe quelle fonction tant qu'elle peut décrire de manière appropriée la sortie du modèle dans la région floue spécifiée par l'antécédent de la règle (Wang et Langari, 1995).

La Figure I.4 illustre un modèle Sugeno à deux entrées et une seule sortie [4].

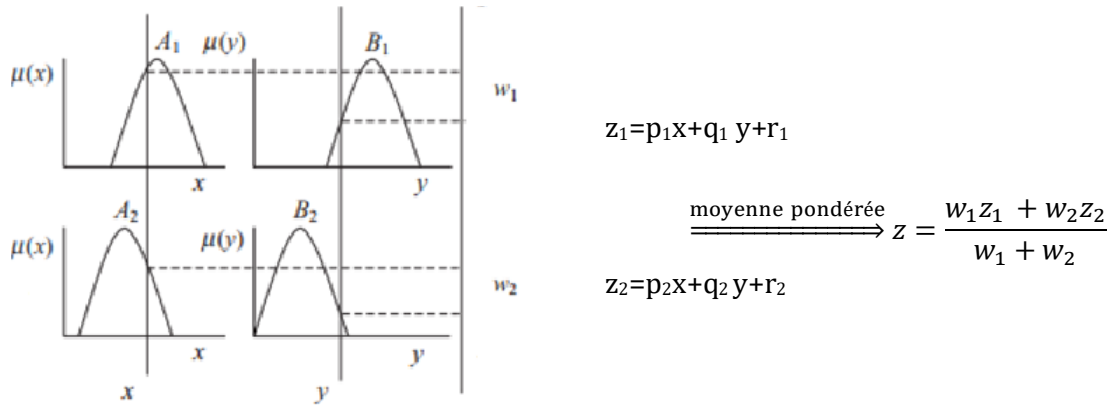


Figure I.4 Modèle flou de type Sugeno

I.4.3 Modèle flou de type Tsukamoto

Dans le modèle flou de type Tsukamoto, la conséquence de chaque règle si-alors floue est représentée par un ensemble flou avec une fonction d'appartenance monotone (Tsukamoto, 1979). En conséquence, la sortie déduite de chaque règle est définie comme une valeur précise incluse dans la détermination de force d'activation de la règle. La production globale est considérée comme la moyenne pondérée de la production de chaque règle La Figure 1.5 illustre un modèle flou de Tsukamoto à deux entrées et une seule sortie [4].

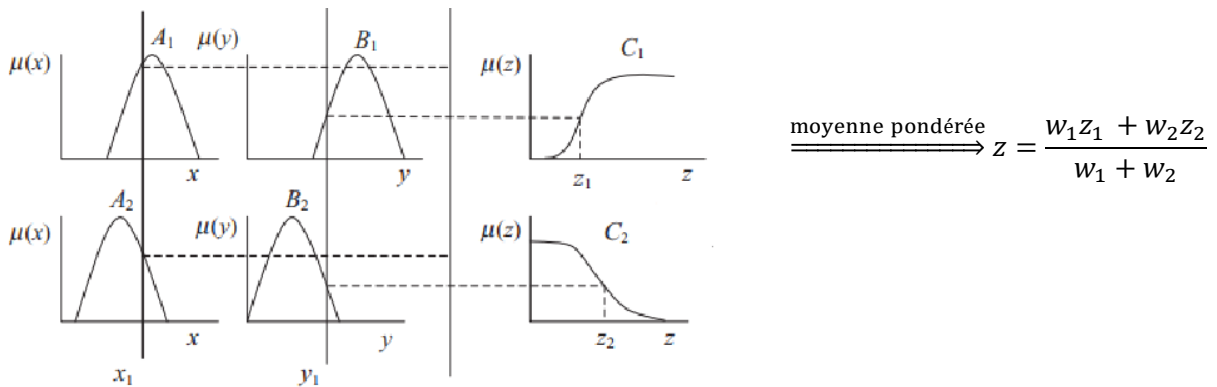


Figure I.5 Modèle flou de type Tsukamoto

I.4.4 Règle du produit de Larsen

Le modèle de règle de Larsen sur les produits est similaire au modèle flou de Mamdani. La seule différence est qu'il prend le produit des fonctions d'appartenance conséquentes comme le montre la Figure I.6, qui est une illustration d'un modèle flou de type

Mamdani à deux entrées et une seule sortie. Une règle typique avec deux entrées et une seule sortie a la forme [4].

$$\text{Si } x \text{ est } A \text{ et } y \text{ est } B, \text{ Alors } z \text{ est } C \quad (I.8)$$

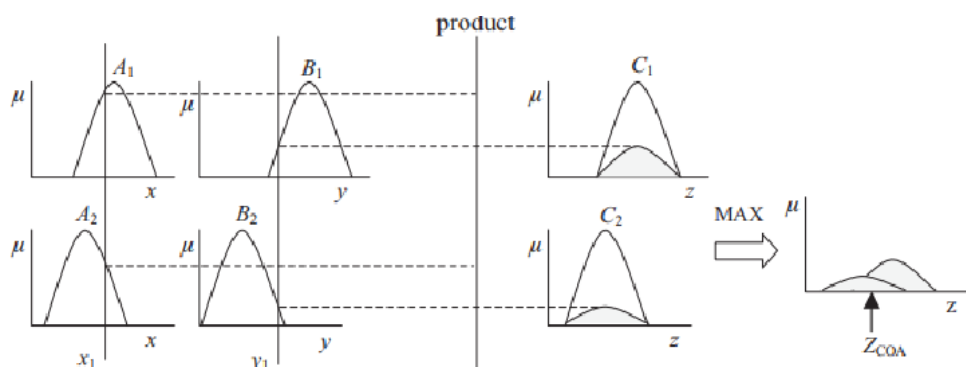


Figure I.6 modèle de règle de Larsen sur les produits.

I.5 Contrôleur à logique floue

L'avis essentiel de la commande logique floue est la règle de la commande linguistique. Qui peut prendre plusieurs formes. Cependant, elle indique invariablement quelle action de commande prendre face à une condition donnée. Cette condition peut être une diminution ou augmentation de la grandeur à régler, comme par exemple le cas du réglage de la vitesse d'une machine électrique.

La conjoncture peut être une augmentation ou une diminution de la vitesse ou du couple, face aux variations paramétriques de la machine ou une variation du moment d'inertie de la partie tournante [7].

Ces actions de commande peuvent avoir la forme : «si l'erreur de vitesse est assez grande», «si la variation de l'erreur est trop petite» .

Les variables floues dans ce cas sont l'erreur et la variation de l'erreur, la sortie est la commande c'est la tension d'alimentation. Les mots clés sont « assez grande», « beaucoup», «trop petite»...qui représentent des informations imprécises mais utiles et sont représentées par un sous ensemble flou d'un univers de discours. Une règle de commande dans ce cas est la combinaison d'une condition et d'une action [7].

Le contrôleur à logique floue est un algorithme de conversion d'une stratégie de commande linguistique basée sur l'expertise humain en une stratégie de contrôle automatique décrit par un ensemble de règles de contrôle flou du type :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 : \text{si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ alors } Z \text{ est } C_1 \\ R_2 : \text{si } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2 \text{ alors } Z \text{ est } C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ R_n : \text{si } x \text{ est } A_n \text{ et } y \text{ est } B_n \text{ alors } Z \text{ est } C_n \end{array} \right. \quad (I.9)$$

Ces règles sont liées par le concept de l'implication floue et la règle compositionnelle "sup-star". Chaque règle de contrôle flou est représentée par une relation floue, le système flou est caractérisé par une seule relation floue qui est déterminée par la combinaison de toutes les règles floues à savoir :

$$R = \text{ALSO} (R_1, \dots, R_n) \quad (I.10)$$

La structure générale d'un contrôleur à logique floue est montrée par la figure (I.6) [7].

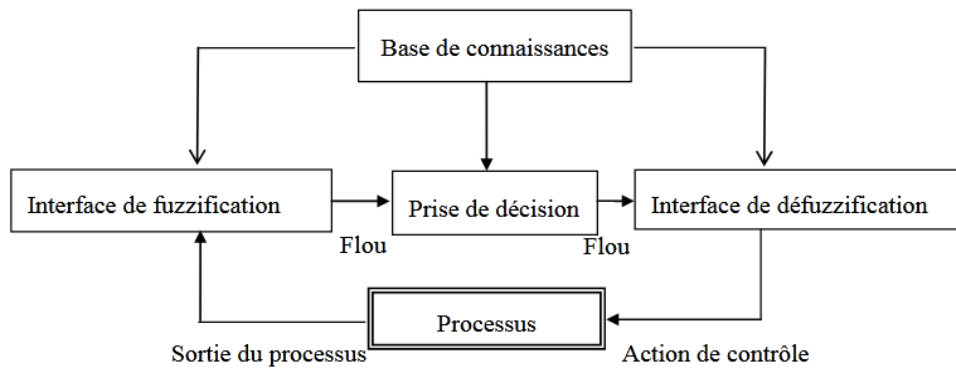


Figure I.7 Synoptique d'un contrôleur flou

I.5.1 Interface fuzzification

L'interface fuzzification consiste à [8] :

- Mesurer les valeurs numériques des variables d'entrées.
- Les projeter dans l'univers de discours en utilisant un facteur d'échelle.
- Transformer ces valeurs numériques en valeurs linguistiques convenable en utilisant des fonctions d'appartenances qui servent à subdiviser l'espace d'entrée, univers du discours en sous ensembles flous .

I.5.2 Base de connaissances

Elle contient les informations du domaine d'application et le but de contrôle, elle est définie par les deux principales bases suivantes [8] :

- **Base de données**

Elle fournit les informations nécessaires qui sont utilisées pour l'exploration des règles de contrôleur flou ainsi que pour la manipulation des données dans un FLC [7].

- **Base de règles**

Elle caractérise le but et la politique du contrôle flou via un ensemble de règle de contrôle flou[7].

I.5.3 Logique de décision (moteur d'inférence)

C'est le noyau du FLC; elle est capable de simuler les décisions humaines basées sur le concept flou et d'inférer des actions de contrôle flou par l'intervention de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue [8].

I.5.4 Défuzzification

Elle consiste à :

- Transformer les valeurs de la sortie comprises dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation.
- Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie[8].

I.6 Paramètres de conception d'un FLC

Les étapes de conception du contrôleur à logique floue sont les suivantes :

I.6.1 Stratégie de fuzzification

La fuzzification joue un rôle fondamental pour la manipulation des données en FLC qui est fondée sur la théorie des ensembles flous, elle consiste à convertir des valeurs numériques en une valeur linguistique via des fonctions d'appartenance. On peut dire que la stratégie de fuzzification est un choix de l'univers de discours et des formes des fonctions d'appartenance [8].

I.6.2 Base de données

- **Normalisation**

Elle consiste à normaliser l'univers de discours U dans une période bien définie.

- **Partition floue de l'espace d'entrée et de sortie**

C'est la division de l'univers de discours en plusieurs ensembles flous, et il est divisé entre trois et neuf ensembles flous [8].

I.6.3 Base de règle

Quatre possibilités existe pour l'exploration de la base de règle, la première est basée sur l'expertise humaine, la deuxième est fondée sur les actions de contrôle fournis par un opérateur, la troisième est l'utilisation du modèle flou de processus, et la quatrième

qui est la plus récente, elle est basée sur un algorithme d'entraînement pour l'élaboration des règles [8].

I.6.4 Inférence

Il existe deux types d'inférence :

- **Inférence à une seule règle**

C'est la comparaison de plusieurs concurrents dans une même situation et le résultat est le choix de l'optimum, ce type d'inférence n'est pas utilisé pour le contrôle flou [7].

- **Inférence à plusieurs règles**

Dans ce type d'inférence, la prise de décision pour une ou plusieurs variables est différente pour chacune des variables, c'est l'inférence qui est utilisée dans les problèmes de réglage et de commande par logique floue. Les variables sont, soit des variables déterministes, ou des variables floues. L'exemple de réglage de la température d'un local est cité pour bien cerner ce type d'inférence.

La règle est la variation de la position de la valve, ainsi l'objet de réglage est de minimiser l'écart. Pour se faire, les étapes suivantes dites règles d'inférences sont appliquées [7].

Si $e > 0$ alors $\Delta U > 0$ ou

Si $e < 0$ alors $\Delta U < 0$ ou

Si $e = 0$ alors $\Delta U = 0$

Avec ΔU : un variable flou

e : variable linguistique

Les décisions de la sortie ΔU sont données par expériences humaines, les règles d'inférences peuvent être représentées par la figure (I.8).

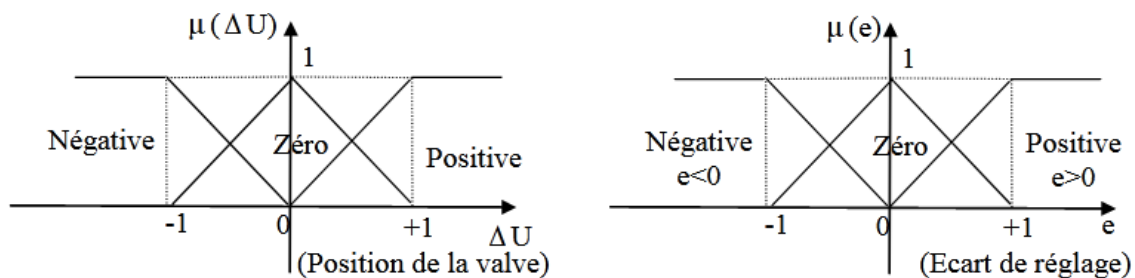


Figure I.8 Exemple d'inférence à plusieurs règles.

Notons que l'inférence est le bloc essentiel ou la stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles liées les grandeurs mesurées qui sont les

variables d'entrée (x) transformées en variables floues par la fuzzification en variable de sortie (x_R) qui est aussi une variable floue [7].

La formation concrète des règles d'inférence dépend évidemment du comportement statique et dynamique du système à règle et de l'organe de commande, ainsi que des buts de réglage envisagés. Sachant qu'il n'est pas possible d'indiquer des règles précises, l'expérience joue un rôle important [7].

- **Traitement numérique des inférences**

Après avoir établi toutes les règles d'inférence on peut les représenter par un tableau ou par une matrice. Un traitement numérique des inférences selon l'une des trois méthodes suivantes est à exécuter [7].

