

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'automatique

N° :/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Automatique

SPÉCIALITÉ : Automatique et informatique industrielle

Thème

**COMMANDE ADAPTATIVE FLOUE D'UN VÉHICULE
SOUS-MARIN AVEC SATURATION DES ENTRÉES**

Présenté Par : BEN BELKACEM Youssouf

KHOMS Hatem

Date de soutenance : 14/07/2022.

Jury de Soutenance

Président : A. BOULKROUNE

Univ MSB jijel

Encadreur : A. ZIBRA

Univ MSB jijel

Examineur : D. SAIFIA

Univ MSB jijel

Promotion : 2021 /2022

Remerciements

Après louange à Allah, je tiens, tout d'abord, à exprimer mes vifs remerciements à tout le corps éducatif qui m'a permis de préparer ce travail avec la plus grande minutie.

Nous tenons beaucoup à remercier Madame Aicha ZIBRA qui nous a encadrée avec beaucoup d'efficacité et a été la source de précieux conseils et encouragements, et aussi pour sa patience, et sa disponibilité quand nous avons besoin d'elle.

Je voudrais aussi, exprimer mes remerciements les plus sincères à monsieur le président du jury ainsi qu'à ses membres pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, j'adresse ma profonde gratitude à toute ma famille pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de mon cycle.

Merci à tout le Monde.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labour qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, qui ont sacrifiés leurs vies pour notre bien mes frère
et mes sœurs

Mon ami et mon binôme Hatem

Mes amis Hassane et Yasser, Idris, Ismail, lamri, Oussama, Sidi
Mohammed Khattra et Oussama Ghomrani

Et en dernier, un grand merci à toutes celles et tous ceux qui d'une
manière ou d'une autre m'ont aidé et soutenu.

Table des matières

Introduction générale -----	1
CHAPITRE I -----	3
I.1. INTRODUCTION-----	4
I.2. HISTORIQUE -----	4
I.3. LES VEHICULES NON HABITES -----	6
I.4. LES APPLICATIONS DES ROBOTS SOUS-MARINS -----	7
<i>I. 4. 1 Le secteur industriel</i> -----	8
<i>I. 4. 2 Le secteur militaire</i> -----	8
<i>I. 4. 3 L'environnement</i> -----	9
<i>I. 4. 4 Les applications scientifiques</i> -----	9
I.5. STRUCTURE DE CONTROLE-----	10
I.6. LE MODELE DYNAMIQUE-----	11
<i>I. 6. 1 Perturbations</i> -----	12
<i>I. 6. 2 Degrés de liberté</i> -----	12
<i>I. 6. 3 Énoncé du problème</i> -----	14
<i>I. 6. 4 Simulation en boucle ouverte du modèle dynamique</i> -----	17
<i>I. 6. 5 Commentaires sur les résultats de simulation</i> -----	17
I.7. CONCLUSION -----	17
CHAPITRE II -----	18
II.1. INTRODUCTION-----	19
II.2. LA COMMANDE BACKSTEPPING-----	19
<i>II. 2. 1 Principe de la commande Backstepping</i> -----	19
<i>II. 2. 2 Synthèse de la commande Backstepping</i> -----	19
II.3. LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT -----	20
<i>II. 3. 1 Principe de la commande par mode glissant</i> -----	20
<i>II. 3. 2 Synthèse de la commande par mode glissant</i> -----	21
II.4. COMMANDE ADAPTATIVE -----	24
<i>II. 4. 1 Commande adaptative directe</i> -----	25
<i>II. 4. 2 Commande adaptative indirecte</i> -----	25
<i>II. 4. 3 Synthèse de la commande adaptative</i> -----	26

II.5. SYSTEMES FLOUS -----	27
II. 5. 1 Structure d'un système flou -----	27
II. 5. 2 Les systèmes flous de type Takagi-Sugeno (T-S)-----	29
II. 5. 3 Théorème d'approximation universel -----	30
II. 5. 4 Systèmes flous pour l'approximation de fonction-----	31
II.6. CONCLUSION -----	32
CHAPITRE III -----	33
III.1. INTRODUCTION -----	34
III.2. POSITION DU PROBLEME -----	34
III. 2. 1 Compensation de la saturation -----	36
III.3. SYNTHESE DU CONTROLEUR-----	37
III.4. TEST DE SIMULATION-----	44
III.5. CONCLUSION -----	47
Conclusion générale-----	48

Table des figures

Figure I.1: Croquis des premiers sous-marins. _____	5
Figure I.2: Les premiers véhicules sous-marins autonomes non habités. _____	6
Figure I.3: Différents types d'engins sous-marin. _____	6
Figure I.4: Tâches sous-marines fréquentes. _____	7
Figure I.5: Le K-Ster (France) à l'approche d'une mine de fond. _____	8
Figure I.6: Structure de contrôle. _____	10
Figure I.7: Les cadres de référence AUV. _____	13
Figure I.8: Suivi de chemin 3D. _____	13
Figure I.9: Repère fixe et inertiel. _____	15
Figure I.10: Évolution en fonction du temps de la position z. _____	17
Figure II.1: Les deux étapes pour la conception du smc. _____	21
Figure II.2: Commande adaptative. _____	24
Figure II.3: Commande adaptative directe. _____	25
Figure II.4: Commande adaptative indirecte. _____	26
Figure II.5: Structure d'un système flou. _____	28
Figure III.1: Trajectoire de profondeur. _____	45
Figure III.2: La surface de glissement. _____	45
Figure III.3: Dynamique de tangage. _____	46
Figure III.4: L'angle de gouverne donné par la contrôleur. _____	46
Figure III.5: L'angle de gouverne saturé. _____	47

Liste des Tableaux

Tableau 1: SNAME notation pour les véhicules sous-marin _____ **13**

Introduction générale :

Si traverser l'océan aujourd'hui peut se faire sans difficulté, il n'en est pas de même pour l'exploration sous-marine récemment abordée. La découverte de cet environnement n'a pas été facile, car la moitié du fond marin était à plus de 3 000 mètres de profondeur. La fosse sous-marine connue la plus profonde est la fosse des Mariannes, située dans le nord-ouest du Pacifique, non loin du Japon. Le point le plus bas de cette fosse se situe aux alentours de -11000 mètres. Face à cet environnement hostile et dangereux, mais potentiellement riche en ressources à la fois biologiques et potentiellement exploitables, l'homme a besoin d'assistance dans sa découverte des profondeurs abyssales : l'intervention de robots sous-marins est probable une solution [21].

Cependant, la conception, le développement et la mise en œuvre de véhicules sous-marins posent certaines difficultés. Les développements technologiques et scientifiques concernant ces robots sont récents, mais l'intérêt qu'ils suscitent se heurte encore aujourd'hui à des verrous scientifiques importants. Concernant les véhicules sous-marins autonomes, on peut définir quatre grandes problématiques. En premier lieu, l'énergie qu'ils sont capables d'embarquer reste faible au regard des distances à parcourir. En second lieu, le véhicule doit aussi être autonome du point de vue décisionnel et c'est l'une des préoccupations majeures de plusieurs communautés de chercheurs. Un troisième point concerne le positionnement de l'engin.

Le positionnement par balises acoustiques, ainsi que le recalage par système GPS sont des verrous technologiques se heurtant à la difficulté de communiquer sous l'eau. Enfin, certaines équipes de recherche se tournent vers la problématique de la navigation. Elles travaillent essentiellement sur les aspects de la modélisation, du contrôle et de la génération et du suivi de trajectoires.

Pour le contrôle de mouvement des AUV (Autonomous Underwater Vehicles) avec incertitude dynamique et non linéarité, diverses approches de contrôle avancées ont été proposées et testées, telles que la commande par mode glissant adaptative flou, la commande par mode glissant neuronal adaptative, la commande par des réseaux de neurones.

Parmi ces systèmes de commande, les commandes adaptatives basés sur les systèmes flous visent à traiter les incertitudes du modèle du système et les perturbations externes et ses paramètres de contrôle peuvent être mis à jour en ligne en fonction des performances. Par conséquent, la commande adaptative en mode glissant est généralement en mesure de fournir des performances satisfaisantes [19].

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de notre mémoire. Nous proposons de développer un schéma de commande Backstepping adaptative flou par mode glissant pour une classe des systèmes non linéaires incertains, en tenant compte des contraintes, à savoir les perturbations du signal de commande, la saturation et l'incertitude du modèle du système.

Les travaux présentés dans ce travail sont :

- La commande par Backstepping est combinée avec la commande par mode glissement.
- La conception d'une technique d'adaptation à base des systèmes flou.
- Modifier l'erreur de poursuite par la construction d'un système auxiliaire pour résoudre le problème de saturation des entrées.

Cette mémoire est divisée en trois chapitres, organisés comme suit :

Le premier chapitre, propose un état de l'art des différents véhicules sous-marins, ainsi que leurs applications, la modélisation cinématique et dynamique et nous présentons les résultats d'une simulation comportementale en boucle ouverte.

Le chapitre deux, est dédié aux commandes non linéaires utilisées dans le chapitre suivant, les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de ces méthodes sont présentés.

Le troisième chapitre, expose la méthode de commande améliorée combinant le système d'approximation floue et la technologie de commande étudiée dans le deuxième chapitre, la technique proposée Commande Backstepping adaptative flou par mode glissant présente une robustesse face aux incertitudes et aux perturbations externes, avec la construction d'un système auxiliaire pour résoudre le problème de saturation.

Enfin l'efficacité de la méthode proposée est vérifiée par une simulation en temps réel de la commande proposée sur les véhicules sous-marin.

Chapitre I

Les Véhicules sous-marins

I.1. Introduction

Le monde sous-marin est à la fois fascinant et dangereux. En tout temps, les gens se posent des questions pour mieux comprendre et appréhender cet univers. Cependant, certaines zones restent quasiment inaccessibles aux hommes. De même, certaines populations aquatiques (faune ou flore) restent très mystérieuses.

Pour combler ce vide, des personnes, notamment certaines entreprises aussi compétentes dans l'automatisme que dans la construction navale, ont adopté les principes des avions sans pilote pour les adapter aux sous-marins. Le sous-marin autonome aussi appelé AUV (Autonomous Underwater Vehicles) est né. Ces machines ont donc la capacité d'aller dans des zones inaccessibles, de faire des choses que les autres sous-marins ne peuvent pas faire, d'aller là où ils ne peuvent pas.