- 1) Méthode d'inférence max-min ;
- 2) Méthode d'inférence max-prod ;
- 3) Méthode d'inférence somme-prod.

Considérons un ensemble de deux règles définies par :

R1 : si x est A1 et y est B1, alors Z est C1 ou

R2 : si x est A2 et y est B2, alors Z est C2

1) Méthode d'inférence max-min

Cette méthode est appliquée au contrôleur dit de type «Mandani». Dans ce mode de raisonnement, la $i^{\text{ème}}$ règle aboutit à la décision de contrôle [7] :

$$\mu_{Ri} = \mu_{RM}(\alpha_i, \mu_{ei}(Z)) = \min(\alpha_i, \mu_{ei}(Z))$$

Avec $\alpha_i = \mu_{RM}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \min(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0))$ qui représente la valeur de vérité des règles d'inférences.

Le résultat des deux règles est construit comme suit :

$$\mu_{ROS}(Z) = \max[\mu_{R1}(Z), \mu_{R2}(Z)] \quad (I.11)$$

2) Méthode d'inférence max-prod

C'est la méthode appliquée au contrôleur dite de type « Larsen », cette méthode est basée sur l'utilisation du produit pour l'implication, dans ce cas la $i^{\text{ème}}$ règle donne la décision :

$$\mu_{Ri} = \alpha_i \cdot \mu_{ei}(Z)$$

Avec $\alpha_i = \mu_{RM}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \min(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0))$

La fonction d'appartenance résultante est donnée par :

$$\mu_{ROS}(Z) = \max[\mu_{R1}(Z), \mu_{R2}(Z)] \quad (I.12)$$

3) Méthode d'inférence som-prod

Cette méthode est appliquée au contrôleur dit de type « Zadeh ». Elle est définie comme suit:

$$\begin{aligned}\mu_{Ri} &= \alpha_i \cdot \mu_{ei}(Z) \\ \alpha_i &= \mu_{Rp}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0) \\ \mu_{ROS}(Z) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_{Ri}\end{aligned}\quad (I.13)$$

Avec : m nombre de règle [7].

I.6.5 Stratégie de défuzzification

Pour bien définir la loi de commande, le contrôleur flou doit disposer d'une procédure de défuzzification qui joue le rôle de convertir la commande floue en une valeur physique pour chaque état du processus. L'interface de défuzzification vise à transformer la sortie en valeurs non floues permettant ainsi contrôle efficace du système. Il existe plusieurs stratégies de défuzzification dont les plus utilisées sont [7] :

- Méthode du maximum ;
- Méthode de la moyenne des maximums ;
- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode des hauteurs pondérées

1) Méthode du maximum

Pour cette méthode, la commande est égale à la commande locale ayant la fonction d'appartenance maximale

$$U = \text{MAX}_{Z \in S}(\mu_{ROS}(Z)) \quad (I.14)$$

Ou S est le support de μ_{ROS}

Dans le cas général : U est indéterminé lorsque il existe plusieurs points qui maximisent $\mu_{ROS}(Z)$.

Pour cette raison on fait appel à la méthode des maximums [7].

2) Méthode de la moyenne des maximums

Cette stratégie de défuzzification génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle ayant des fonctions d'appartenance maximales. Dans le cas d'un univers de discours discret, l'action de commande est exprimée par :

$$U = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m Z_i \quad (I.15)$$

Ou : Z_i est la valeur de la commande avec laquelle la fonction d'appartenance associée atteint la valeur maximale $\mu_{ROS}(Z)$

L : est la nombre total des valeurs prises par la fonction d'appartenance [7].

3) Méthode du centre de gravité

Également appelé méthode du centre de la zone ou centroïde dans la littérature, C'est la méthode la plus utilisée qui consiste à déterminer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{ROS}(Z)$

Dans ce contexte il suffit de calculer l'abscisse U du centre de gravité comme suite :

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot \mu_{ROS}(Z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{ROS}(Z_i)} \quad (I.16)$$

Ou n : est le nombre des niveaux de la sortie du contrôleur. Par cette méthode, en aboutit à une solution unique.

4) Méthode des hauteurs pondérées

Cette méthode consiste à calculer la sortie du contrôleur en utilisant les centres de gravité Z^* de chacun des ensembles C_i

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i^* \mu_{C_i}(Z_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{C_i}(Z_i)} \quad (I.17)$$

Ou m : est le nombre d'ensembles flous associés à la variable de sortie U [7].

I.7 Avantages et inconvénients de la commande floue

Les différents avantages et inconvénients sont [9]:

I.7.1 Avantages

1. La théorie est simple et s'applique a des systèmes complexes.
2. Pas de modèles mathématiques requis du procédé a asservir.
3. Robustesse de la commande floue vis a vis des incertitudes.
4. Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé[9].

I.7.2 Inconvénients

1. Technique de réglage essentiellement empirique.
2. Performances dépendent de l'expertise.
3. Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse (Difficultés de certification dans le transport, espace...) [9].

I.8 Types de contrôleur flou

Un contrôleur flou peut être construit en utilisant e , Δe et $\sum e$ comme entrées et l'entrée de commande u comme sortie en fonction du type de contrôleur, par exemple type PD, PI ou PID [4].

I.8.1 FLC de type P

L'équation pour un contrôleur conventionnel de type proportionnel (P) est donnée par

$$u = k_p \cdot e(k) \tag{I.18}$$

Où k_p est le coefficient de gain proportionnel. La règle pour un contrôleur de type P est donnée dans forme symbolique

$$\text{si } e \text{ est } A_i, \text{ alors } u \text{ est } B_j \tag{I.19}$$

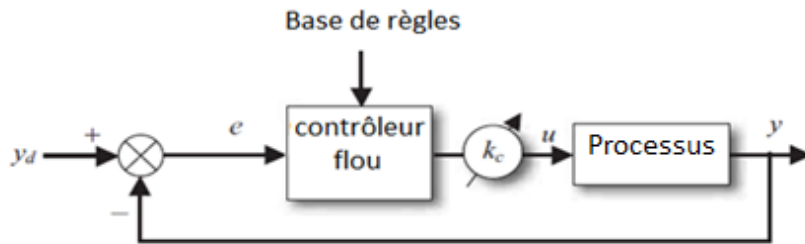


Figure I.9 Schéma fonctionnel d'un CLF de type P avec erreur

où A_i et B_j , $j = 1, 2, \dots, n$, sont les variables linguistiques. La Figure I.9 montre le bloc Schéma d'un contrôleur flou à entrées unique à sortie unique de type P pour une installation. La fonction de la sortie de commande pour un tel système à entrées unique à sortie unique (SISO) est alors une courbe, comme illustré dans la Figure I.10 pour $n = 4$ [4].

I.8.2 FLC de type PD

Un FLC de type différentiel proportionnel (PD) conventionnel peut être développé par en utilisant un modèle d'erreur et de changement d'erreur comme

$$u = k_p \cdot e + k_d \cdot \Delta e \tag{I.20}$$

où k_p et k_d sont les coefficients de gain proportionnel et différentiel et e est l'erreur, Δe est le changement d'erreur. Dans ce type de CLF, on suppose qu'aucun modèle mathématique pour le système est disponible sauf deux états, à savoir l'erreur et le changement d'erreur. Seule la sortie y est mesurée à partir du système et l'erreur et le changement d'erreur sont dérivés. L'erreur et le changement d'erreur sont définis comme

$$e(k) = y_d - y(k) \tag{I.21}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{I.22}$$

Où y_d est la sortie souhaitée et $y(k)$ est la sortie réelle. La Figure I.11 montre le schéma fonctionnel d'un CLF de type PD avec erreur et changement d'erreur en entrée [4].

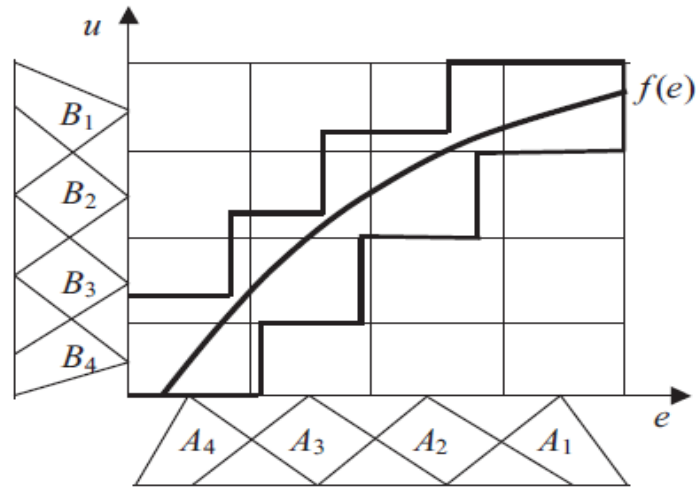


Figure I.10 Fonction de la sortie de commande pour les systèmes SISO

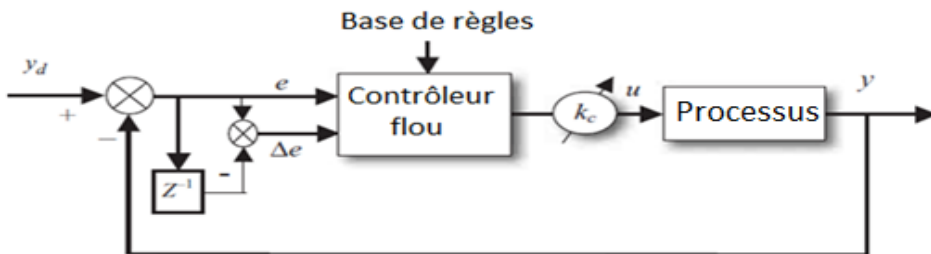


Figure I.11 Schéma fonctionnel d'un CLF de type PD.

Le CLF se compose de règles de la forme :

$$\text{Si } e \text{ est } A_i \text{ et } \Delta e \text{ est } B_j \text{ alors } u \text{ est } C_k \tag{I.23}$$

Où A_i, B_j et C_k sont les variables linguistiques et $i = 1, \dots, n_1, j = 1, \dots, n_2$ et $k = 1, \dots, m$

La surface de contrôle d'un système à deux entrées et à sortie unique (MISO) est illustrée à la Figure I.12 où X et Y représentent les entrées et Z représente la sortie du contrôleur. Pour un contrôleur de type PD, X représente l'erreur et Y représente le changement d'erreur. Pour un contrôleur de type PI, X représente une erreur et Y représente la somme des erreurs [4].

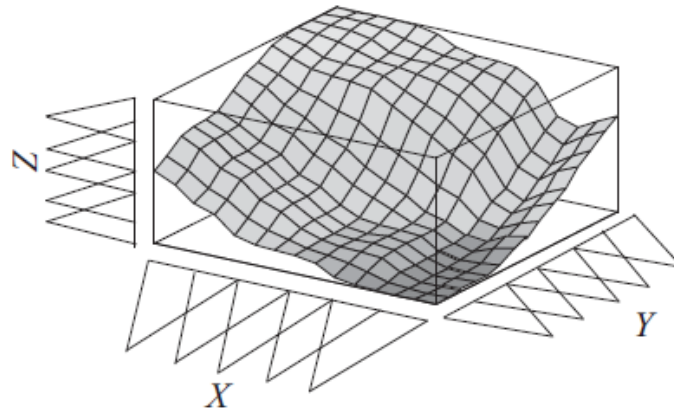


Figure I.12 Surface de contrôle d'un système à sortie unique à deux entrées

I.8.3 FLC de type PI

Un contrôleur conventionnel de type proportionnel-intégral (PI) est décrit comme [4]:

$$u = k_p e + k_i \int e \, dt \quad (I.24)$$

où k_p et k_i sont les coefficients de gain proportionnel et intégral. Prendre le dérivé par rapport au temps de l'équation donne

$$\dot{u} = k_p \cdot \dot{e} + k_i \cdot e \quad (I.25)$$

qui peut être réécrit comme

$$\Delta u = k_p \cdot \Delta e + k_i \cdot e \quad (I.26)$$

Cela donne une équation de contrôleur incrémentielle de type PI. La base de règles CLF de type PI en conséquences compose de règles de la forme

$$\text{Si } e \text{ est } A_i \text{ et } \Delta e \text{ est } B_j \text{ alors } \Delta u \text{ est } C_k \quad (I.27)$$

Dans ce cas, pour obtenir la valeur de la sortie de contrôle $u(k)$, le changement de sortie de contrôle $\Delta u(k)$ est ajouté à $u(k-1)$ de telle sorte que

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (I.28)$$

Une autre façon d'exprimer le contrôleur de type PI est le contrôleur de type PI intégral absolu:

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \sum e \quad (I.29)$$

Où $\sum e$ est la somme des erreurs, k_p et k_i sont les coefficients de gain proportionnel et intégral. Le CLF absolu de type PI se compose de règles de la forme

$$\text{si } e \text{ est } A_i \text{ et } \sum e \text{ est } B_j \text{ alors } u \text{ est } C_k \quad (I.30)$$

Où A_i , B_j et C_k sont les variables linguistiques. Un schéma de principe du CLF absolu de type PI est illustré à la Figure I.13. Dans ce type, la sortie est mesurée à partir du système et l'erreur et la somme des erreurs est dérivée [4].