Ce chapitre, est consacré à un état de l'art sur les véhicules sous-marins autonomes en général et ceux du domaine sous-marin en particulier. Nous commencerons par l'historique des robots sous-marins ainsi que leurs applications dans divers domaines, nous nous intéresserons ensuite à une modélisation d'un système sous-marin le modèle est validé par un test de simulation en boucle ouverte.

Et nous introduisons également la dynamique en boucle ouverte des robots sous-marins en expliquant la complexité de leurs dynamiques, que veux dire l'instabilité de la fonction en boucle ouverte.

I.2. Historique

La conception et la construction de véhicule sous-marin n'étaient pas des idées récentes. Le premier projet retourne à William Bourne en 1578. Il a été le premier à concevoir une construction 'étanche alimentable en oxygène'. En 1624, Cornelis Van Drebbel a proposé le premier véhicule sous-marin à l'aide de 12 rameurs équipés de rames spéciales. Ce bateau était en bois de forme ovoïde a été aussi testé expérimentalement. En 1776, David Bushnell et son frère ont présenté le premier sous-marin "Turtle" construit en acier. Son principe de fonctionnement est similaire aux sous-marins actuels. Il utilisait une hélice pour la propulsion. L'engin s'immergeait en actionnant une valve permettant l'admission d'eau dans un réservoir qui servait de lest. Il remontait grâce à une pompe qui expulsait l'eau. L'autonomie en oxygène était de 30 min [1].

Depuis cette époque, les sous-marins ont fortement évolué d'un point de vue technologique. Une classification des véhicules sous-marins en 2 grands groupes est proposée:

les véhicules habités et les véhicules non habités, mais on va se approfondir sur la dernière du fait que c'est l'objet de notre travail.

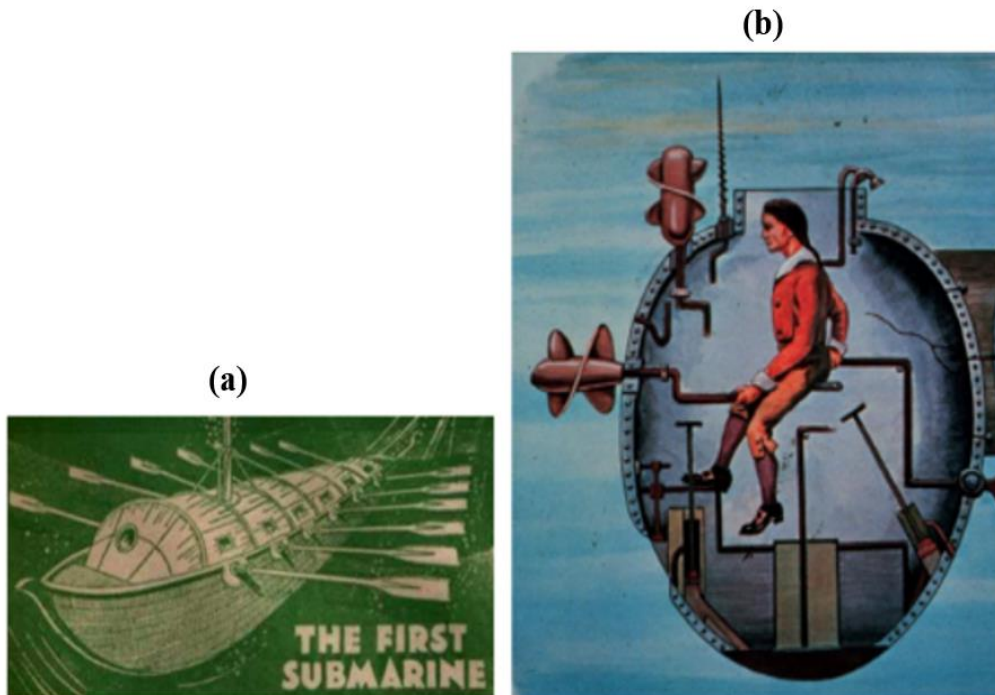


Figure I.1: Croquis des premiers sous-marins. (a) le sous-marin de Van Drebbel, (b) le sous-marin de Bushnell

La Marine a été la première à s'intéresser au développement de systèmes sous-marins sans pilote. En 1866, la marine autrichienne a chargé Robert Whitehead de développer une nouvelle arme pour les navires de guerre. Il démontre l'efficacité d'un système flottant emportant des explosifs à une vitesse de 3 m/s à une distance de 700 m : la torpille est née. Cependant, le vaisseau spatial n'avait pas de systèmes de contrôle et de navigation.

SPURV (Self-Propelled Underwater Research Vehicle, USA, 1977) : Il pèse 480 kg et peut fonctionner à une vitesse de 2,2 m/s pendant 5 heures à une profondeur de 3000 m. Le véhicule est contrôlé acoustiquement. Les chercheurs l'ont utilisé pour mesurer la conductivité et la température (Figure I.2 (a)).

L'épaulard (France, 1976) : Il pèse 3 tonnes et peut courir 7 heures à la vitesse de 1 nœud à 6 000 mètres de profondeur. Il est également connecté acoustiquement à la surface (Figure I.2 (b)). Ces systèmes sont les précurseurs des 2400 UUV couramment actifs dans le monde [2], [3] et nous allons en faire un rapide inventaire. Pour de tels véhicules sous-marins, le type de connexion à la surface déterminera le degré d'autonomie du robot (Figure I.3). On peut distinguer trois types d'engins sous-marins : ceux reliés à la surface par des câbles, ceux reliés par des liaisons acoustiques, et enfin les voitures entièrement autonomes.

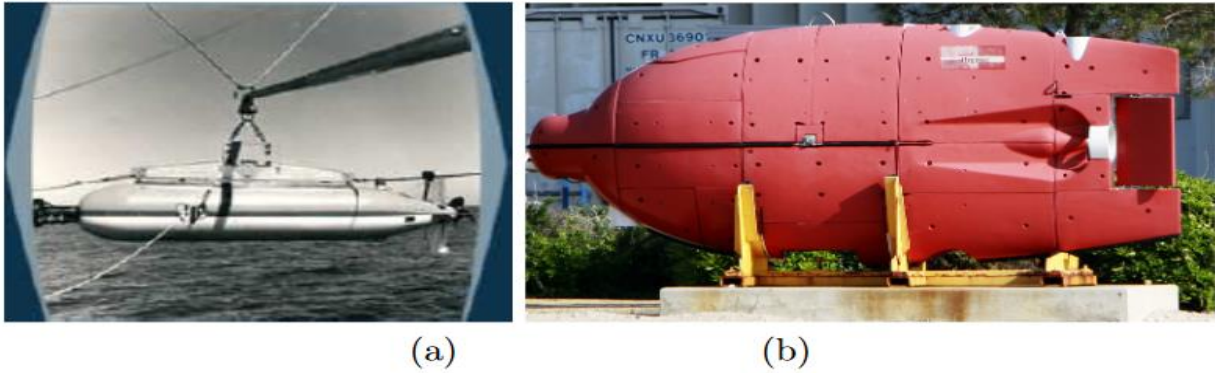


Figure I.2: Les premiers véhicules sous-marins autonomes non habités. (a) Le SUPRV, USA, (b) L'épaulard, France

I.3. Les véhicules non habités

Concernant cette classe de véhicules sous-marins, c'est le type de liaison avec la surface qui va définir le degré d'autonomie du robot (Figure I.3). Nous pouvons distinguer trois catégories d'engins sous-marins : les véhicules reliés par un câble à la surface, ceux reliés par un lien acoustique et enfin les véhicules complètement autonomes.

Les ROVs (Remotely Operated Vehicles) : Ce sont des engins commandés par un opérateur à travers une station au sol ou sur un bateau. Ils sont reliés à la surface par l'intermédiaire d'un câble par lequel transitent les commandes moteurs, l'énergie et les données acquises. Le principal inconvénient de ces robots est la présence de l'ombilical qui rend complexe leurs mouvements et surtout l'étendue de leurs champs d'applications.

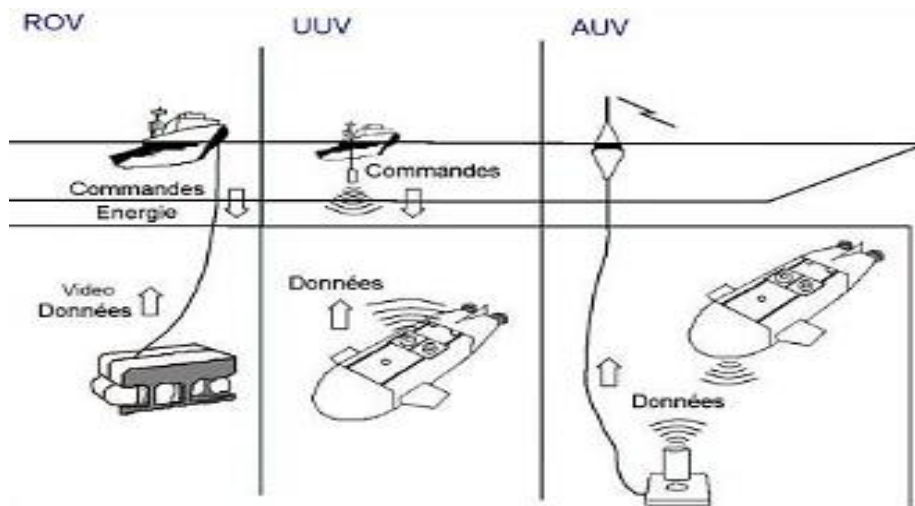


Figure I.3: Différents types d'engins sous-marins

Les UUVs (Unmanned Underwater Vehicles) : engins sous-marins non habités qui sont dotés de systèmes plus ou moins sophistiqués pour leur navigation et leur travail selon leur degré d'autonomie. La principale contrainte réside dans le fait Qu'ils embarquent l'énergie nécessaire à la réalisation de leurs missions. Il existe 2 types d'UUVs :

L'AUV (Autonomous Underwater Vehicle) Un AUV est un robot doté d'un système de localisation et de navigation vers un objectif. Il est totalement autonome, programmé préalablement pour réaliser un scénario de mission prédéfini. A partir de quelques centaines de mètres de profondeur, la structure, les dimensions et les caractéristiques des AUV changent. Les AUV peuvent ainsi être répertoriés en 2 classes selon la profondeur limite d'immersion atteinte

L'UUV (Untethered Underwater Vehicles) fonctionnent comme les AUV, mais il existe un lien acoustique entre la surface et la machine, permettant le contact et le transfert de données. En cas de problème, l'opérateur peut ordonner au système de passer en configuration d'urgence, y compris le retour à la surface. Notamment, la redondance de la terminologie UUV est problématique. En fait, les UUV (Untethered Underwater Vehicles) sont également appelés AUV par abus de langage.

I.4. Les applications des robots sous-marins

Les applications d'intégration dans des véhicules sous-marins peuvent être très larges (Figure I.4). Elles touchent plus particulièrement quatre secteurs qui sont :

- L'industrie.
- Les applications militaires.
- L'environnement.
- Les applications scientifiques.

Nous aborderons les besoins de ces différentes activités dans les paragraphes suivants.

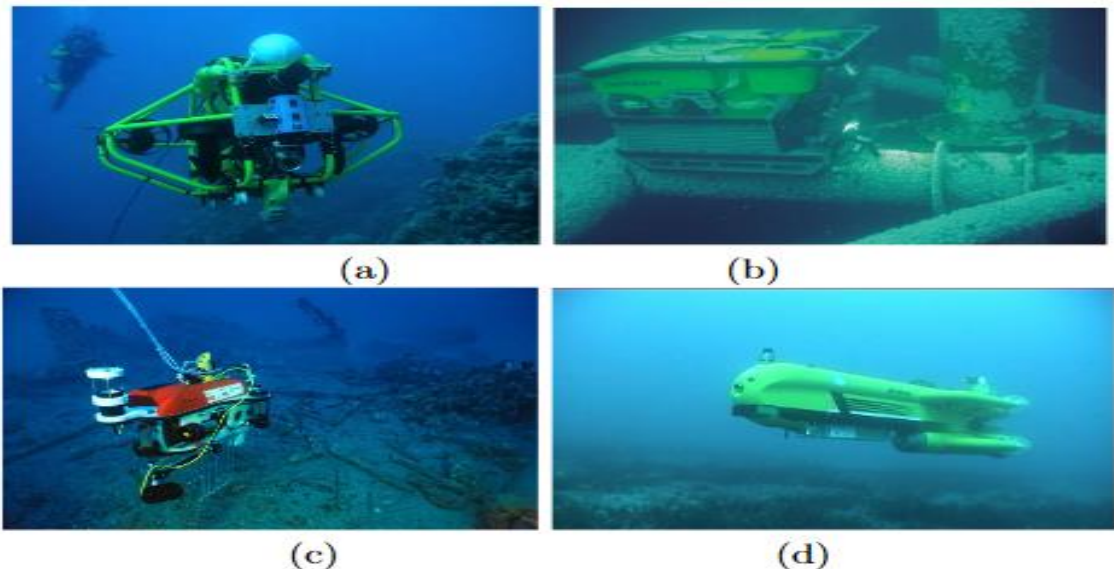


Figure I.4:Tâches sous-marines fréquentes, (a)vérification de la santé des algues, (b)détection de fissures, (c)exploration des épaves, (d)détection d'objet sur le fond marin

I. 4. 1 Le secteur industriel

Le secteur industriel et surtout énergétique utilise les atouts des robots sous-marins pour réaliser certaines tâches comme :

- L'inspection de réacteurs nucléaires et de barrages hydro-électriques [4].
- L'aide à la pose de pipelines ou de câbles et l'inspection des structures marines.
- La détection et l'exploitation des différents gisements présents dans les océans [5].

I. 4. 2 Le secteur militaire

La Marine nationale encourage fortement les recherches sur les véhicules sous-marins autonomes, notamment l'utilisation de cette technologie pour des missions militaires.

L'une des applications militaires les plus étudiées concerne la détection et la destruction de mines sous-marines. La destruction de ces objets est une tâche dangereuse et spécifique, et nous avons découvert que des dispositifs robotiques peuvent localiser et neutraliser ces bombes à la place des humains. Par exemple, Eca Corporation a conçu le **K-Ster** (Figure I.5). Cela le désigne comme une nouvelle arme contre les mines terrestres. Il est très utile et efficace pour déminer le fond des mines grâce à sa tête rotative explosive. Il peut atteindre des mines amarrées, profondes ou enterrées avec précision et efficacité.

La surveillance des ports est une activité importante pour éviter l'intrusion de plongeurs ou encore de véhicules sous-marins classés en tant qu'ennemis dans les ports, des robots autonomes peuvent effectuer un quadrillage dans une zone proche de l'entrée du port. Les robots sous-marins peuvent être utilisés pour l'espionnage, la détection et la délimitation de champs de mines, le remorquage de systèmes d'écoute et la mise en œuvre de contre-mesures acoustiques ou électroniques

Alors, L'engin remplace l'homme pour cette tâche fastidieuse et dangereuse à la fois.



Figure I.5:Le K-Ster (France) à l'approche d'une mine de fond

I. 4. 3 L'environnement

Les gens sont activement préoccupés par la pollution de l'environnement. Le milieu marin n'est donc en effet pas à l'abri de la pollution. Nous savons tous que de nombreux pétroliers s'échouent en haute mer et déversent des quantités astronomiques de pétrole dans l'océan. Une solution possible est d'inspecter plus de contrôler la coque avec un robot sous-marin.

Ces robots peuvent également aider à identifier et détecter une contamination intentionnelle (dégazage). Les véhicules sous-marins équipés de capteurs biochimiques sont capables d'analyser les contaminants, de sorte que les responsables peuvent être identifiés par des comparaisons chimiques des réservoirs de carburant des navires amarrés dans le port.

La surveillance de l'Arctique ; (région entourant le pôle nord) est considérée comme un problème de grande importance. L'évolution des régions polaires est un indicateur très sensible des éléments précurseurs des changements climatiques. Le robot peut remplacer une fois de plus l'homme pour une surveillance autonome sous les banquises sans risquer la vie de celui-ci. L'engin peut également prélever des échantillons de glace à différentes profondeurs pour étudier l'historique du climat. Cette application demande au véhicule un positionnement relatif très précis, mais aussi des capacités à rester positionner en un point fixe en présence de perturbations fortes [6].

La protection de la biodiversité demande une surveillance régulière de zones connues et protégées. L'acquisition d'images vidéo avec des AUVs peut permettre une estimation de l'état de santé de zones naturelles préservées [7]. Par exemple, les biologistes surveillent en particulier l'invasion d'une algue en mer Méditerranée. Cette algue est connue sous le nom de "Caulerpa Taxifolia", elle se propage dans le bassin méditerranéen depuis les années 80.

L'Institut australien des sciences marines utilise des ROV pour inspecter la Grande Barrière de Corail. Ces enquêtes fournissent aux scientifiques des données quantitatives à long terme sur les coraux, les algues ou la vie sous-marine simple. Ces données poussent et enrichissent les études sur l'abondance et les changements de certains organismes sur une large échelle géographique.

I. 4. 4 Les applications scientifiques

Cartographie sous-marine et archéologie Comme mentionné dans les paragraphes précédents, la cartographie sous-marine est une application essentielle. Que ce soit dans le domaine industriel ou pour protéger l'environnement, les véhicules sous-marins équipés des capteurs nécessaires permettent de cartographier les fonds marins avec une excellente qualité.

Les archéologues utilisent les propriétés des véhicules sous-marins pour explorer les épaves et les trésors cachés sous les eaux de l'océan. Les capacités des plongeurs sont limitées en termes d'autonomie et de profondeur d'immersion, aussi les robots sous-marins repoussent les limites pour améliorer et étendre la recherche.

I.5. Structure de contrôle

La structure de contrôle détermine les forces de contrôle requises nécessaires pour diriger l'AUV le long du chemin souhaité, différents objectifs qui peuvent être adressés par la structure de contrôle sont le suivi de trajectoire, le suivi de chemin et le suivi de points de cheminement. Lors de l'élaboration d'une loi de commande, il est nécessaire de vérifier la stabilité des états AUV, et les forces de commande générées doivent également rester dans sa limite maximale. La conception de la loi de commande pour un système entièrement actionné est plus simple qu'un système sous-actionné, mais la carte d'allocation de commande doit faire l'objet d'une attention particulière. Dans un système sous-actionné, il est difficile de développer une loi de commande tout en assurant la stabilité du système. Dans les deux cas, il est nécessaire de montrer la robustesse et l'adaptation de la structure de contrôle aux perturbations externes [20].