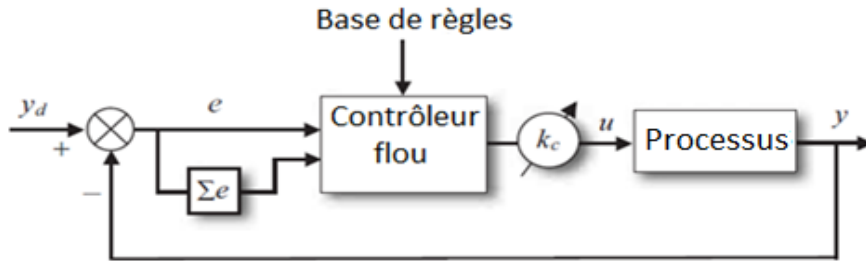


Figure I.13 Schéma fonctionnel d'un CLF de type PI

I.8.4 FLC de type PID

Une option supplémentaire pour obtenir de meilleures performances en termes de temps de montée, le temps de stabilisation, le dépassement et l'erreur en régime permanent consiste à développer un contrôleur à dérivée proportionnelle intégrale (PID) de type CLF Figure I.14. L'idée de base d'un contrôleur PID est de choisir la loi de commande en considérant l'erreur e , le changement d'erreur Δe et l'intégrale de l'erreur Σe (ou $\int_0^t e dt$). Le flou de type PID le contrôleur est décrit par :

$$u_{PID} = K_p \cdot e + K_d \cdot \Delta e + k_i \cdot \int_0^t e \cdot dt \quad (I.31)$$

En remplaçant l'intégrale du terme d'erreur $\int_0^t e dt$ avec la somme du terme d'erreur e , le type PID contrôleur flou en temps discret est décrit par

$$u_{PID} = K_p \cdot e + K_d \cdot \Delta e + k_i \cdot \Sigma e \quad (I.32)$$

La règle de contrôle flou correspondant au contrôleur PID Figure I.13

$$A_i \text{ et } \Delta e \text{ est } B_j \text{ et } \Sigma e \text{ est } C_k \text{ alors } u \text{ est } D_l \quad (I.33)$$

Où $i = 1, \dots, n_1$, $j = 1, \dots, n_2$, $k = 1, \dots, n_3$ et $l = 1, \dots, m$. Théoriquement, le nombre de règles pour couvrir toutes les combinaisons et variations d'entrée possibles pour un contrôleur est $n_1 \times n_2 \times n_3$, où n_1 , n_2 et n_3 sont le nombre des valeurs linguistiques des trois variables d'entrée [4].

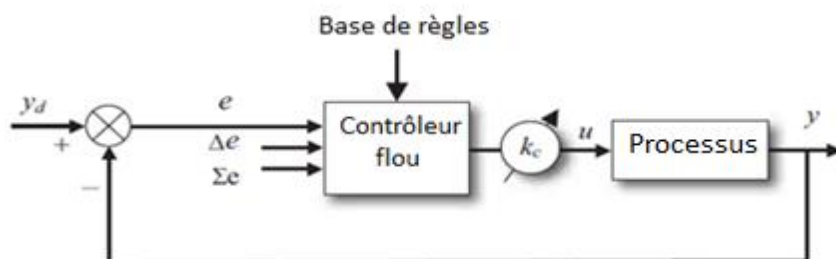


Figure I.14 Schéma fonctionnel de CLF de type PID

I.9 Surface de décision floue

Cette forme de non linéarité en trois dimensions, mise en œuvre par le contrôleur flou, est appelée parfois "la Surface de Contrôle," elle est affectée par tous les paramètres principaux du contrôleur flou [9].

Exemple : Système de notation flou (figure I.15).

On choisit :

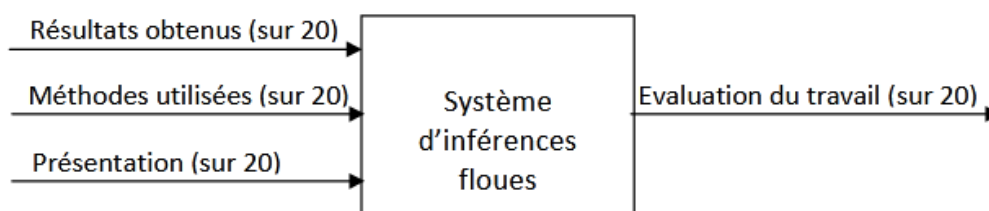


Figure I.15 Exemple d'un système de notation floue.

- **Exemple de base de règles**

If (Resultat est excellent) **then** (Evaluation est excellente)

If (Resultat est moyen) **then** (Evaluation est moyenne)

If (Resultat est mediocre) **then** (Evaluation est mediocre)

If (Resultat est moyen) **and** (Methode est mediocre) **then** (Evaluation est mauvaise)

Considérons, par exemple, la surface de contrôle pour ce système de notation flou qui a abouti à la réponse montrée dans la Figure 1.16 [9].

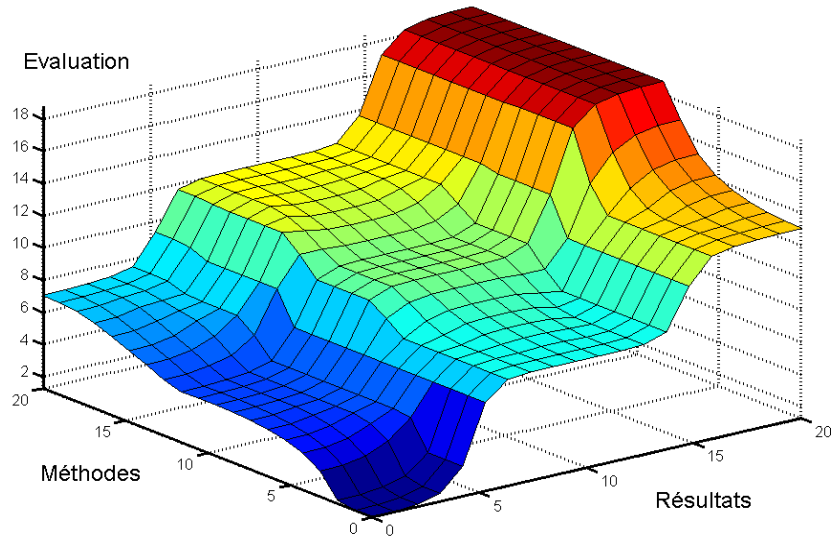


Figure 1.16 Surface de décision floue.

- **Caractéristique de la surface floue**
 - Décision selon un système d'inférence flou.
 - Non linéaire (figure I.16).
 - Plus proche du comportement humain [9].

I.10 Architecture d'une commande floue

On parle de la commande floue lorsque la partie d'un automatisme est réalisée en logique floue. Sa mission est la même que celle d'un contrôleur classique à savoir : gérer les données de commande et de contrôle du processus. La structure de l'automatisme peut donc être ramené à un système asservi, voir figure I.17 [6].

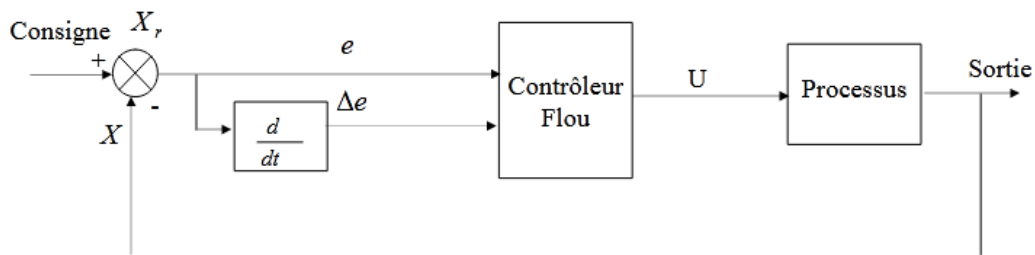


Figure I.17 Architecture d'une commande floue

A partir de la valeur de la variable de sortie, le contrôleur flou permet de déterminer la commande appropriée à appliquer au processus. Celle-ci est calculée généralement pour les systèmes automatiques grâce aux deux entrées e et Δe et l'inférence des règles floues. En général, (e) représente l'écart entre le signal de sortie du processus et la consigne

$$e(k) = X_r(k) - X(k) \quad (I.34)$$

(Δe) Est la variation de l'erreur entre le signal de sortie du processus et la consigne [6].

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (I.35)$$

I.11 conclusion

Le contrôle flou est une théorie très puissante pour tirer des conclusions et générer des réponses à partir d'informations vagues, incomplètes et imprécises, lorsque le modèle du système est inconnu ou difficile à formuler.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements théoriques de la logique floue, les intérêts ainsi que le principe du système d'inférence floue, et les paramètres de conception FLC.

Dans le chapitre suivant, on va parler sur les véhicules sous-marins sans pilote puis nous aurons appliqué les notions du FLC sur ce type de véhicules.

Chapitre II

Véhicules sous-marin sans pilote

II.1 Introduction

Un véhicule sous-marin autonome (AUV) est un engin robotique propulsé dans l'eau par un système de propulsion, contrôlé et piloté par un ordinateur de bord, et manoeuvrable en trois dimensions. Ce niveau de contrôle, dans la plupart des conditions environnementales, permet au véhicule de suivre des trajectoires préprogrammées précises où et quand cela est nécessaire. Les capteurs à bord de l'AUV échantillonnent l'océan au fur et à mesure que l'AUV le traverse, offrant la possibilité d'effectuer des mesures à la fois spatiales et chronologiques. Les données de capteur collectées par un AUV sont automatiquement référencées géospatialement et temporellement et normalement de qualité supérieure. Les levés à plusieurs véhicules augmentent la productivité, peuvent assurer un échantillonnage temporel et spatial adéquat et fournissent un moyen d'étudier la cohérence de l'océan dans le temps et dans l'espace[10].

Les applications des engins sous-marins sont potentiellement très vastes qu'ils sont devenus des outils indispensables pour l'homme lorsqu'il doit intervenir dans un environnement dangereux. Elle touche particulièrement deux secteurs principaux [11] :

1. Secteur civil : Trois applications principales de la robotique sous-marine peuvent être distinguées : l'industrie, l'environnement et les applications scientifiques.
2. Secteur militaire : L'une des applications militaires les plus étudiées concerne la détection et la destruction des mines sous-marines. La destruction de ces objets est une tâche dangereuse et spécifique, car des dispositifs robotiques peuvent localiser et neutraliser ces bombes à la place des humains. Autre activité en plein essor, la surveillance portuaire : pour éviter les interférences de plongeurs ou même de véhicules sous-marins ennemis dans les ports, des robots autonomes peuvent mettre en place un réseau dans une zone proche de l'entrée du port [11].

II.2 Historique des véhicules sous-marins

Le concept de sous-marin remonte à l'antiquité. La première cloche de plongée appelée aussi "Tonneau d'Alexandre" devait être utilisée par Alexandre le Grand. La machine se compose d'un grand tonneau en verre, ouvert par le bas. Cette cloche est capable de descendre verticalement dans l'eau à l'aide d'une corde jusqu'à 20 mètres de

profondeur. La légende raconte qu'Alexandre le Grand lui-même a utilisé la première cloche de plongée pour observer les créatures marines. La cloche de plongée est l'un des premiers équipements qui a permis à l'homme d'explorer sous l'eau [11].

A l'époque moderne, l'Anglais William Bourne fait le premier pas vers le concept de voiture sous-marine en 1578, en concevant un modèle étanche pouvant être alimenté en oxygène. Mais ses idées n'ont pas dépassé le stade de la conception.

Entre 1620 et 1624, le Hollandais Cornelis van Drebbel aurait navigué quelques mètres sous les eaux de la Tamise. Il finit par proposer en 1664 le premier véhicule sous-marin à avancer à l'aide de 12 rameurs équipés d'avirons spéciaux. Il a une forme ovale, il peut être tourné afin d'effectuer des mouvements verticaux. Il a même été testé expérimentalement [12].

En 1690, à Marburg, en Allemagne, le Français Denis Papen a développé deux modèles de sous-marin. Le premier modèle est un parallélépipède en fer hautement renforcé et texturé, dans lequel le scientifique comprime l'air à l'aide d'une pompe. Après un test de pression au sol réussi, cet engin a été accidentellement détruit en tombant d'une grue, juste avant son lancement. Vers 1692, un deuxième modèle de sous-marin est construit. Dennis Papin rapporte avoir apporté plusieurs améliorations : la structure en forme de tonneau, cette fois résiste naturellement à la pression de l'eau, et ne nécessite donc plus l'utilisation d'air comprimé. L'air y circule grâce à une pression d'air extérieure, grâce à une pompe à air centrifuge, et des tuyaux en cuir fixés à la surface de l'eau par une vessie flottante. La pompe à eau permet d'apporter ou de sortir un autre lest supplémentaire pour la plongée ou la remontée à la surface. La profondeur de plongée est évaluée à l'aide d'un baromètre, mesurant cette fois la pression de l'eau à l'extérieur [11].

En 1775, l'Américain David Bushnell met au point une tortue entièrement en bois (Fig. II.1). Pour avancer, le pilote, seul à bord, actionne une manivelle qui actionne une hélice. Pour la plongée, il ouvre les vannes pour remplir les ballasts ; Pour la remontée, l'eau est vidée à l'aide d'une pompe.



Figure II.1 Tortue en 1775 en bois.

En 1797, l'ingénieur américain Robert Fulton construisit un Nautilus (Fig. II.2) en acier cuivré. Long de 6,50 mètres, il est propulsé par une hélice actionnée manuellement par les trois membres d'équipage. Il est équipé d'une charge explosive qu'il doit fixer sous les navires ennemis et tirer à distance (difficile en pratique). Fulton propose son invention à la France puis à la Grande-Bretagne qui à son tour la rejeta[11].



Figure II.2 Nautilus en 1797 en acier

Le premier sous-marin réellement en activité fut le Gymnote de 1887 (Fig. II.3), construit par les Français Henri Dupuy de Lôme et Gustave Zédé. Il mesure 17 mètres de long, est propulsé par un moteur électrique de 50 chevaux, atteint 8 nœuds en surface, et 4 en plongée. Il est exploité par un équipage de cinq hommes. Il est armé de deux torpilles et a une portée de 65 milles (en surface, mais seulement un tiers lorsqu'il est immergé) [11].

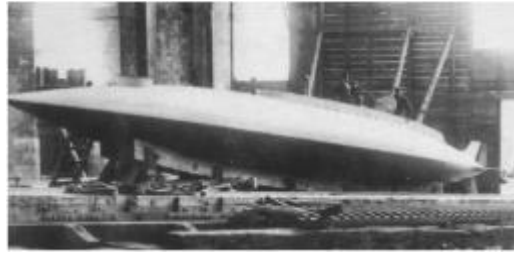


Figure II.3 Le Gymnote, lancé en 1888 en France

Dans les années 1950, l'énergie nucléaire a commencé à remplacer les moteurs de propulsion diesel-électriques. Les premiers véhicules sous-marins autonomes ont été développés dans les années 1960 et 1970 en utilisant [12]:

- SPURV (Self-Propelled Underwater Research Vehicle, USA, 1977) : pesant 480 kg, peut atteindre une vitesse de 2,2 m/s pendant 5 heures consécutives avec une capacité d'immersion maximale de 3000 m. Il a été utilisé pour effectuer des mesures de conductivité et de température appliquées à la modélisation des ondes (voir Fig. II.4 (a)).
- L'épaulard (France, 1976) : pesant 3 tonnes, peut atteindre une vitesse de 12 nœuds pendant 7 heures consécutives avec une capacité d'immersion maximale de 6000 m tout en conservant un lien acoustique avec la surface (voir Fig. II.4 (b)) [12].



(a)



(b)

Figure II.4 Les premiers sous marins autonomes. (a) Le SPURV (USA, 1977), (b) L'épaulard (France, 1967).

II.3 Principe de fonctionnement d'un sous-marin en général

Le sous-marin (civil ou militaire) est régi par deux principes : les principes d'Archimède et de Pascal. Cette dernière s'applique à tout corps immergé, et peut s'énoncer comme suit [13] :

II.3.1 Principe d'Archimède

"Tout corps immergé dans un liquide reçoit une poussée verticale de bas en haut de ce fluide, égale au poids du volume de liquide déplacé."

Pour plonger, le sous-marin doit être rempli d'eau (plein remplissage de ballast) pour changer son poids. Si le poids du sous-marin est inférieur au poids de l'eau pour le volume, il flottera comme un bateau. Alors on ajuste notre poids pour descendre comme on veut[13].

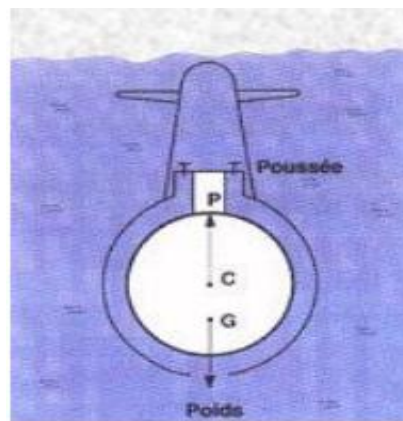


Figure II.5 Principe d'Archimède

II.3.2 Principe de Pascal

"A la surface du corps immergé, s'exerce une pression, en tiges, perpendiculaire à cette surface, dirigée vers l'intérieur et égale au nombre de dizaines de mètres de l'immersion." La coque d'un sous-marin est soumise à une pression accrue avec l'immersion, qui a tendance à écraser la coque, il faut donc faire attention à l'épaisseur de la coque. Cela dépend de l'immersion maximale attendue. Il faut augmenter l'épaisseur d'environ 10mm pour diminuer et ainsi gagner 100m d'immersion [13].

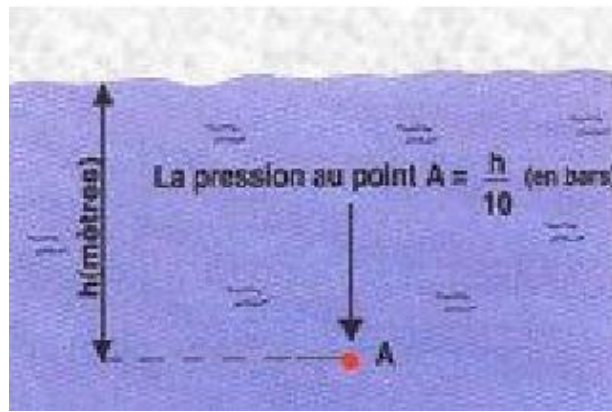


Figure II.6 Principe de Pascal

II.4 Les différents types de véhicules sous-marins

Aujourd'hui, nous avons une large gamme de véhicules sous-marins qui permettent pour effectuer diverses tâches. On peut citer les robots télécommandés sous-marins il comporte un câble qui le relie à un bateau en surface. véhicules sous-marins indépendant, quant à lui, ne nécessite pas l'intervention de l'opérateur pour accomplir leur mission. Ils n'auront pas d'autonomie du point de vue de l'énergie et de la prise de décision la même structure selon qu'elle est destinée à l'exploration ou à l'évolution en haute mer dans les zones proches de la côte. Les sous-marins ont beaucoup évolué à partir du point d'un point de vue technologique, on peut classer les robots sous-marins selon certains critères ou certaines spécifications. Nous présentons une classification des véhicules sous-marins selon de caractéristiques différentes [13]:

- Véhicule sous-marin non qualifié (UUV : Unmanned Underwater Vehicles)

C'est un véhicule sous-marin sans pilote, et le déplace délibérément sur des systèmes plus ou moins complexes selon le degré de son indépendance, donc la principale difficulté réside dans la façon d'initier l'énergie dont il dispose, et il a besoin de deux catégories de rayons ultraviolets, et il est acheminé à la surface à l'aide d'un câble A par lequel transitent les commandes, l'alimentation et les données nécessaires, ainsi que ses propres moyens de paiement [13].

- Véhicule sous-marin autonome (AUV : Autonomous Underwater Vehicles)

C'est un appareil capable de connaître son emplacement pour se déplacer vers sa cible, c'est-à-dire qu'il a une cible spécifique, il est donc nécessaire de préparer une liste des opérations importantes et à les effectuer.

- Les véhicules sous-marins autonomes (AUV) sont divisés en deux types

➤ AUV (grand fondé)

fonctionne dans les profondeurs de la mer, conçu spécifiquement pour l'exploration dans les profondeurs de l'océan, et jouit d'une forme d'indépendance et se caractérise par être gros en énergie, en poids et en dimensions importantes et nécessite une logistique très lourde [12].



(a)



(b)

Figure II.7 Exemples d'AUV grand fond. (a)AstrX et IdefX, Ifremer,
(b)Daurade, ECA/GESMA.

➤ AUV (Côtier)

De petite taille, ces véhicules ne nécessitent aucune logistique pour être mis en œuvre car ils sont totalement indépendants et sont capables de déterminer leur position absolue afin de se déplacer vers la cible et sont l'outil principal des missions nautiques[12].



(a)



(b)

Figure II.8 Exemples d'AUV côtiers.(a)Remus, d'hydroid robot camera,
(b)Lirmia2, LAFAMIA/LIRMM

➤ Véhicules sous-marins télécommandés (ROV : Remotely Operated Vehicle) Ce sont les machines qui sont contrôlées par l'opérateur depuis une station au sol ou sur le

bateau et sont reliées à la surface par des câbles qui sont contrôlés par les commandes du moteur, la puissance et les données acquises [12].

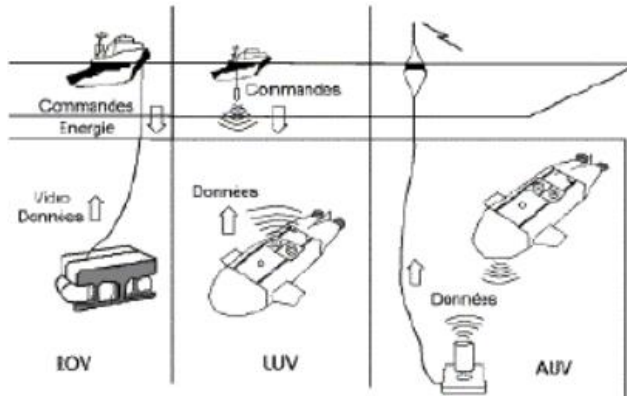


Figure II.9 Les différents types de véhicules sous-marins.

II.5 Formes des véhicules Sous-marins autonomes

Prenant en compte les caractéristiques de la forme, on peut souligner trois configurations Principales[14].

- **Forme cylindrique** : ils sont pourvus d'un unique propulseur arrière, d'un gouvernail et de deux paires de barres de plongée horizontales situées à l'arrière, ou à l'arrière et à l'avant.



Figure II.10 AUV forme cylindrique

- **Forme parallélépipédique** : ils possèdent deux propulseurs à l'arrière, et deux paires de surfaces mobiles situées à l'arrière et à l'avant, pour contrôler la plongée. Pour le changement dans le plan horizontal (cap), il existe deux possibilités.

- Deux propulseurs latéraux un en avant et un autre en arrière.
- Une ou deux paires de surfaces mobiles.



Figure II.11 AUV forme parallélépipédique

- Forme ellipsoïdale : Ils sont équipés d'un propulseur arrière et de quatre surfaces mobiles situées à l'arrière, deux pour le changement de la plongée et deux pour le contrôle de cap [14].



Figure II.12 AUV forme ellipsoïdale

II.6 Structure de la navigation d'un véhicule sous-marin

La plupart des systèmes de contrôle sont construits sur la base de capteurs, de signaux de référence et d'un contrôle de rétroaction. Un système marin tel que le véhicule marin est également construit sur la base de trois blocs indépendants qui sont le système de guidage, le système de navigation et le bloc de contrôle. En terminologie marine, ces trois blocs sont appelés GNC (voir Figure II.13). Les blocs GNC représentent trois systèmes interconnectés[11] :

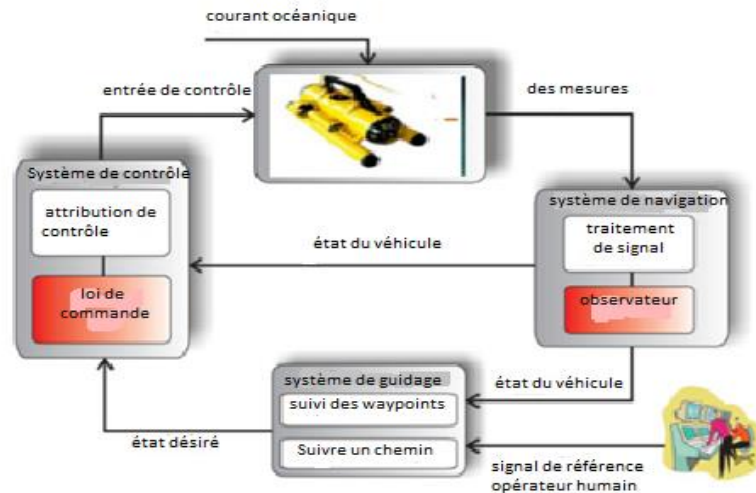


Figure II.13 La structure GNC pour un système marin [11]

- Le système de Guidage : Ce bloc fournit les informations nécessaires au contrôle du système, à savoir : les signaux de référence (position souhaitée du véhicule, vitesse et accélération). Cette information est saisie par le facteur humain.
- Le système de navigation : Ce bloc est nécessaire pour le contrôle et la navigation du véhicule marin, et est destiné à estimer la position, la direction et la distance du véhicule lors des manœuvres. Dans de nombreux cas, le système de navigation est responsable de l'estimation de la vitesse des véhicules. L'estimateur qui permet de reconstruire les états non mesurables de l'engin marin est appelé l'observateur.
- Le système de contrôle : Ce bloc définit la commande en vigueur et au moment nécessaire pour atteindre un objectif spécifique. Ce même bloc est constitué de deux sous-blocs, la loi de contrôle et le contrôle de l'énergie. Le sous-bloc loi de commande consiste à fournir des forces et moments généralisés, tandis que le sous-bloc commande d'allocation consiste à distribuer ces forces généralisées aux différents actionneurs de manière optimale [11].

II.7 Fonctionnement d'un AUV

D'autre part, les RUV fonctionnent principalement en mode routage tandis que les AUV fonctionnent généralement en mode navigation, avec trois options[13] :

- En toute indépendance sans contact avec la surface. Nous ne pouvons donc pas contrôler la qualité pendant le processus. Ce procédé ne doit être utilisé que dans des cas très particuliers.
- Autonome mais avec surveillance sur le toit.
- Par rapport à la surface avec des communications dans les deux sens.

Le facteur important qu'est l'énergie pose la question : Tracté ou autonome? Une machine indépendante d'un point de vue logistique est la solution la plus satisfaisante, bien qu'une tronçonneuse soit la solution la plus réaliste .

II.7.1 Paramètres hydrodynamiques d'un AUV

La création d'un véhicule sous-marin autonome piloté repose sur la connaissance du modèle dynamique. L'ignorance du modèle hydrodynamique nécessite de grands efforts pour créer des contrôleurs rigides. Enfin, un aspect important qui ressort dans la mise en place d'un véhicule autonome concerne la charge utile. Étant donné que l'appareil n'est pas destiné à une tâche mais est utilisé comme support, la charge utile varie d'une tâche à l'autre. Le changement de charge utile modifie généralement la rhéologie ce qui a un effet direct sur les coefficients de traînée. Dans ce cas, il devient intéressant de pouvoir déterminer en ligne le modèle hydrodynamique du dispositif et automatiquement ou du moins estimer l'évolution de ces coefficients autour des valeurs nominales [13].

II.7.2 Architecture logicielle

Le contrôleur de type mode glissant "Sliding Mode Control : SMC" vérifie l'immersion et le cap. Cette unité de contrôle aux caractéristiques importantes permet de calibrer et de réduire les erreurs de modélisation dues à la méconnaissance des paramètres hydrodynamiques du sous-marin pour la plupart. C'est une commande à structure variable par mode glissant. Lorsque vous programmez une mission en mer, vous simulez avec des outils comme ce contrôleur ou ce simulateur hydrodynamique. Un exemple courant d'application de ce contrôleur est de retransmettre la mesure sur une courbe de comportement en immersion d'un AUV (Fig. II.14).

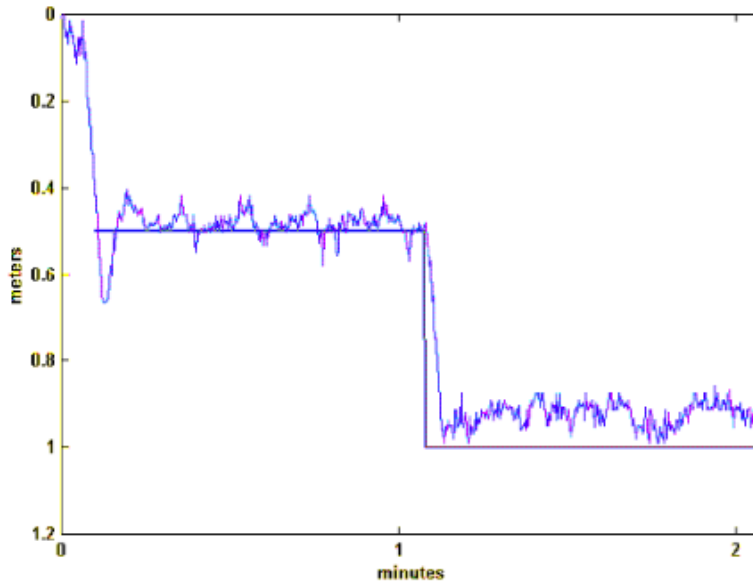


Figure II.14 Tenue en immersion [13]

II.7.3 Lois de commande existantes

- Commande par mode glissant (Sliding Mode) d'ordre un : il est puissant et simple mais présente un inconvénient majeur qui est sa consommation énergétique excessive.
- Commande en PID (Proportionnel Intégral Dérivé) : le système est linéaire et donc très simple mais certains modèles sont fortement non linéaires et leurs aspects énergétiques ne sont pas pris en compte.
- Commande par logique floue : la logique floue peut être considérée comme un lien entre la modélisation numérique et la modélisation symbolique. Cela a permis une croissance industrielle étonnante à partir des algorithmes très simples pour traduire des représentations symboliques en entités numériques et vice versa. Ceci est normal, mais peu puissant et difficile à mettre en œuvre car fortement non linéaire, quantifiable et incertain. De plus, comme nous l'avons vu précédemment dans les autres commandes, il est très énergivore [13].