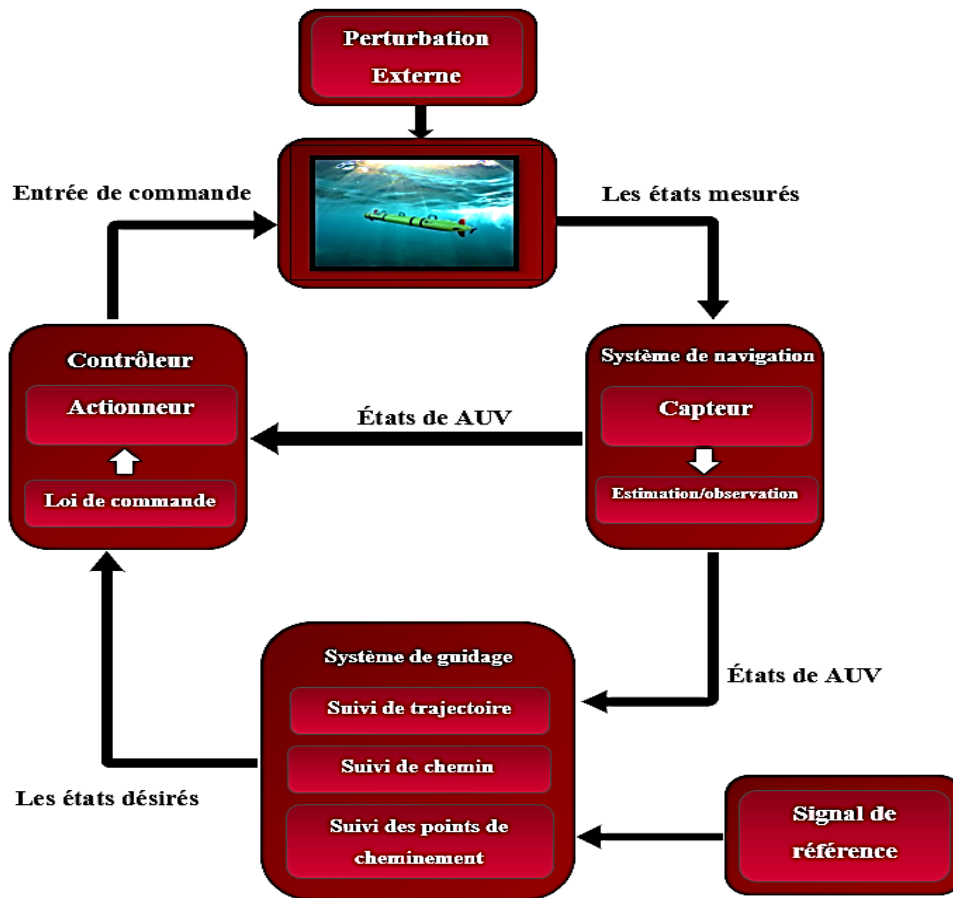


Figure I.6: Structure de contrôle

L'objectif est de développer des algorithmes de contrôle pour un AUV afin d'accomplir suivi d'un chemin souhaité. Outre le suivi de trajectoire, d'autres stratégies de contrôle de mouvement intéressantes sont le suivi de trajectoire et le suivi de points de cheminement, qui sont décrites comme suit :

- **Problème de suivi de trajectoire** : Il s'agit du problème de contrôle où l'AUV doit suivre un chemin paramétré dans le temps. Mais le degré de complexité du développement du contrôleur dépend fortement du fait que le système est entièrement actionné ou sous-actionné. Il n'est pas toujours raisonnable d'utiliser un système entièrement actionné en raison de son coût, de son poids et de son efficacité. Le problème de suivi de trajectoire peut être bien défini pour un système entièrement actionné. Mais c'est encore un domaine de recherche actif pour les systèmes sous-actionnés.
- **Problème de suivi de chemin** : contrairement au point paramétré dans le temps comme souhaité pour le problème de suivi de trajectoire, ici un chemin entier est considéré pour le suivi sans aucune contrainte paramétrée dans le temps. Le suivi de trajectoire est bien adapté aux systèmes sous-actionnés car moins de contraintes sont impliquées. Pour le problème de suivi de chemin, le chemin est représenté avec sa description géométrique et l'AUV doit suivre la propriété géométrique du chemin et finalement converger vers le chemin.
- **Problème de suivi des points de cheminement (way point)** : contrairement aux problèmes de suivi de trajectoire et de suivi de chemin, le problème de suivi des points de cheminement est différent. Ici, un AUV ne suit pas un chemin plutôt qu'une région souhaitée est spécifiée dans une plage visible. La force de contrôle doit être telle qu'elle entraîne l'AUV vers la région confirmant les critères de stabilité. Dans cette approche, une série de points de cheminement sont placés entre la position réelle de l'AUV et la position souhaitée. L'objectif de ce problème est de contrôler l'AUV pour qu'il atteigne la position souhaitée en suivant les 'way-points'. Pour cette raison, cette ci est appelée suivi de points de cheminement.

I.6. Le modèle dynamique

La création de la commande d'un véhicule sous-marin autonome se base sur la connaissance d'un modèle dynamique. Les équations du modèle décrivent les lois qui régissent le comportement du véhicule sous-marin dans l'espace (6 degrés de liberté). Elles modélisent ainsi deux aspects distincts : cinématique et dynamique.

Mais d'abord, nous devons parler brièvement de certains facteurs qui influencent la détermination du modèle.

I. 6. 1 Perturbations

L'environnement sous-marin introduit des effets perturbateurs de nature :

- Non-additive, par la modification des coefficients hydrodynamiques liés au milieu marin. Le principal coefficient hydrodynamique pouvant introduire des perturbations importantes est la masse volumique de l'eau de mer, ou de manière équivalente sa densité.
- Additive, par l'action d'un mouvement ou d'une force supplémentaire sur la dynamique initiale du véhicule. C'est le cas des courants marins, de la houle, et dans une moindre mesure pour les déplacements proches de la surface, le vent.

Densité de l'eau de mer : La masse volumique de l'eau de mer, milieu dans lequel évolue la torpille, est un facteur qui intervient dans la détermination des coefficients hydrodynamiques du véhicule. Il s'agit ici de présenter la plage de variation de cette perturbation à travers la variable équivalente qu'est la densité.

La densité de l'eau de mer dépend de la salinité, de la température et de la pression au point considéré. Un véhicule sous-marin, même parfaitement équilibré évolue dans un milieu où la densité peut croître ou décroître légèrement selon le gradient de salinité ou de température de l'eau de mer.

Courants marins : Les courants marins sont les résultats d'un certain nombre de facteurs incluant :

- Les gradients de température et de densité de l'eau de mer.
- La marée.
- La rotation de la Terre.
- Les effets dus à l'activité solaire.
- Les vents.

Ils sont aussi influencés par la proximité des côtes et la topographie du fond marin.

I. 6. 2 Degrés de liberté

Le nombre de DOF utilisés dans les équations de mouvement est important, car il définit le nombre d'équations différentielles nécessaires pour décrire complètement la position, le déplacement et l'orientation du véhicule dans un modèle d'espace d'état. Un véhicule fonctionnant librement dans un espace tridimensionnel (3D) peut être décrit par un maximum

de 6 DOF, trois composantes de translation et trois de rotation, ce qui donne un modèle d'espace d'état d'ordre 12. Selon l'application, le nombre de DOF peut être réduit même lorsque vous travaillez dans un environnement 3D, mais le faire pour un véhicule avec une dynamique complexe et couplée nécessite souvent beaucoup de simplifications. Les DOF sont également pertinents pour le concept d'actionnement dans les véhicules. Pour qu'un véhicule soit entièrement actionné, il nécessite un actionnement indépendant dans chaque DOF. Si celle-ci n'est pas satisfaite, le véhicule est dit sous-actionné et par conséquent seuls les objectifs de contrôle avec le même nombre de DOF qu'il y a d'actionneurs indépendants peuvent être résolus [9]. Dans le tableau 1, les DOF sont illustrés du point de vue du véhicule.

Tableau 1: SNAME notation pour les véhicules sous-marin

DOF		Force et moment	Vitesse et vitesse angulaire	Position Et Angles d'Euler
1	Translation selon x (longitude)	X	u	x
2	Translation selon y (latérale)	Y	v	y
3	Translation selon z (horizontale)	Z	w	z
4	Rotation autour x (roulis)	K	p	ϕ
5	Rotation autour y (tangage)	M	q	θ
6	Rotation autour z (lacet)	N	r	ψ

Afin de décrire explicitement un AUV se déplaçant dans l'espace 3D, les cadres de coordonnées suivants et les notations correspondantes seront utilisés :

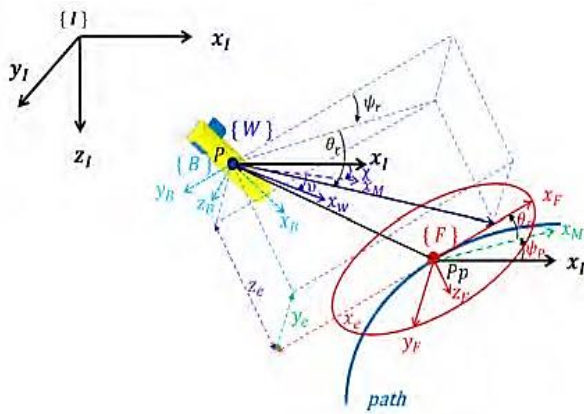


Figure I.7 : Les cadres de référence AUV

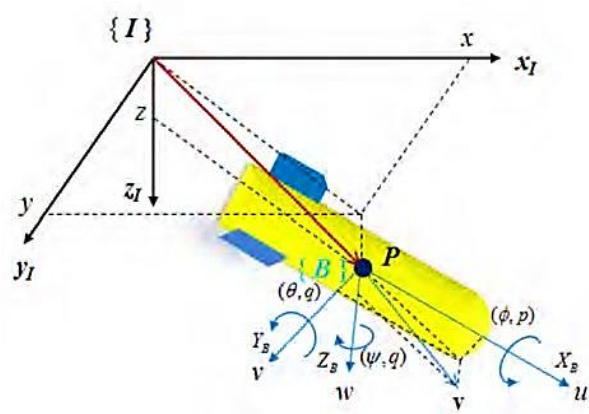


Figure I.8 : Suivi de chemin 3D

- $\{I\}$: Référentiel inertiel (terre fixe)
- $\{B\}$: Châssis (corps fixe)

- $\{\mathbf{W}\}$: cadre de flux (corps fixe, axe des x dans la direction de la vitesse composite AUV [10]).
- $\{\mathbf{F}\}$: Repère de chemin (attaché au point de référence P_p sur le chemin, en abscisse suivant la direction tangente du chemin).
- Le vecteur position de l'AUV $p = [x, y, z]^T$ et le vecteur d'attitude $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ sont décrits dans la trame $\{\mathbf{I}\}$.
- Le vecteur vitesse de translation $v = [u, v, w]^T$ et le vecteur vitesse angulaire $\omega = [p, q, r]^T$ sont décrits dans le cadre $\{\mathbf{B}\}$.
- La vitesse composite AUV $U = [U, 0, 0]^T$ avec $U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ est décrite dans le cadre $\{\mathbf{W}\}$.
- La vitesse composée du point de référence P_p sur la trajectoire $U_p = [U_p, 0, 0]^T$ est décrite dans le repère $\{\mathbf{F}\}$.

Le type d'AUV considéré ici est sous-actionné, car il n'y a pas d'actionneurs dans les directions de balancement et de pilonnement. En général, la plupart des véhicules sous-marins sont conçus pour garantir que la force de rappel hydrodynamique soit suffisamment importante dans le sens du roulis, de sorte que le véhicule puisse être contrôlé sans l'effort de contrôle du couple de roulis [10]. Ainsi, les entrées de commande disponibles pour le véhicule en question sont la force τ_u dans le sens de la poussée et les couples τ_q, τ_r dans les sens de tangage et de lacet.

I. 6. 3 Énoncé du problème

Le comportement dynamique d'un AUV peut être décrit à l'aide des équations non linéaires à six degrés de liberté (DDL) comme [8] :

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \tag{I.1}$$

$$M\dot{v} + C(v)v + g(\eta) + \tau_d = \tau \tag{I.2}$$

Où :

- $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$, est le vecteur des positions et des positions angulaires dans un repère fixe relie à la terre.
- $v = [u, v, w, p, q, r]^T$, le vecteur des vitesses et des vitesses angulaires dans un repère fixe du corps du véhicule.
- M , est la matrice d'inertie incluant la masse supplémentaire.

véhicule et considérons la vitesse de pilonnement comme une perturbation. Et dans le plan de plongée, nous supposons que les vitesses angulaires de roulis et de lacet sont également proches de zéro. Cela pourrait être acquis en ajustant correctement le régime de l'hélice et les angles des gouvernails.

On suppose que les signaux de commande de deux propulseurs ont tous deux la même constante. Par conséquent, le contrôle de la profondeur de l'AUV ne pouvait être acquis qu'en ajustant correctement l'angle des gouvernails d'étrave.

Sous les hypothèses ci-dessus, la dynamique de l'attitude pourrait être simplifiée comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \\ &= -u \sin \theta + d_z\end{aligned}\tag{I.4}$$

- Avec d_z considérés comme une perturbation.

Et l'équation de tangage pourrait être écrite comme :

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \approx q \cos \phi\tag{I.5}$$

Lorsqu'un AUV navigue à vitesse constante, l'angle de roulis ϕ est presque constant [11]. Sans perte de généralité, nous supposons que $\phi \approx 0$. Par conséquent, l'équation. (I.5) pourrait être réécrit comme :

$$\dot{\theta} \approx q\tag{I.6}$$

Dans un système AUV, l'équation dynamique du système de contrôle de plongée doit être écrite comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -u \sin \theta + d_z \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{q} &= f_q - b \times \delta + d_q\end{aligned}\tag{I.7}$$

- u , est la vitesse longitudinale.
- f_q et b ,sont des fonctions non linéaires connues.
- δ , est l'angle des gouvernes.
- d_q ,est l'incertitude sur la dynamique du mouvement de tangage, y compris la dynamique non modélisée et la perturbation externe.

I. 6. 4 Simulation en boucle ouverte du modèle dynamique

Dans cette section, nous présentons la simulation numérique du modèle dynamique de Véhicule sous-marin en boucle ouverte (BO). La position initiale est :

$$[z, \theta, q]^T = [0, 0, 0]^T$$

Considérez le modèle suivant :

$$u = 1.5 \text{ m/s}, b = 0.73, d_z = 0.02 \sin(2\pi t / 10), f_q = -0.24 \sin \theta,$$

$$d_q = -4.65q - 0.002q|q|.$$

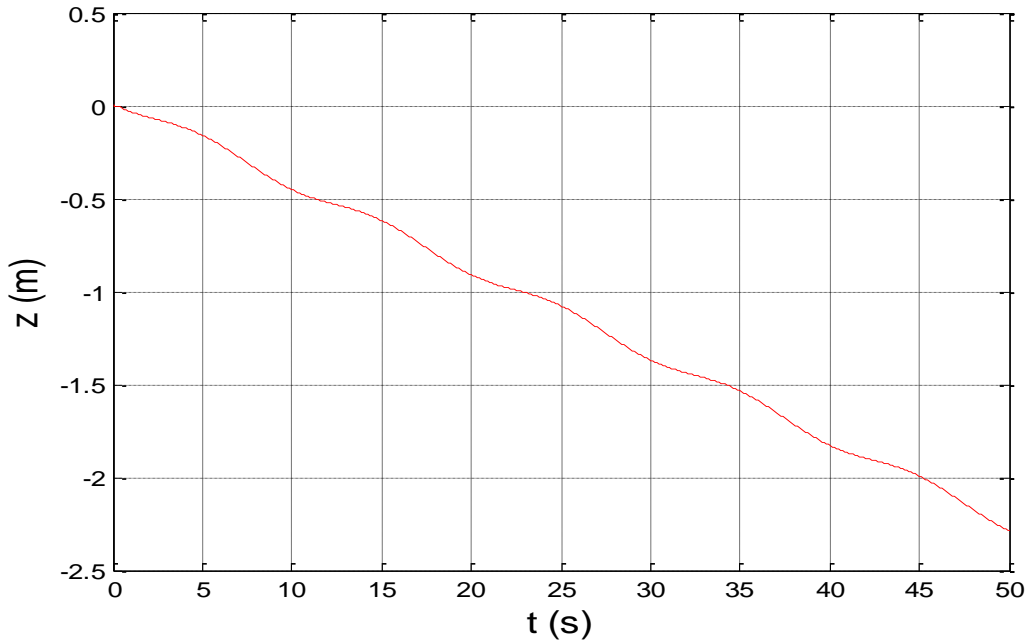


Figure I.10: Évolution en fonction du temps de la position z.

I. 6. 5 Commentaires sur les résultats de simulation

Dans les résultats obtenus, nous pouvons voir que le véhicule sous-marin est caractérisé par une dynamique instable en boucle ouverte.

I.7. Conclusion

Le véhicule sous-marin est un engin qui connaît sa position et navigue vers une cible et se déplace de manière autonome, Il peut travailler dans des conditions très défavorables et difficiles pour l'être humain. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à une modélisation des systèmes qui sont caractérisés par une dynamique instable en boucle ouverte.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différents aspects théoriques de la commande issus de la littérature qui permettent de résoudre les problèmes liés aux commandes des systèmes non linéaires.

Chapitre II

Introduction aux Techniques de Commandes

Non linéaires

II.1.Introduction

Les lois de commande classiques du type PID sont très efficaces dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. Les lois de commande dite à structure variable constituent une solution à ces problèmes.

Dans ce chapitre nous présenterons les différents aspects théoriques de la commande issus de la littérature qui permettent de résoudre les problèmes liés aux commandes de systèmes non linéaires, où nous nous intéresserons particulièrement à la commande Backstepping, la commande par modes glissants, la commande adaptative et la commande adaptative à base des systèmes flous.

L'objectif de ce chapitre, est de souligner les idées sur lesquelles sont basées les lois de commandes élaborées dans la suite du travail.

II.2.La commande Backstepping

La méthodologie de la conception de contrôleur par Backstepping fournit un outil efficace de conception des contrôleurs pour une large classe de systèmes non linéaires avec une structure triangulaire.

Krstic, Kanellakopoulos et Kokotovic [12] ont Développés cette approche d'une manière systématique. Basée sur le principe de stabilité au sens de Lyapunov.

II. 2. 1 Principe de la commande Backstepping

L'idée de base derrière le Backstepping est de décomposer un problème de conception sur le système complet en une séquence de sous-problèmes sur des systèmes d'ordre inférieur, et d'utiliser de manière récursive certains états comme "commande virtuelles" pour obtenir les lois de commande intermédiaires avec la fonction de commande de Lyapunov. Donc La commande par Backstepping est une commande performante, qui assure une stabilité globale ou bien local.

II. 2. 2 Synthèse de la commande Backstepping

Considérons un système de la forme suivant :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)u\end{aligned}\tag{II.1}$$

Nous voulons que la sortie $y = x_1$ suit un certain signal de référence $y_r(t)$. Lors de l'application du Backstepping, nous devons continuellement effectuer les étapes suivantes, en commençant par $i = 1$ et en continuant jusqu'à $i = n$.

- A l'équation i , définir le signal d'erreur $z_i = x_i - x_{i,d}$. (Notez que $x_{1,d} = y_r$).
- Réécrire l'équation en utilisant le signal d'erreur z_i . (Donc, utilisez $\dot{z}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i,d}$ et remplacez x_i par $z_i + x_{i,d}$).
- Traitez x_{i+1} comme s'il s'agissait de l'entrée de commande. (En fait c'est la commande virtuelle).
- Trouver une fonction de Lyapunov (FCL). (Pour les équations 1 à i). Une suggestion serait comme :

$$V_i = \frac{1}{2} z_1^2 + \dots + \frac{1}{2} z_i^2 \quad (\text{II.2})$$

- Utilisez la fonction de Lyapunov pour dériver l'expression de $x_{i+1,d}$ (la fonction de stabilisation) pour la commande virtuelle x_{i+1} . (Notez qu'à l'équation n , vous utilisez l'entrée u au lieu de x_{n+1}).

L'application des étapes ci-dessus pour $i = 1$ à $i = n$ stabilisera le système.

II.3. La commande par mode glissant

La commande par mode glissant (sliding mode control) a été proposée et élaborée pour la première fois au début des années 1950 en Union soviétique par Emelyanov et plusieurs corechercheurs tels que Utkins et Itkis [12]. Au cours des dernières décennies, un intérêt significatif pour la SMC a été généré dans la communauté de la recherche sur la commande. Le SMC a été appliqué, y compris les systèmes non linéaires, les systèmes multi-entrées multi-sorties (MIMO), les modèles à temps discret, les systèmes à grande échelle et à dimension infinie et les systèmes stochastiques. La caractéristique la plus importante du SMC est qu'il est totalement insensible aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes, donc L'avantage de cette commande est qu'elle est robuste aux perturbations et aux incertitudes du modèle.

II. 3. 1 Principe de la commande par mode glissant

Il y a deux étapes dans la conception du SMC :

- La première étape : consiste à concevoir une surface de glissement de sorte que si le système est limité à la surface de glissement ait une réponse de système souhaitée. Cela

signifie que les variables d'état de la dynamique du système sont contraintes de satisfaire un autre ensemble d'équations qui définissent la surface dite de glissement.

- La deuxième étape : consiste à construire la commande nécessaire pour conduire la trajectoire de l'état du système vers la surface de glissement. Ces constructions sont basées sur la théorie de la stabilité au sens de Lyapunov.