II.8 Modélisation générale du véhicule ' robot ' sous-marin autonome

L'analyse détaillée de la modélisation d'un sous-marin du même type que celui étudié a déjà été effectuée. On donne ici un résumé des résultats obtenus. La modélisation du sous-marin ayant pour but une implémentation en vue de simulation, on ne cherchera

pas seulement une équation donnant le comportement global du sous-marin, mais également une description de chacun des comportements pris séparément. On fait alors l'hypothèse que le comportement global est la somme de chacune des composantes prises à part [16].

La modélisation nécessite l'étape de définir les référentiels à partir desquels l'évolution du dispositif sera décrite, comme le montre la figure II.15. On définit d'abord une référence absolue $R_0 = (0, x_0, y_0, z_0)$, avec [14]:

- x_0 : l'axe longitudinal coïncide avec le nord géographique,
- y_0 : l'axe transversal est dirigé vers l'est,
- z_0 : axe normal dirigé vers le bas (fond sous-marin).

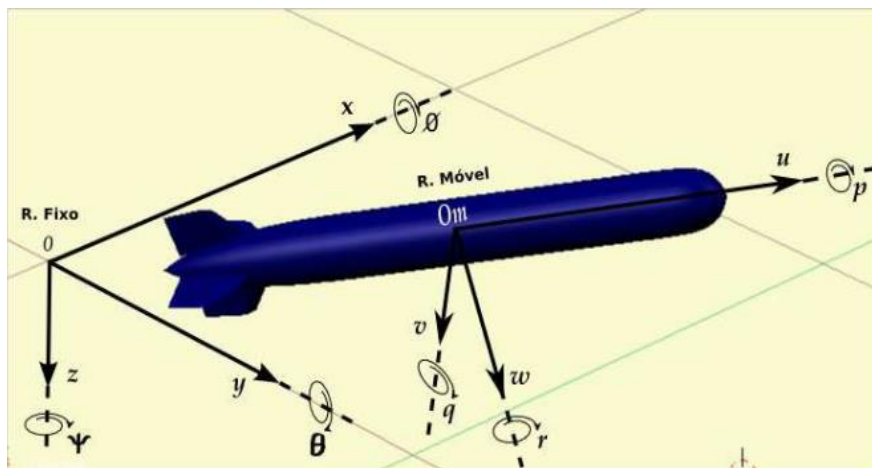


Figure II.15 Repères fixe et inertiel, Variables d'état

La principale caractéristique de ce pneumatique est qu'il est stable par rapport au sol, ce qui lui confère les caractéristiques d'un pneumatique galiléen ou inertiel. L'effet de la rotation de la Terre est minime sur et autour de l'engin. Une deuxième référence $R_v = (C, x_v, y_v, z_v)$ associée au véhicule permet d'exprimer les vitesses de l'engin [14].

Les axes principaux des palais du véhicule correspondent aux axes du châssis :

- X_v : un axe longitudinal dirigé de l'arrière de l'engin vers l'avant,
- Y_v : axe transversal orienté vers tribord,
- z_v : axe normal dirigé du haut vers le bas.

Le choix du point d'origine C pour ce cadre est stratégique. La SNAME [Society of Naval Architects and Marine Engineers] propose une méthode de sélection de son emplacement en fonction des caractéristiques techniques d'un véhicule [14].

Le vecteur vitesse est représenté par [15] :

$$v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (\text{II.1})$$

Avec [14] :

- u : vitesse d'avancement.
- v : vitesse de glissement.
- w : vitesse de descente.
- $p = \dot{\phi}$: vitesse de Roulis.
- $q = \dot{\theta}$: vitesse de Tangage.
- $r = \dot{\psi}$: vitesse de Lacet.

En utilisant les angles d'Euler, la position et l'orientation du véhicule peuvent être décrites comme un vecteur η par rapport au référentiel global [15]:

$$\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (\text{II.2})$$

Avec [14] :

- x, y et z : les trois composantes de position.
- ϕ : l'angle de Roulis.
- θ : l'angle de Tangage.
- ψ : l'angle de Lacet.

La correspondance entre les deux systèmes de coordonnées est donnée par la transformation d'angle d'Euler [15] :

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (\text{II.3})$$

où J est la matrice de transformation de l'angle d'Euler qui peut être décrite par trois rotations dans un ordre fixe. Le système de coordonnées obtenu en traduisant le cadre de référence global à l'origine du cadre fixe du corps peut être illustré à la Fig. 1. Il illustre l'angle de roulis (ϕ), l'angle de tangage (θ) et l'angle de lacet (ψ)[15].

La modélisation dynamique d'un robot sous-marin autonome, conduit aux équations générales suivantes [14]:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \Gamma u \quad (\text{II.4})$$

où les paramètres de l'équation II.4 correspondent à [16] :

- M est la matrice d'inertie. Elle est composée de 2 termes : M_d , la matrice d'inertie due à la dynamique du système et M_a , matrice d'inertie d'eau ajoutée, dont les paramètres sont issus de modèles semi-empiriques (erreur pouvant aller jusqu'à 50 à 70%).

- $C(v)$ représente l'action des forces de Coriolis et des forces centrifuges. Il est également composé de deux termes : C_d dû aux forces dynamiques, et C_a dû aux forces hydrodynamiques (calculées à partir des coefficients de la matrice d'inertie d'eau ajoutée).

- $D(v)$ est la matrice des coefficients d'amortissement hydrodynamique (également issue d'estimation donc la connaissance est très approximative).

- $g(\eta)$ est le vecteur des force de gravité et de la poussée d'Archimède.

- Γu représente les forces et moments générés par les actionneurs du véhicule[16].

Les équations simplifiées de mouvement de corps rigide en pilonnement et en tangage peuvent être écrites selon les critères suivants en supposant que l'origine coïncide avec le centre de gravité et que le balancement (v) et le lacet (r) sont nuls [15] :

$$m(\dot{w} - u_0 q) = Z \quad (\text{II.5})$$

$$I_y \dot{q} = M \quad (\text{II.6})$$

Les forces et moments externes sont décrits par la masse ajoutée hydrodynamique, l'amortissement linéaire et les effets des équations de déviation du plan de poupe, respectivement écrits comme suit [15] :

$$Z = Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_w w + Z_q q + Z_{\delta} \delta_s \quad (\text{II.7})$$

$$M = M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_w w + M_q q - mg(z_G - z_{B0}) \sin \theta + M_{\delta} \delta_s \quad (\text{II.8})$$

$$M \approx M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_w w + M_q q - W \overline{BG_z} \theta + M_{\delta} \delta_s \quad (\text{II.9})$$

Pour un véhicule fonctionnant dans le plan vertical, les hypothèses suivantes peuvent être faites : la vitesse d'avancement est constante, les modes de roulis et de lacet

peuvent être négligés et en régime permanent, $\theta_0 = \text{constant}$ et ($q_0 = \phi_0 = 0$). Ceux-ci impliquent que [15] :

$$\dot{\theta} = q \quad (\text{II.10})$$

$$\dot{z} = -u_0 \sin \theta + w \cos \theta \approx -\theta u_0 + w \quad (\text{II.11})$$

Ceci, associé aux équations simplifiées de pilonnement et de tangage, c'est-à-dire (II.5) à (II.11), peut être exprimé sous forme matricielle comme suit[15] :

$$\begin{pmatrix} m - Z\dot{w} & mx_G - Z\dot{q} & 0 & 0 \\ mx_G - M\dot{w} & I_y - M\dot{q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -Zw & mu_0 - Zq & 0 & 0 \\ Mw & mx_G u_0 - Mq & \overline{BG_z}W & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_\delta \\ M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (\text{II.12})$$

Notez que $\overline{BG_z}W = z_G - z_B$ est la distance verticale entre le centre de la bouée et le centre de gravité. Les principaux paramètres dimensionnels et hydrodynamiques et leurs dérivés sont résumés dans le tableau (II.1). Ici, les paramètres hydrodynamiques non dimensionnels sont résumés[15].

Paramètre	La description	Valeur
I_y	Moment d'inertie autour de l'axe des x	0.001925
m	Masse du véhicule	0.036391
$M_{\dot{q}}$	Coefficient pour le moment d'inertie de masse supplémentaire en tangage	-0.001573
$M_{\dot{w}}$	Coefficient pour le moment d'inertie de masse supplémentaire en pilonnement	-0.000146
M_q	Coefficient de moment de tangage à partir du tangage	-0.01131
M_w	Moment de tangage du coefficient de pilonnement	0.011175
$M_\theta = \overline{BG_z}W$	Distance verticale entre le centre de flottabilité et le centre de gravité	0.156276/U ²
M_δ	Coefficient de moment de tangage à partir de l'angle du plan de poupe	-0.012797
$Z_{\dot{q}}$	Coefficient de masse ajoutée dans le tangage	-0.000130
$Z_{\dot{w}}$	Coefficient de masse ajoutée en pilonnement	-0.031545
Z_q	Coefficient de force de pilonnement induit par l'angle d'attaque	-0.017455
Z_w	Coefficient de force de pilonnement induit par l'angle d'attaque	-0.043938
Z_δ	Coefficient dû à la force de pilonnement de l'angle du plan de poupe	0.027695

Tab II.1. Paramètres, dérivées hydrodynamiques et dimensions principales.

les dérivées sont définies selon le système premier. A vitesse constante de $u_0 = 4.11 \text{ m/s}$, l'équation (II.12) peut s'écrire sous une forme plus compacte par modèle d'espace d'état, c'est-à-dire [15] :

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.6529 & -2.4522 & 0.0855 & 0 \\ 3.2219 & -3.1309 & -44.6794 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -4.11 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.4147 \\ -3.6757 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (\text{II.13})$$

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions des véhicules sous-marins autonomes, nous avons commencé par principe de fonctionnement d'un sous-marin en général, ainsi que les différents types de véhicules sous-marins, nous avons parlé aussi de la structure et fonctionnement d'un AUV, nous avons fini notre présentation par la modélisation générale du véhicule sous-marin autonome.

Cette modélisation d'une AUV sera utilisée comme un système à contrôler et stabiliser par un régulateur flou afin d'étudier les performances de cette commande ainsi que déterminer l'influence du nombre de règles flous sur ces performances.



Chapitre III
**Application du FLC sur un modèle
linéaire d'un véhicule sous-marin**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons appliquer le contrôleur FLC, selon plusieurs cas, sur le modèle d'un AUV cité au chapitre précédent afin de commander sa position angulaire autour d'une référence donnée. Plusieurs stratégies et cas sont détaillés dans cette simulation selon le nombre de règles floues (RF), nombre d'entrées au FLC et l'absence ou la présence de la perturbation. L'objectif de cette application porte essentiellement sur l'influence du nombre de règles floues sur les performances du système régulé.

III.2. Simulation du FLC à seule entrée au AUV

Dans ce 1^{er} point d'application, on va commander la position angulaire ($w(t)$) d'un AUV par un contrôleur flou à une seule entrée qui est caractérisée par l'écart (erreur) ($e(t)$) entre la référence (consigne) ($r(t) = \pi/6$ rad) et l'angle $w(t)$. Afin de démontrer l'influence du nombre de règles floues, on utilise 05 cas (03 RF, 05 RF, 07 RF, 09 RF, 11 RF).

Le modèle général de cette simulation sous Simulink est illustré dans la figure (III.1).

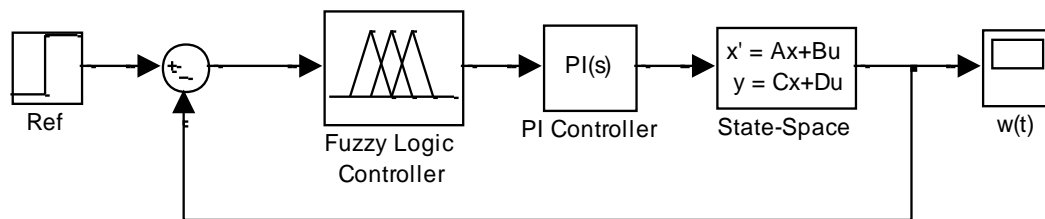


Figure III.1 Modèle de simulation du 1^{er} cas (seule entrée).

Comme indiqué dans la figure III.1, on a ajouté un régulateur PI ($k_p=1$ et $k_i=1$) pour annuler l'écart entre la référence et la consigne. Le modèle du système à commander « AUV » est représenté sous forme d'état (II.13) :

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.6529 & -2.4522 & 0.0855 & 0 \\ 3.2219 & -3.1309 & -44.6794 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -4.11 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.4147 \\ -3.6757 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -0.6529 & -2.4522 & 0.0855 & 0 \\ 3.2219 & -3.1309 & -44.6794 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -4.11 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0.4147 \\ -3.6757 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$D = 0.$$

Les fonctions d'appartenance utilisées dans ce point sont indiquées comme suit :

- **VPL**: very positive large.
- **PL** : positive large ;
- **PM** : positive medium ;
- **PS** : positive small ;
- **VPS** : very positive small ;
- **Z** : zero ;
- **VNS** : very negative small ;
- **NS** : negative small ;
- **NM** : negative medium ;
- **NL** : negative large ;
- **VNL**: very negative large.