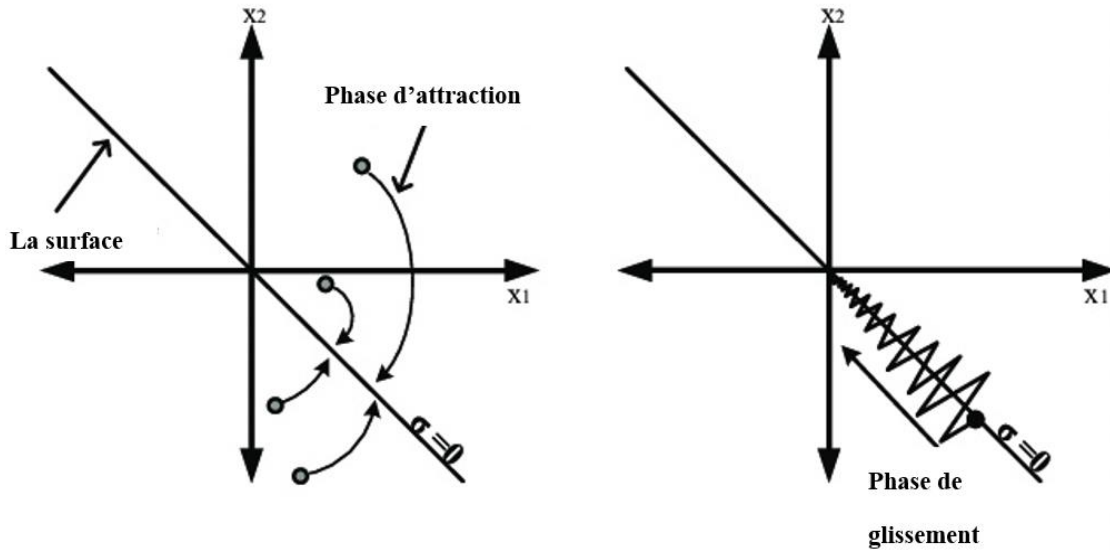


Figure II.1: Les deux étapes pour la conception du smc

II. 3. 2 Synthèse de la commande par mode glissant

Soit un système défini par l'équation d'état non linéaire de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x) + g(x)u \\ y = x \end{cases} \quad (II.3)$$

Où : $x^{(n)}$ est la $n^{ième}$ dérivée de x en fonction du temps, u la commande du système et $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ le vecteur d'état $f(x)$ et $g(x)$ sont des fonctions non linéaires. $g(x)$ est supposée inversible.

Notre but est d'atteindre un état désiré $x_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]$ en présence des incertitudes du modèle sur $f(x)$ et $g(x)$. On définit le vecteur de l'erreur de poursuite comme :

$$e(t) = y(t) - x_d(t) = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T.$$

Une surface de glissement $s(x,t)$ varie en fonction du temps dans l'espace d'état \mathfrak{R}^n est donnée par [1,9,48].

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (\text{II.4})$$

Où λ est une constante strictement positive et $s(x,t)$ un scalaire.

Le problème de poursuite de l'état désiré $y(t) = x_d(t)$ revient à maintenir les états du système sur la surface $s(x,t)$ pour tout $t > 0$.

Le choix particulier de la surface de glissement satisfait la condition (II.5) :

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2(x,t) \leq -\eta |s(x,t)|, \eta > 0 \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.5) [12] qui est appelée condition d'attraction force les trajectoires d'état à se diriger vers la surface de glissement comme indiqué sur la (Figure II.1). On assume que $s > 0$ et on définit t_f comme étant le temps nécessaire à une trajectoire pour atteindre la surface $s(x,t)$

L'équation (II.5) peut être réécrite comme suit :

$$\frac{d}{dt} s(x,t) \leq -\eta \quad (\text{II.6})$$

En intégrant (II.6) de $t = 0$ à $t = t_f$ on obtient :

$$s(t_f) - s(0) \leq -\eta(t_f - 0) \quad (\text{II.7})$$

Vu que $s(t_f) = 0$, l'équation (II.7) deviendra :

$$t_f \leq s(0) / \eta \quad (\text{II.8})$$

t_f peut aussi être obtenu en considérant le cas où $s < 0$, ce qui donne :

$$t_f \leq |s(0)| / \eta \quad (\text{II.9})$$

L'équation (II.9) garantit que si les trajectoires sont à l'extérieur de $s(x,t)$, elles atteindront la surface de glissement dans un temps fini inférieur à $|s(0)| / \eta$. Lorsque la surface de glissement $s = 0$ est atteinte, l'erreur tend vers zéro exponentiellement ($y = x_d$). Pour une condition permettant de donner à la surface de glissement une dynamique de convergence vers zéro, on utilise généralement la condition d'attractivité non-linéaire suivante [13].

$$s(x,t) \dot{s}(x,t) \leq -\eta |s(x,t)| \quad (\text{II.10})$$

L'élaboration de la loi de commande par mode glissant est basée sur le critère de stabilité de Lyapunov, cette loi est choisie telle que la dérivée d'une fonction de Lyapunov soit négative. L'idée est d'utiliser la fonction scalaire $s(x,t)$ pour définir la fonction de Lyapunov :

$$V(x,t) = \frac{1}{2} s^T(x,t)s(x,t) \quad (\text{II.11})$$

La fonction de Lyapunov est définie positive de manière évidente et sa dérivée est :

$$\dot{V}(x) = s(x,t)\dot{s}(x,t) < 0 \quad (\text{II.12})$$

La commande développée doit satisfaire la condition (II.12). La construction de cette loi de commande consiste à admettre qu'en mode de glissement le système piloté par une commande u_{eq} , solution de $\dot{s} = 0$, dite commande équivalente qui permet de maintenir l'état du système sur la surface $s = 0$.

Le calcul de la commande équivalente s'effectue en prenant en considération les conditions d'invariance suivantes :

$$\begin{cases} s(x,t) = 0 \\ \dot{s}(x,t) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Finalement une commande par mode glissant peut s'écrire comme suit :

$$u = u_{eq} + u_c \quad (\text{II.14})$$

Avec :

u_{eq} la commande équivalente qui satisfait la condition (II.13) et qui s'écrit :

$$u_{eq} = \left[\frac{\partial s}{\partial t}(g(x,t)) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial s}{\partial t}(f(x,t)) \quad (\text{II.15})$$

u_c la commande de commutation qui satisfait la condition (II.10) et peut prendre plusieurs formes où la plus utilisée est :

$$u_c = -\eta \text{sign}(s(x,t)) \quad (\text{II.16})$$

La commande par mode de glissement présenté possède un grand intérêt du point de vue de la simplicité de développement, la rapidité de convergence et de la robustesse vis-à-vis les perturbations externes et les incertitudes, mais présente un inconvénient majeur réside dans le problème de chattering provenant du terme 'sign', en comparant avec la commande par backstepping qui s'avère plus précise et plus stable, mais main robuste. La combinaison de ces deux techniques peut nous offrir plus de performance coté robustesse et stabilité, si la

supposition de la connaissance est relâchée (system inconnue) les techniques de la commande adaptative ont prouvé leurs efficacités.

II.4. Commande Adaptative

La commande adaptative est un ensemble de techniques qui permettent de fournir une approche systématique pour l'ajustement des correcteurs en temps réel. Par ajustement, on fait référence à la mise à jour des paramètres des correcteurs.

Le but de la commande adaptative est d'atteindre et de maintenir le degré de performances désiré pour le système de commande quand les paramètres du système sont inconnus ou variables dans le temps.

Elle est basée sur le concept de l'estimation en ligne des paramètres pour l'ajustement d'une loi de commande. Cette commande a été développée vers les débuts des années 1950 [12].

En général, il existe deux principaux schémas pour la commande adaptative [14] : la commande adaptative à modèle de référence (MRAC) et la commande auto-ajustable (STAC). Dans MRAC, le mécanisme d'adaptation estime les paramètres appropriés, de sorte que le système se comporte comme le modèle de référence. Dans STAC, les paramètres à variation lente ou les constantes inconnues sont optimisés de manière à minimiser / maximiser une fonction objective, généralement une minimisation de l'erreur ou une maximisation de l'efficacité.

La (Figure II.2), illustre le schéma de principe d'un correcteur adaptatif.

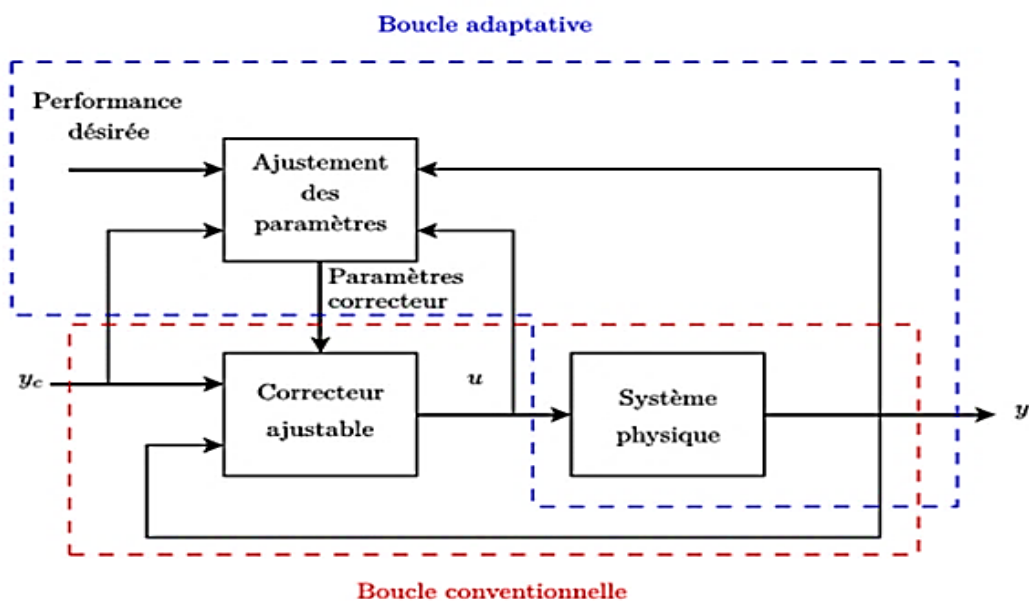


Figure II.2:Commande adaptative

On distingue deux boucles : Une boucle de commande classique et une boucle d'ajustement des paramètres.

- **Boucle de commande classique :** Comme en commande conventionnelle, le rôle de cette boucle est de rejeter les perturbations agissantes sur les grandeurs intervenant dans le système de commande (perturbation de commande, de sortie, bruit de mesure).
- **Boucle d'ajustement des paramètres :** Elle intervient pour ajuster les paramètres du correcteur quand les paramètres du système subissent des perturbations. Cette boucle calcule un indice de performance à partir de la sortie, des états et de la commande. Cet indice est utilisé pour ajuster les paramètres du correcteur pour avoir l'indice de performance désiré. L'action des deux boucles est décrite dans cet exemple.

II. 4. 1 Commande adaptative directe

Le but de la commande adaptative directe peut se résumer en deux points :

- Avoir une erreur nulle entre la sortie du système commandé et la modèle de sortie désirée.
- Avoir une erreur qui converge asymptotiquement vers zéro si les conditions initiales sont différentes.

Le schéma de principe de la commande adaptative directe est donné sur la (Figure II.3) ci-dessous.

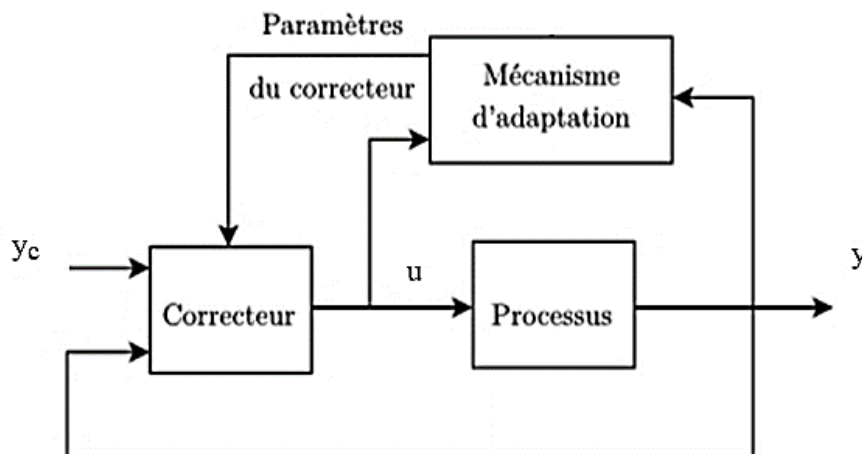


Figure II.3: Commande adaptative directe

II. 4. 2 Commande adaptative indirecte

La commande adaptative indirecte est la mise en œuvre, en temps réel, de la procédure de synthèse d'un correcteur :

- Collecte des données à partir du processus,

- Identification d'un modèle,
- Utilisation du modèle pour la synthèse du correcteur.

Dans le cas de la commande adaptative indirecte, ce processus se distingue par :

- Estimation en-ligne (temps réel) des paramètres du modèle du processus,
- Calcul en-ligne des paramètres du correcteur en fonction du modèle estimé.

Cette procédure est décrite par la (Figure II.4).

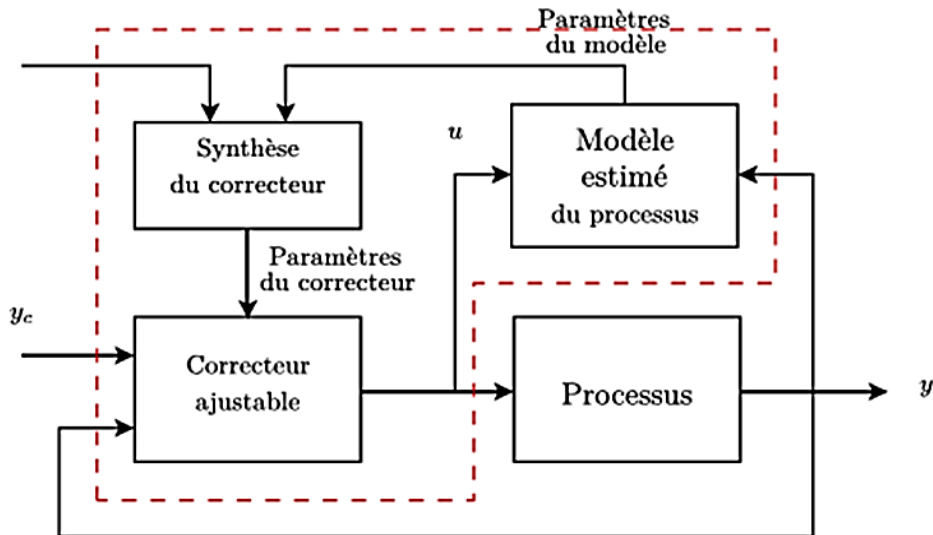


Figure II.4: Commande adaptative indirecte

II. 4. 3 Synthèse de la commande adaptative

Considérant, le cas simple du système non linéaire décrit par l'équation :

$$\dot{x} = u + \xi^T(x)\theta \tag{II.17}$$

Où θ est un vecteur de paramètres constants et inconnus et $\xi(x)$ est une fonction non linéaire. On désire trouver la loi de commande $u(x, \theta)$ qui assure la stabilité de l'origine du système (II.17). Pour ce faire, on prend comme fonction de Lyapunov la forme quadratique qui est définie positive.

$$V = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2\Gamma}\tilde{\theta}^2 \tag{II.18}$$

Où Γ est le gain d'adaptation définie positive et $\tilde{\theta}$ représente l'erreur d'estimation $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$. La dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= x\dot{x} + \frac{1}{\Gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \\
 &= x \left(u + \xi^T(x) \theta \right) + \frac{1}{\Gamma} \tilde{\theta} \dot{\theta} \\
 &= x \left(u + \xi^T(x) \hat{\theta} \right) + \tilde{\theta} \left(x \xi^T(x) + \frac{1}{\Gamma} \dot{\theta} \right)
 \end{aligned} \tag{II.19}$$

Pour garantir la négativité de la fonction de Lyapunov \dot{V} , le choix de la loi de commande et de loi d'adaptation est donné par :

$$\begin{cases} u = -k x - \xi^T(x) \hat{\theta} \\ \dot{\theta} = -\Gamma x \xi^T(x) \end{cases} \tag{II.20}$$

Où k est un gain positif. Cela permet d'obtenir :

$$\dot{V} = -k x^2 \leq 0 \tag{II.21}$$

Le système (II.17) avec la loi de commande et la loi d'adaptation (II.20) est stable

Pour cela notre travail est basé sur une commande adaptative indirecte à base des approximateurs flous.

Et la suite de ce chapitre est dédiée à une représentation des systèmes flous petite.

II.5. Systèmes flous

La Logique floue a été introduite par le professeur Lotfi Zadeh en 1965 comme une généralisation de la logique binaire. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Ces dernières années, la logique floue a été appliquée dans divers domaines.

Les systèmes flous offrent une solution potentielle au problème inhérent à la commande adaptative standard. Ils sont des approximateurs universels [15] et fournissent une manière commode pour paramétriser les non-linéarités inconnues. En effet, ils peuvent approcher uniformément n'importe quelle fonction inconnue non linéaire continue sur un ensemble compact avec un degré de précision arbitraire.

Notons qu'il existe d'autres approximateurs universels tels que : les réseaux de neurones multi couches.

II. 5. 1 Structure d'un système flou

La plupart des applications de la logique floue dans la commande peuvent être généralisées au moyen d'une structure simple illustrée sur la Figure(II.5). Une transformation pratique doit être

mise en œuvre à l'entrée et à la sortie du système flou. Cette transformation est appelée fuzzification et défuzzification respectivement.

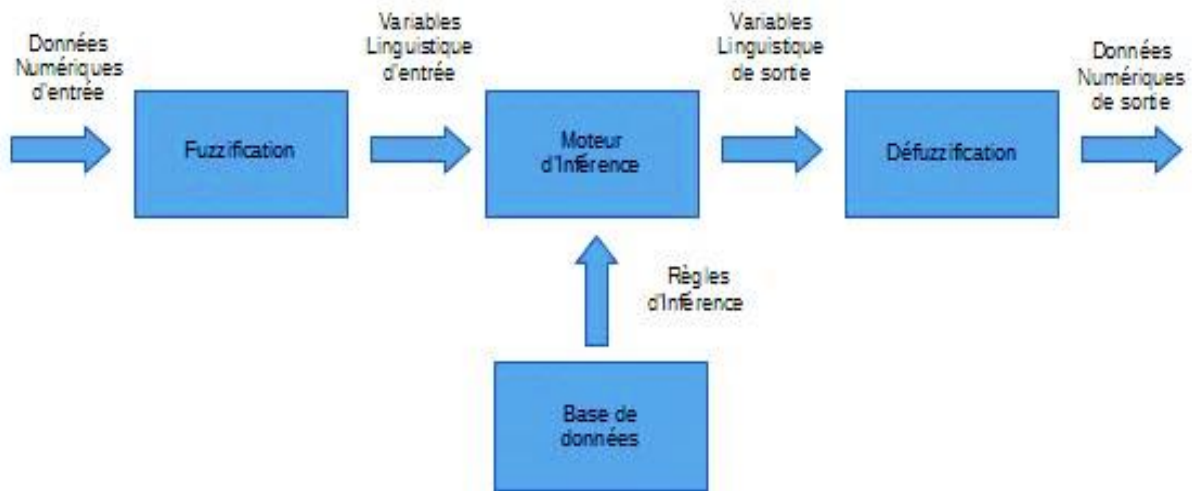


Figure II.5: Structure d'un système flou

Fuzzification : La fuzzification consiste une opération de transformation de la grandeur physique réelle d'entrée en une grandeur floue à l'aide des ensembles flous. La fuzzification permet de donner le degré avec lequel une grandeur physique apparie à un ensemble flou en utilisant des fonctions d'appartenance.

Moteur d'inférence : L'inférence floue permet de transformer, à l'aide des techniques de raisonnement flou (base de règles), la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. Pour définir une inférence floue, se référer à [16], cependant, des difficultés pratiques se posent pour l'implémenter. Par conséquent, certaines méthodes expérimentales décrites dans cette section sont appelées algorithmes de raisonnement. Ces méthodes tentent de mettre en œuvre l'inférence de Zadeh, mais elles sont simplifiées pour gagner en faisabilité pratique. Seules quatre méthodes de raisonnement flou sont couramment utilisées. Ces méthodes sont listées ci-dessous.