E	PL	Z	NL
U	PL	Z	NL

Tab III.1. Cas de 3 règles floues (3 fonctions d'appartenances)

e	PL	PS	Z	NS	PL
U	PL	PS	Z	NS	PL

Tab III.2. Cas de 5 règles floues (5 fonctions d'appartenances)

e	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
U	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL

Tab III.3. Cas de 7 règles floues (7 fonctions d'appartenances)

e	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL
U	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL

Tab III.4. Cas de 9 règles floues (9 fonctions d'appartenances)

e	VPL	PL	PM	PS	VPS	Z	VNS	NS	NM	NL	VNL
U	VPL	PL	PM	PS	VPS	Z	VNS	NS	NM	NL	VNL

Tab III.5. Cas de 11 règles floues (11 fonctions d'appartenances)

Les résultats de simulation dans ce cas sont détaillés dans les figures suivantes (de figure III.2 à figure III.4).

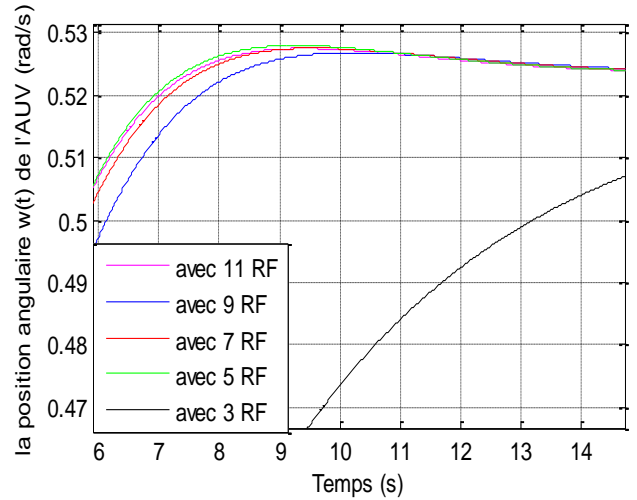
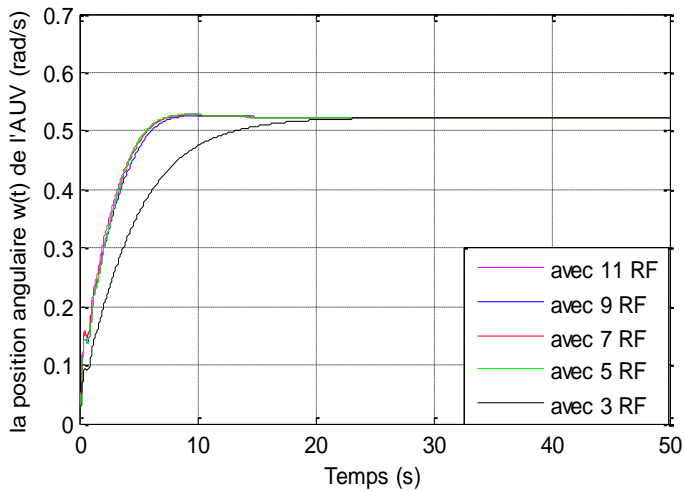


Figure III.2 La position angulaire $w(t)$ du 1^{er} cas (et leur agrandissement 'zoom').

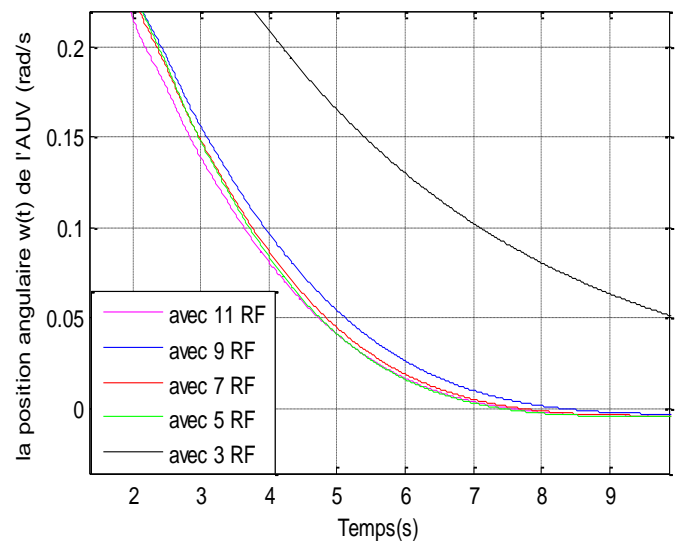
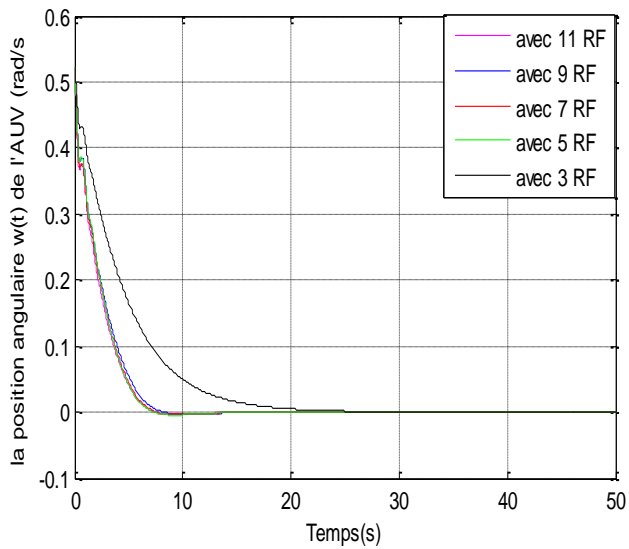


Figure III.3 L'erreur du 1^{er} cas (et leur agrandissement « zoom »).

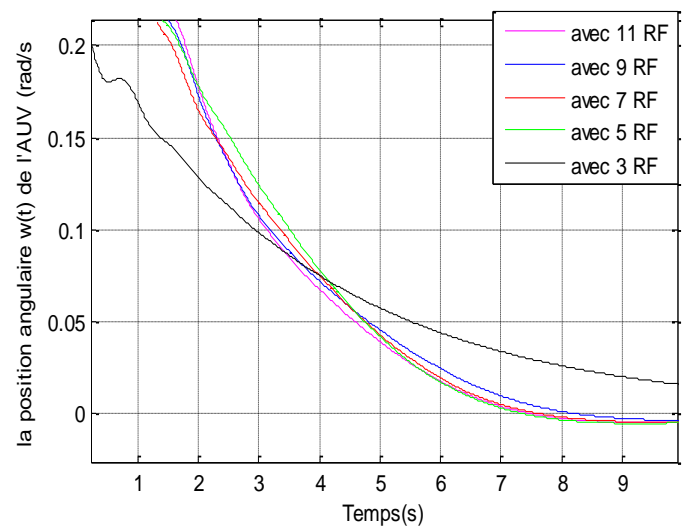
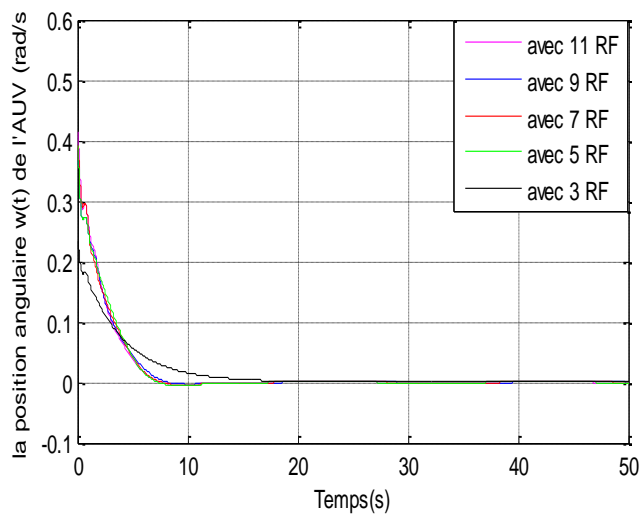


Figure III.4 La commande du 1^{er} cas (et leur agrandissement « zoom »).

Les performances temporelles (temps de montée **tm**, temps de réponse **tr**, dépassement **D%**, valeur finale **Vinf** et la valeur de l'erreur en régime permanent **e**), de ce 1^{er} cas sont données dans le tableau (Tab 6)

	tm	tr	D%	Vinf	e
Cas 11 RF	2.0660	5.5262	0.76%	0.5236	0.0000
Cas 9 RF	2.2860	5.9858	0.75%	0.5236	0.0000
Cas 7 RF	2.2270	5.6416	0.76%	0.5236	0.0000
Cas 5RF	2.2630	5.5132	0.95%	0.5236	0.0000
Cas 3 RF	3.9960	12.6790	0.00%	0.5236	0.0000

Tab III.6. Performances temporelles obtenues en 1^{er} cas.

Les résultats de simulation de ce 1^{er} cas démontrent qu'il n'y a aucun changement remarquable sur les performances en fonction de variation du nombre de règle floues (RF) supérieur à 3 RF.

III.3. Application du FLC à deux entrées au AUV

Afin de vérifier l'influence de nombre de RF sur les performances de la sortie temporelle du système à commander (AUV), on va ajouter une entrée supplémentaire au régulateur FLC qui est la variation de l'erreur). ($de = \frac{de(t)}{dt} = \dot{e}$) puis ; on va changer cette dernière entrée avec celle de la perturbation éventuelle comme une entrée du FLC.

III.3.a. Simulation sans perturbations à deux entrées (erreur et sa variation)

Dans ce 2^{ième} cas, on ajoute la variation de l'erreur comme une deuxième entrée au régulateur FLC et aussi on utilise 05 cas de nombre de règles floues (7 RF, 13 RF, 29 RF, 51 RF et 91 RF).

Le modèle général de la simulation de ce 2^{ième} cas sous Simulink est illustré dans la figure (III.5).

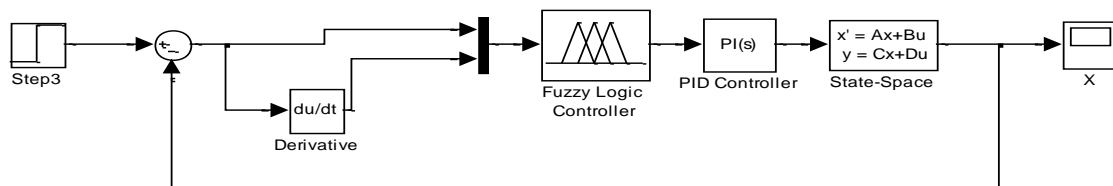


Figure III.5 Modèle de simulation du 2^{ème} cas (deux entrées) sans perturbations.

Les fonctions d'appartenance utilisées dans ce point sont indiquées comme suit :

- **VPL**: very positive large ;
- **PL** : positive large ;
- **PM** : positive medium ;
- **PS** : positive small ;
- **VPS** : very positive small ;
- **Z** : zero ;
- **VNS** : very negative small ;
- **NS** : negative small ;
- **NM** : negative medium ;
- **NL** : negative large ;
- **VNL**: very negative large.

de \ e	PL	Z	NL
NL	Z	NL	NL
Z	PL	Z	NL
PL	PL	PL	Z

Tab III.7. Cas de 7 règles floues (3 fonctions d'appartenances).

De \ E	PL	PS	Z	NS	NL
NL	Z	NS	NL	NL	NL
NS	PS	Z	NS	NL	NL
Z	PL	PS	Z	NS	NL
PS	PL	PL	PS	Z	NS
PL	PL	PL	PL	PS	Z

Tab III.8. Cas de 13 règles floues (5 fonctions d'appartenances).

de \ e	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
NL	Z	NS	NM	NL	NL	NL	NL
NM	PS	Z	NS	NM	NL	NL	NL
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NL	NL
Z	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PS	PL	PL	PM	PS	Z	NS	NM
PM	PL	PL	PL	PM	PS	Z	NS
PL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	Z

Tab III.9. Cas de 29 règles floues (7 fonctions d'appartenances).

e \ de	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL
VNL	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL	VNL	VNL
NL	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL	VNL
NM	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL
NS	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL
Z	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL
PS	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PM	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM
PL	VPL	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS
VPL	VPL	VPL	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z

Tab III.10. Cas de 51 règles floues (9 fonctions d'appartenances).

e \ de	VPL	PL	PM	PS	VPS	Z	VNS	NS	NM	NL	VNL
VNL	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL	VNL	VNL
NL	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL	VNL
NM	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL
NS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL
VNS	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL
Z	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM
VPS	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS
PS	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS
PM	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS
PL	VPL	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS
VPL	VPL	VPL	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z

Tab III.11. Cas de 91 règles floues (11 fonctions d'appartenances).

Les résultats de simulation dans ce 2^{ème} cas sont illustrés dans les figures suivantes (de figure III.6, figure III.7 et figure III.8).

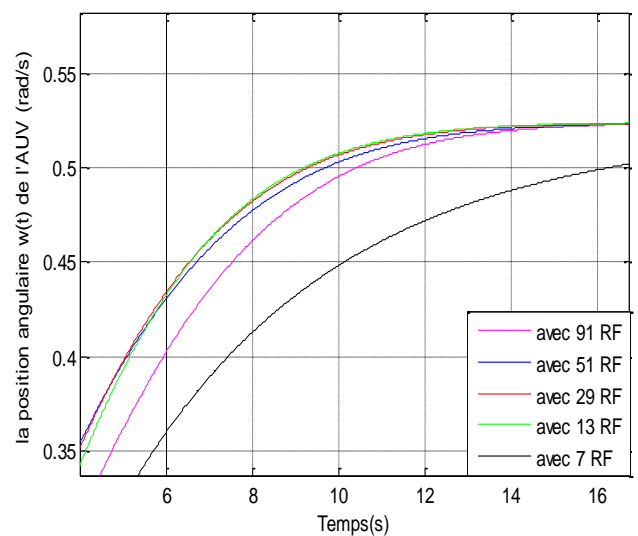
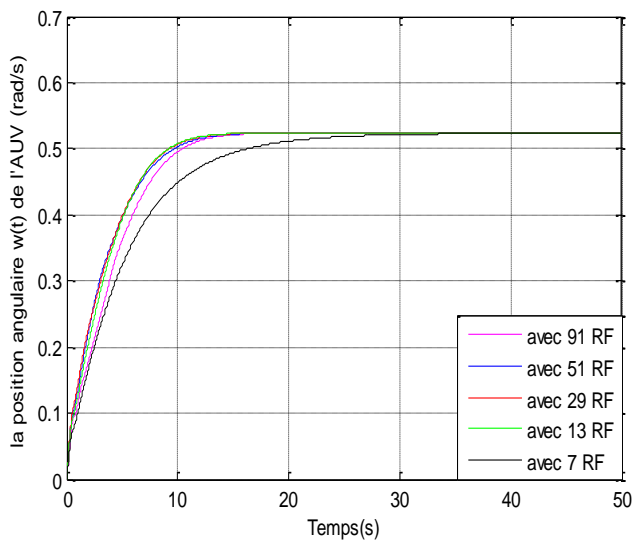
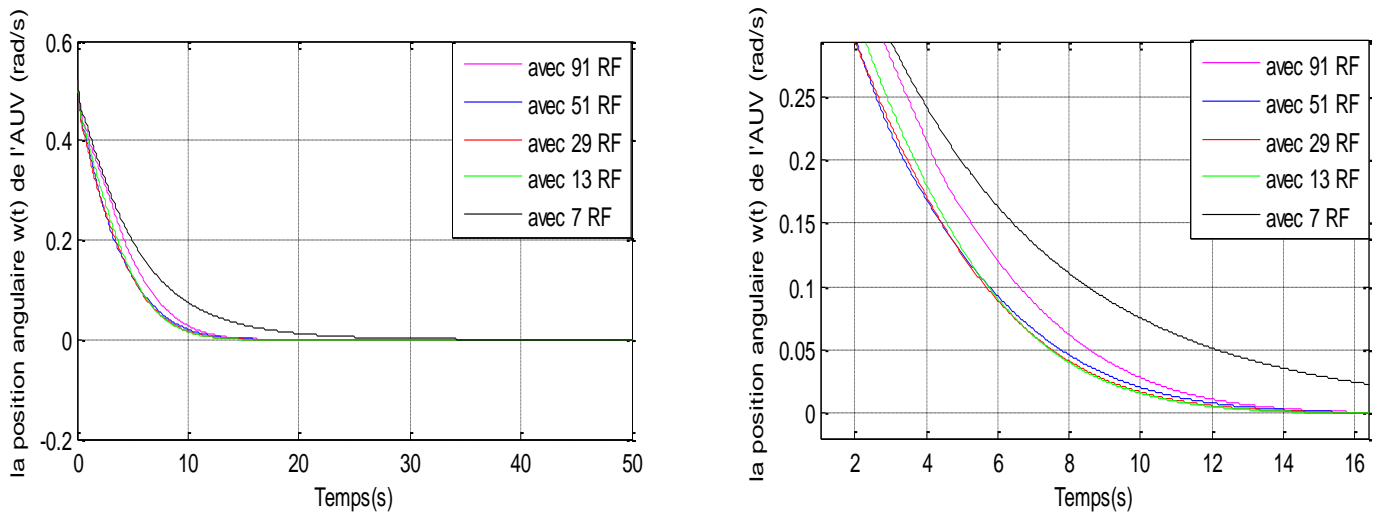
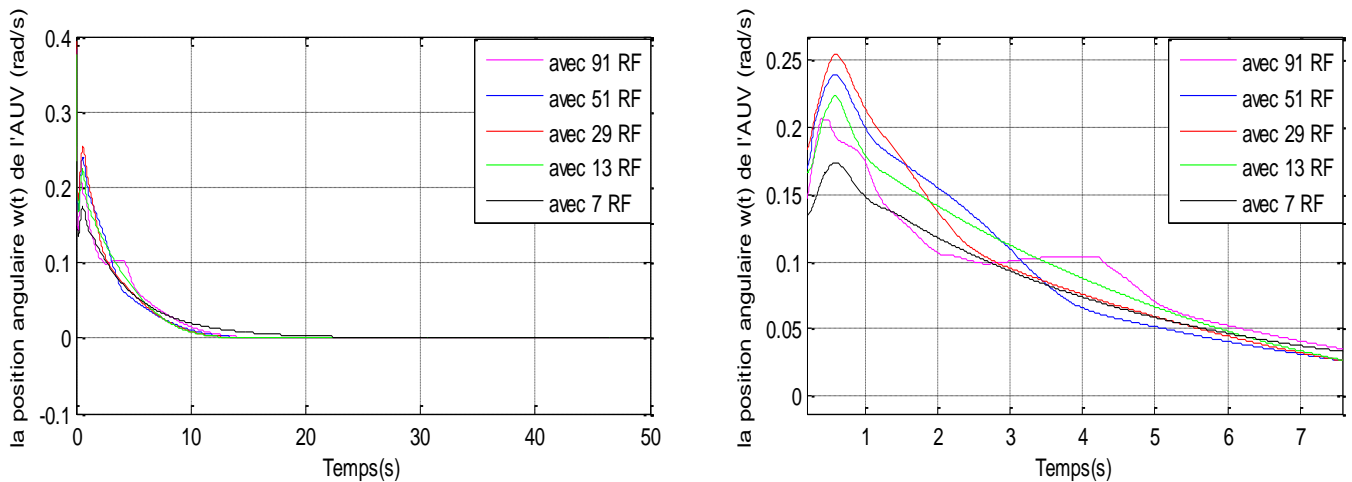


Figure III.6 La position angulaire $w(t)$ du 2^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom').

Figure III.7 L'erreur du 2^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom').Figure III.8 La commande du 2^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom').

Les performances temporelles de ce 2^{ème} cas sont données dans le tableau (Tab 12)

	tm	tr	D%	Vinf	e
Cas 91 RF	4.0881	10.1939	0.00%	0.5236	0.0000
Cas 51 RF	3.7100	9.4495	0.00%	0.5236	0.0000
Cas 29 RF	3.2992	9.0667	0.00%	0.5236	0.0000
Cas 13RF	3.5081	8.9779	0.00%	0.5236	0.0000
Cas 7RF	4.7444	15.7048	0.00%	0.5235	0.0001

Tab III.12. Performances temporelles obtenues en 2^{ème} cas.

A partir de ces résultats, on peut constater que la réponse temporelle de ce système prend la même forme avec certaines changements des valeurs de temps de réponse et de montée selon la variation de nombre de règles floues (ou fonctions d'appartenance) et aussi le croisement de ce nombre nous conduit à déclarer que la meilleure valeur de ce

nombre est 13 RF(5 fonctions d'appartenance) en terme de performances et quelque soit le changement de ce nombre de règles floues, les performances sont inchangeable au meilleur, c-à-d, que le nombre 13 RF(5 fonctions d'appartenance) est l'optimum dans ce cas.

III.3.b. Simulation avec perturbations à deux entrées (erreur et perturbations)

Dans ce 3^{ème} cas, nous allons remplacer la 2^{ème} entrée « la variation de l'erreur » par la valeur de perturbations éventuelles et qu'elle sera la 2^{ème} entrée du régulateur FLC et aussi on utilise 05 cas de nombre de règles floues (9 RF, 25 RF, 49 RF, 81 RF et 121 RF). On a crée des perturbations aléatoire $d(t)$ varie de -0.01 à 0.01 dans l'intervalle du temps [30s, 40s].

Le modèle général de la simulation de ce 3^{ème} cas sous Simulink est illustré dans la figure (III.9).

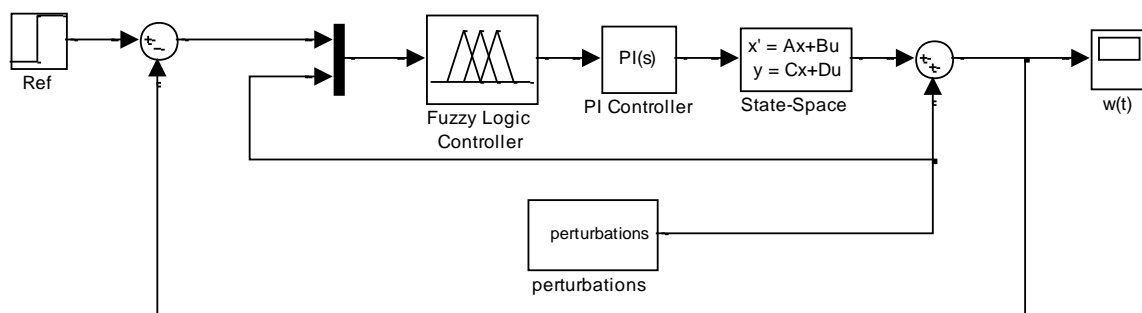


Figure III.9 Modèle de simulation du 3^{ème} cas (deux entrées) avec perturbations.

Les fonctions d'appartenance utilisées dans ce point sont indiquées comme suit :

- **VPL**: very positive large ;
- **PL** : positive large ;
- **PM** : positive medium ;
- **PS** : positive small ;
- **VPS** : very positive small ;
- **Z** : zero ;
- **VNS** : very negative small ;
- **NS** : negative small ;
- **NM** : negative medium ;
- **NL** : negative large ;
- **VNL**: very negative large.

d \ e	PL	Z	NL
NL	PL	PL	Z
Z	PL	Z	NL
PL	Z	NL	NL

Tab III.13. cas 9 règles floues (3 fonctions d'appartenances)

D \ E	PL	PS	Z	NS	NL
NL	PL	PL	PL	PS	Z
NS	PL	PL	PS	Z	NS
Z	PL	PS	Z	NS	NL
PS	PS	Z	NS	NL	NL
PL	Z	NS	NL	NL	NL

Tab III.14. cas 25 règles floues (5 fonctions d'appartenances)

d \ e	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
NL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	Z
NM	PL	PL	PL	PM	PS	Z	NS
NS	PL	PL	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PS	PM	PS	Z	NS	NM	NL	NL
PM	PS	Z	NS	NM	NL	NL	NL
PL	Z	NS	NM	NL	NL	NL	NL

Tab III.15. cas 49 règles floues (7 fonctions d'appartenances)

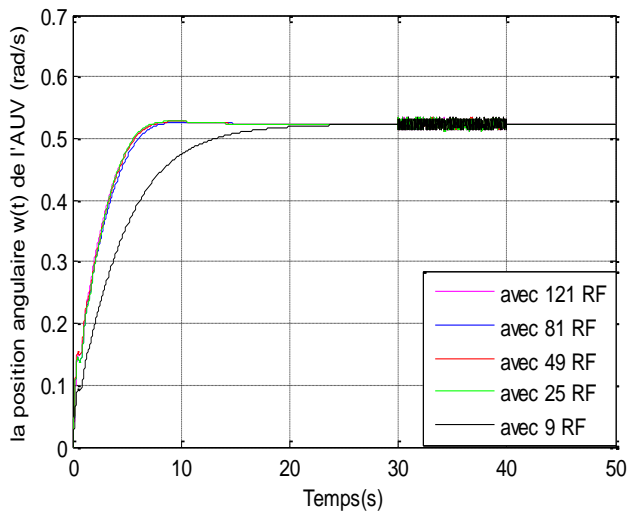
d \ e	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL
VNL	VPL	VPL	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z
NL	VPL	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS
NM	VPL	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM
NS	VPL	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
Z	VPL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL
PS	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL
PM	PM	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL
PL	PS	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL	VNL
VPL	Z	NS	NM	NL	VNL	VNL	VNL	VNL	VNL

Tab III.16. cas 91 règles floues (9 fonctions d'appartenances)

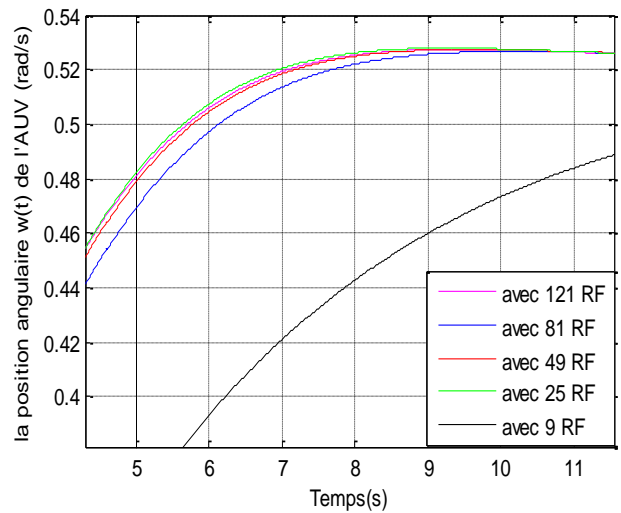
d \ e	VPL	PL	PM	PS	VPS	Z	VNS	NS	NM	NL	VNL
VNL	VPL	VPL	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z
NL	VPL	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS
NM	VPL	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS
NS	PL	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS
VNS	PL	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS
Z	PM	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM
VPS	PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL
PS	PS	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL
PM	VPS	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL
PL	VPS	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL	VNL
VPL	Z	VNS	VNS	NS	NS	NM	NL	NL	VNL	VNL	VNL

Tab III.17. cas 121 règles floues (11 fonctions d'appartenance)

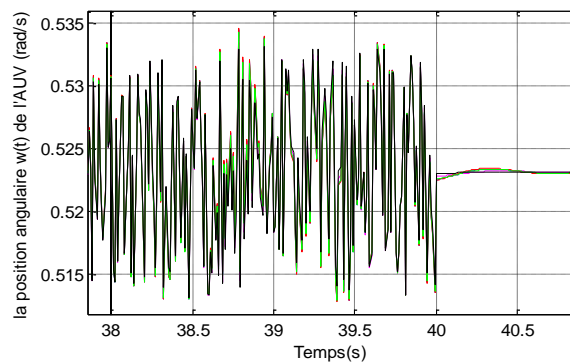
Les résultats de simulation dans ce 2^{ème} cas sont illustrés dans les figures suivantes (de figure III.10, figure III.11 et figure III.12).



(a)



(b)



(c)

Figure III.10 (a) La position angulaire $w(t)$ du 3^{ème} cas, (b) et (c) leur agrandissement 'zoom'.

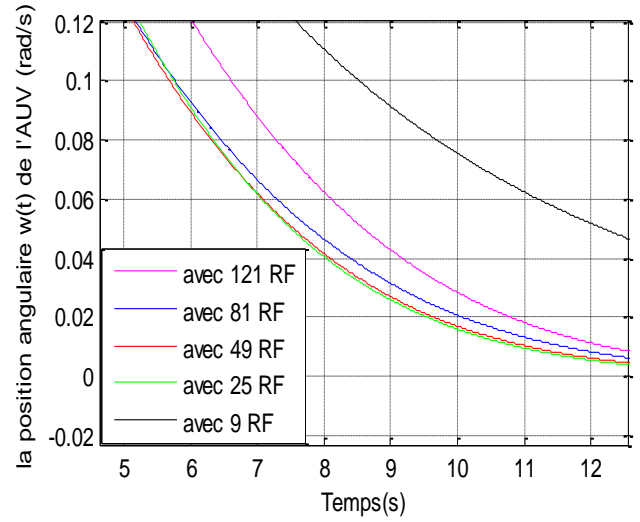
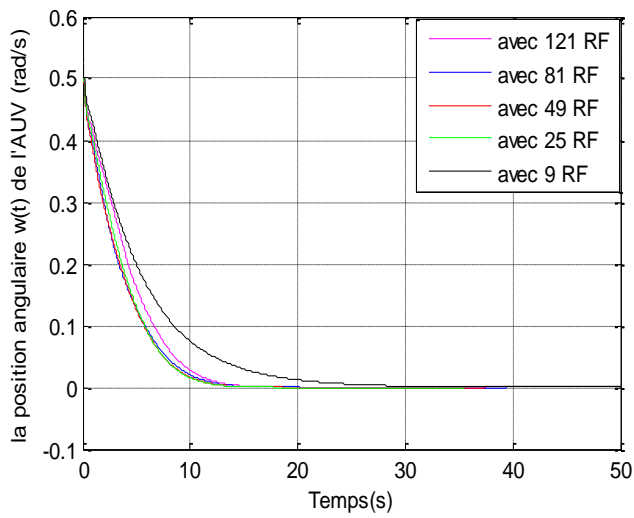
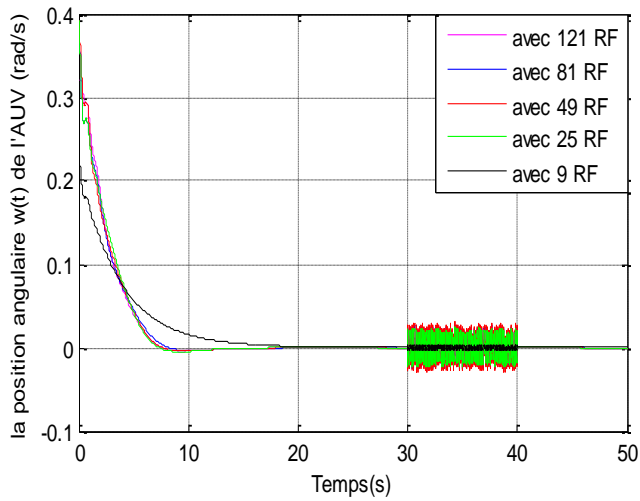
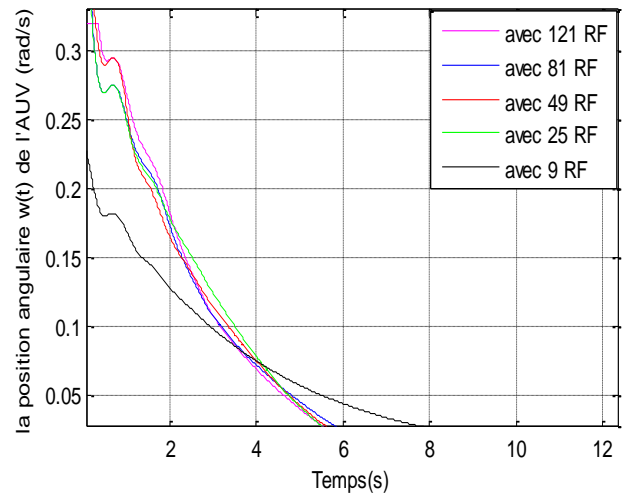


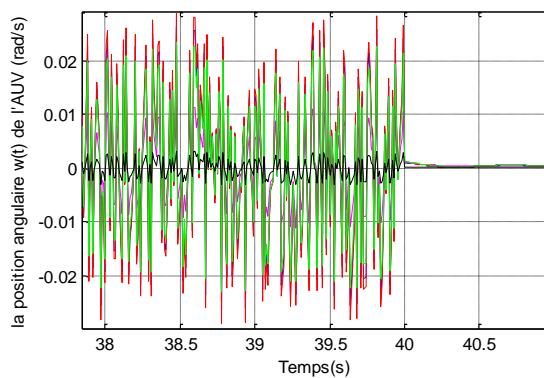
Figure III.11 L'erreur du 3^{ème} cas (et leur agrandissement 'zoom').



(a)



(b)



(c)

Figure III.12 La commande du 3^{ème} cas, (b) et (c) leur agrandissement 'zoom'.

Les performances temporelles de ce 2^{ième} cas sont données dans le tableau (Tab 18)

	tm	tr	D%	Vinf	e
Cas 121 RF	2.1188	5.5883	0.74%	0.5236	0.0000
Cas 81 RF	2.2875	6.0044	0.61%	0.5236	0.0000
Cas 49 RF	2.2278	5.6582	0.76%	0.5236	0.0000
Cas 25RF	2.2638	5.5296	0.84%	0.5236	0.0000
Cas 9RF	3.9975	12.7445	0.00%	0.5235	0.0001

Tab III.18. Performances temporelles obtenues en 3^{ième} cas.

Les résultats de simulation en présence de perturbation (3^{ième} cas) montrent l'efficacité d'introduire ces perturbations comme des variables d'entrée au FLC et aussi on constate que la meilleure valeur optimale du nombre de RF est 25 RF (5 fonctions d'appartenance) et quelque soit le changement de ce nombre de règles floues, les performances restent presque les mêmes.

III.4. Conclusion

Ce chapitre englobe les résultats des différentes applications du FLC au AUV. Les résultats de simulation nous montrent qu'il suffit de limiter le nombre de règles floues associées à 5 fonction d'appartenance (5 , 13 ou 25 RF selon le cas étudié) pour la plupart des cas car la croissance de ce nombre ne conduit pas à l'obtention de meilleurs résultats. Comme une deuxième résultat, l'introduction des perturbations comme des entrées du régulateur flou (FLC) permet de limiter leurs valeurs et rends le système perturbé toujours stable.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre sujet, nous avons parlé du Le contrôle par logique floue (FLC) est le domaine de recherche le plus actif dans l'application de la théorie des ensembles flous, de l'inférence floue et de la logique floue. L'application du FLC s'étend du contrôle des processus industriels à l'instrumentation biomédicale et à la sécurité. Par rapport aux techniques de contrôle traditionnelles, le FLC a été mieux utilisé pour des problèmes complexes indéfinis, qui peuvent être contrôlés par un opérateur humain efficace sans connaître leur dynamique de base, contrôle flou qui est une théorie très puissante pour tirer des conclusions et générer des réponses à partir d'informations vagues, incomplètes et inexacts lorsque le modèle du système est inconnu ou difficile à formuler., nous avons présenté les fondements théoriques de la logique floue, les intérêts ainsi que le principe du système d'inférence floue, et les paramètres de conception FLC. Le monde sous-marin est un domaine aussi fascinant que dangereux. De tout temps, les hommes se sont posés des questions pour mieux comprendre et connaître cet univers. Cependant des zones restent quasiment inaccessibles aux hommes. De même, certaines populations aquatiques (faune ou flore) restent encore très mystérieuses. Pour combler ce manque, les hommes et plus particulièrement quelques entreprises étant aussi bien compétente dans le domaine de l'automatique que dans celui de la construction navale, ont repris le principe de l'avion drone pour l'adapter aux sous-marins. Les sous-marins autonomes autrement appelés AUV (Autonomous Underwater Vehicles) sont ainsi nés. Ces engins ayant de ce fait la capacité d'aller dans les zones inaccessibles et de faire ce que les autres sous-marins ne pouvaient pas faire et d'aller là où ils ne pouvaient pas aller. Nous verrons donc ce qu'est exactement un AUV, son fonctionnement. Ensuite nous distinguerons ses particularités, ses avancées possibles. De plus, nous analyserons son utilisation que nous illustrerons avec quelques applications actuelles et à venir. Le système flou joue un rôle fondamental dans les véhicules autonomes sous-marins de nombreux types différents, mais aussi sur la structuration et le fonctionnement de ces véhicules avec la modélisation générale du véhicule sous-marin autonome sous l'eau, notre sujet comprenait également les résultats de différentes applications du FLC sur le modèle linéaire d'un AUV, nous avons fini notre présentation par la modélisation générale du

véhicule sous-marin autonome. Cette modélisation d'une AUV sera utilisée comme un système à contrôler et stabiliser par un régulateur flou afin d'étudier les performances de cette commande ainsi que déterminer l'influence du nombre de règles flous sur ces performances, les applications de contrôleur FLC, selon plusieurs cas, sur le modèle d'un AUV cité précédemment afin de commander sa position angulaire autour d'une référence donnée. Plusieurs stratégies et cas sont détaillés dans cette simulation selon le nombre de règles floues (RF), nombre d'entrées au FLC et l'absence ou la présence de la perturbation. L'objectif de cette application porte essentiellement sur l'influence du nombre de règles floues sur les performances du système régulé.

les résultats de la simulation nous ont montré qu'il suffit de limiter le nombre des règles floues à 5 fonction d'appartenance (5, 13 ou 25 RF selon le cas étudié) pour la plupart des cas car la croissance de ce nombre ne conduit pas à l'obtention de meilleurs résultats que celles obtenues par le régulateur FLC à nombre de RF supérieur à 5 fonction d'appartenance, et l'introduction de perturbations en entrée du régulateur FLC permet de limiter sa valeur et de stabiliser en permanence le système perturbé.

Enfin, on peut tirer la perspective qu'il est possible d'utiliser les méthodes d'optimisation tels que les algorithmes génétiques afin d'obtenir la limite du nombre de règles floues optimal.

Bibliographique

Bibliographique

- [1] D.MOKEDDEM, «Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat En Sciences en Electronique, Université Ferhat Abbas de Setif-2010.
- [2] A. MEDJGHOU, « Application des techniques de l'intelligence artificielle à la commande des systèmes robotiques », Thèse de Docteur en Électronique, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd-2018.
- [3] A. ZEROUAL, « Etude de l'implémentation d'un contrôleur à logique floue sur une carte FPGA », Université 8 mai 1945 Guelma-2013.
- [4] W.BENAMARA, A. CHERGUI, « Application de la logique floue au contrôle de tension du convertisseur élévateur (Boost)», Projet de fin d'études de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent- 2019/2020.
- [5] H. ALILOUCH, « Conception et Analyse Des Performances D'un Contrôleur Flou Pour Un Système De Réglage De Tension Automatique », Mémoire de la Maitrise en Ingénierie, Université du QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE-2020.
- [6] M. Laamayad Tahar, « Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue », Mémoire Magister, Université de Batna-2008.
- [7] L. Chabani, A.Guedda, I. Messaoudi, « Commande par La Logique Floue de La Machine Synchrone a Aimants Permanents», Mémoire Master Academique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued-2020/2021.
- [8] A. ZEROUAL, « Implémentation d'un contrôleur à logique floue sur une carte FPGA Virtex-II Pro-LC XC2VP4-5 FG456C », Mémoire Master, Université Larbi ben Mhidi- Oum el Bouaghi -2011.
- [9] M.MOUSSAOUI, « Contrôleur Flou Testable », Mémoire Magister, Université FERHAT ABBAS – SETIF- 2009.
- [10] CHRISTOPHER VON ALT, « Autonomous Underwater Vehicles », Woods Hole Oceanographic Institution-2003.

- [11] M. Adel Khadhraoui, « Modélisation et simulation interactive pour la navigation d'un robot sous-marin de type ROV Observer », Thèse de doctorat, l'ecole polytechnique de Tunisie et de l'universite Paris-saclay – 2015.
- [12] S. Ben Saad , «Conception d'un algorithme de coordination hybride de groupes de robots sous-marins communicants », Thèse de doctorat , université de Bretagne occidentale-2016.
- [13] Les Sous-Marins Autonomes, Rapport de TIPE - 2005/2006,EPMI Ecole d'ingénieurs.
- [14] A. HATTAB, « Modélisation et commande robuste d'un robot sous-marin autonome », Thèse de Doctorat en Sciences, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf-2015/2016.
- [15] K. Ishaque , S. S. Abdullah , S. M. Ayob , Z. Salam, « Single Input Fuzzy Logic Controller for Unmanned Underwater Vehicle », J Intell Robot Syst (2010) vol(59) , pp. 87–100, DOI 10.1007/s10846-010-9395-x.
- [16] Emilie Roche, « Commande robuste d'un véhicule sous-marin autonome », Département d'Automatique de Gipsa-lab-2008.

Résumé

La logique floue est une forme de logique multivaluée où la valeur des variables peut être n'importe quel nombre réel entre zéro et un qui est utilisé pour traiter le concept de vérité partielle.

Dans ce travail, nous avons analysé et simulé l'unité de contrôle floue avec une seule entrée pour un modèle de véhicule sous-marin sans pilote en fonction du nombre de règles floues utilisées à chaque installation du FLC, Et nous avons observé l'effet de changer ce nombre en cas de présence et d'absence de perturbations et également d'étudier les différentes performances dynamiques de ce contrôleur.

Abstract

Fuzzy logic is a form of many-valued logic where the value of variables can be any real number between zero and one which is used to deal with the concept of partial truth.

In this work, we analyzed and simulated the fuzzy control unit with a single input for an unmanned underwater vehicle model based on the number of fuzzy rules used at each installation of the FLC, And we observed the effect of changing this number in case of presence and absence of disturbances and also to study the different dynamic performances of this controller.

ملخص

المنطق الضبابي هو شكل من اشكال المنطق متعدد القيم حيث قد تكون قيمة المتغيرات اي رقم حقيقي بين الصفر والواحد على حد سواء يتم استخدامه للتعامل مع مفهوم الحقيقة الجزئية.

في هذا العمل قمنا بتحليل ومحاكاة وحدة التحكم ضبابية ذات ادخال واحد لنموذج مركبة غير مأهولة تحت الماء اعتماداً على عدد القواعد الغامضة المستخدمة في كل مرة تركيب FLC وكعمل إضافي قمنا ايضا بعرض نتائج التحكم الضبابي لمدخلين واستنتجنا منه تأثير زيادة او نقصان هذه القواعد, ولاحظنا تأثير التغيير في هذا الرقم في حالات وجود الاضطرابات وعدم وجودها وأيضاً دراسة الأداء الديناميكي المختلف لهذا المتحكم.