- Stratégie de Mamdani - La méthode de raisonnement flou de Mamdani est basée sur l'opérateur d'inférence MAX-MIN.
- Stratégie de Larsen - La méthode de raisonnement flou de Larsen est basée sur l'opérateur d'inférence PRODUIT.
- Stratégie de Tsukamoto - La méthode de raisonnement flou de Tsukamoto est basée sur la simplification de la méthode de Mamdani, bien que toutes les fonctions d'appartenance (antécédents et conclusions) soient monotones.
- Stratégie de Takagi et Sugeno - La méthode de raisonnement flou de Takagi-Sugeno est basée sur une description de modèle distincte. Dans ce modèle, les variables de sortie

sont caractérisées par les fonctions des variables d'entrées, notre travail est basé sur cette méthode car elle s'avère très efficace dans des applications faisant intervenir des techniques linéaires d'adaptation.

Parmi les quatre méthodes on va présenter celle utilisée dans notre travail.

La base de règles floues : La base de règles floues considère l'architecture générale du système. C'est-à-dire, elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « Si-Alors » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système.

Defuzzification : Après considération floue, nous avons une variable de sortie verbale qui doit être traduite en une valeur nette. L'objectif est de dériver une seule valeur numérique nette qui reflète le mieux les valeurs floues déduites de la variable de sortie verbale

II. 5. 2 Les systèmes flous de type Takagi-Sugeno (T-S)

La base de règles floues consiste en un ensemble de règles linguistiques sous la forme "SI un ensemble de conditions est satisfait, ALORS un ensemble de conséquences est déduit".

La configuration de base du système de Takagi-Sugeno [17] comprend une base de règles floues qui se compose d'une collection des règles floues SI-ALORS sous la forme suivante :

$$R^{(l)} : \text{Si } x_1 \text{ est } F_1^l \text{ et } \dots, x_n \text{ est } F_n^l \text{ Alors } y = F_l(x) \quad (l = 1, \dots, n) \quad (\text{II.22})$$

Où $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathfrak{R}$ et $y^l \in \mathfrak{R}$ sont les entrées et la sortie du système flou, respectivement. Aussi $(F_1^l, F_2^l, \dots, F_n^l)$.

En général $F_n^l(x)$ est une fonction polynomiale en fonction des variables d'entrées :

$$F_l(x) = a_0^l + \sum_{i=1}^n a_i^l \quad (\text{II.23})$$

Si $F_n^l(x)$ est une constante.

$$F_l(x) = a_0^l \quad (\text{II.24})$$

On a donc un système flou de type Takagi-Sugeno d'ordre zéro.

Etant donné que chaque règle possède une conclusion numérique, on ne passe pas par la procédure de défuzzification. La sortie du système flou est donnée par la relation suivante

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^n \mu_l(x) \cdot F_l(x)}{\mu_l(x)} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\mu_{F_i^l}(x) = \prod_{i=1}^n F_i^l \quad (\text{II.26})$$

Les fonctions d'appartenances gaussiennes sont utilisées pour caractériser les labels F_1^l , ce choix revient à leurs expressions mathématiques compacte et la facilité de leurs manipulations, on a :

$$\mu_{F_i^l}(x) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_i - c_i^l}{v_i^l} \right]^2 \right\}$$

Où c_i^l la moyenne et v_i^l la variance.

En introduisant le concept de fonction de base floue, (II.25) peut être réécrit comme suit :

$$y(x) = \mathcal{G}\varphi(x) \quad (\text{II.27})$$

Où : $\mathcal{G} = (y^1, \dots, y^m)$, $\varphi(x) = (\varphi^1(x), \dots, \varphi^m(x))^T$

Tel que :

$$\varphi^j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)} \quad (\text{II.28})$$

II. 5. 3 Théorème d'approximation universel

Deux raisons principales amènent à utiliser les systèmes flous comme élément de base des contrôleurs adaptatifs.

- Premièrement, ce type de systèmes flous a la propriété d'approximation universel de fonctions continues avec un degré de précision quelconque à condition d'utiliser un nombre suffisant de règles floues.
- Deuxièmement, les systèmes flous sont construits à partir de règles floues de la forme "Si-Alors", de ce fait, les informations linguistiques ou mathématiques disponibles issues d'une expertise peuvent éventuellement être incorporées dans le contrôleur.

Wang [18] a montré que les systèmes flous sont des approximateurs universels s'ils respectent certains critères. Il formule son résultat comme un théorème d'existence d'un système flou optimale pour une large variété d'applications.

Théorème

Soit $f(x)$ une fonction non linéaire continue définie sur un ensemble compact Ω_x , et pour toute constante positive ε , il existe un système flou $y(x)$ de la forme (II.27) tel que :

$$\sup_{x \in \Omega_x} |f(x) - y(x)| < \varepsilon \quad (\text{II.29})$$

La démonstration de ce théorème est donnée dans [18]. La structure du système flou et les fonctions floues de base sont convenablement spécifiées à priori par l'utilisateur. Cela signifie que la décision de l'utilisateur est nécessaire pour déterminer la structure du système flou à savoir : les entrées pertinentes, le nombre de fonctions d'appartenance pour chaque entrée, les paramètres des fonctions d'appartenance et le nombre de règles.

II. 5. 4 Systèmes flous pour l'approximation de fonction

D'après la capacité des systèmes flous à l'approximation des fonctions non linéaire, on admet qu'il existe un vecteur des paramètres optimales de \mathcal{G} , telles que [19] :

$$y = \mathcal{G}\varphi(x) + \varepsilon \quad (\text{II.30})$$

Où x est l'entrée du système flou, et y est la fonction à identifier. ε est l'erreur d'estimation flou optimal. $\varphi(x)$ est la fonction de base floue, tel que $\|\varphi(x)\| \leq 1$.

En utilisant le système flou pour identifier une fonction non linéaire inconnue, la valeur estimée peut être écrite comme suit :

$$\hat{y} = \hat{\mathcal{G}}\varphi(x) \quad (\text{II.31})$$

Où $\hat{\mathcal{G}}$ est l'estimation de \mathcal{G} .

Selon (II.22) et (II.25), l'erreur estimée du système flou peut être obtenue comme suit :

$$\tilde{y} = y - \hat{y} = \tilde{\mathcal{G}}\varphi(x) + \varepsilon \quad (\text{II.32})$$

Où $\tilde{\mathcal{G}} = \mathcal{G} - \hat{\mathcal{G}}$ est l'erreur d'estimation de \mathcal{G} .

II.6. Conclusion

Ce chapitre à été consacré à une représentation théorique de plusieurs techniques de commande non linéaire. L'intérêt principal de ces techniques de commande est la simplicité de conception des lois de commande d'une part et la haute performance et le degré de stabilité d'autre part.

Le chapitre trois vise à développer un schéma de commande qui combine ces techniques pour bénéficier leur avantage et compenser les inconvénients.

Chapitre III

Commande Backstepping adaptative flou par mode glissant d'un véhicule sous-marin avec saturation d'entrée

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au développement d'un schéma de commande non linéaire pour le contrôle de profondeur d'un véhicule sous-marin défini dans le chapitre I. La forme du modèle développé est orientée vers l'application d'une commande par Backstepping et du fait que dans ce genre de système les perturbations, les incertitudes et les variations paramétriques sont inévitables.

La commande par Backstepping est combinée avec la commande par mode glissement pour ces qualités de robustesse et avec une technique d'adaptation à base des systèmes flous afin de traiter les incertitudes du modèle [19].

Par conséquent, une commande adaptative floue Backstepping par mode glissant est en mesure de fournir les performances désirées.

Dans le schéma de commande proposé il y a un problème pratique à noter, c'est la saturation des entrées. Pour notre cas dans le système sous-marin l'angle de gouverne présente toujours des limitations d'où la nécessité de traiter ce problème. Si la saturation est ignorée dans la conception de la commande, les performances du schéma proposé peuvent être gravement dégradées surtout lorsque le signal de commande reste dans la région de saturation pour une longue durée on peut facilement arriver à l'instabilité.

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre ce problème et surtout dans le cadre d'une commande adaptative car les dégâts sont plus significatifs.

Il y a des solutions basées sur la modification des lois de commande de telle sorte que la saturation est évitée ou par la modification des lois d'adaptation en se basant sur la modification du signal d'erreurs utilisé, dans notre cas on prend la deuxième solution de modifier l'erreur de poursuite par la construction d'un système auxiliaire, alors le système auxiliaire a pour rôle de compenser la saturation et le schéma de commande assure la convergence de l'erreur modifiée.

La stabilité du schéma est prouvée par la méthode directe de Lyapunov et l'efficacité est prouvée par un test de simulation.

III.2. Position du problème

Prenant le modèle défini dans le chapitre I par l'équation (I.7). Si on prend en considération les dynamiques inconnues et la saturation des entrées, le modèle peut se réécrire comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -(u_0 + \Delta u) \sin \theta + d_z \\ \dot{\theta} &= \text{sat}(q) \\ \dot{q} &= f_q - (b_0 + \Delta b) \text{sat}(\delta) + d_q \end{aligned} \tag{III.1}$$

u_0 est la vitesse de pointe.

Δu est considérée comme l'erreur sur la mesure.

f_q et b_0 sont des fonctions non linéaires connus.

Δb la partie des fonctions inconnues et qui présente l'erreur de modélisation de la fonction b_0

d_q l'incertitude sur la dynamique du mouvement de tangage y compris la partie de la dynamique non modélisée et la perturbation externe qui n'a pas de relation avec δ .

$sat(q)$ et $sat(\delta)$ sont les équations de saturation des entrées q et δ respectivement données par :

$$sat(q) = \begin{cases} q_{\max} & q \geq q_{\max} \\ q & q_{\min} < q < q_{\max} \\ q_{\min} & q \leq q_{\min} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$sat(\delta) = \begin{cases} \delta_{\max} & \delta \geq \delta_{\max} \\ \delta & \delta_{\min} < \delta < \delta_{\max} \\ \delta_{\min} & \delta \leq \delta_{\min} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Notre but est de synthétiser un schéma de commande adaptative flou Backstepping par mode glissant qui assure :

- Une bonne poursuite de la profondeur désirée z_d .
- Une stabilité en boucle fermée dans le sens que tous les signaux sont bornés et cela malgré la présence de la saturation et les incertitudes sur les systèmes.

Durant la synthèse de contrôleur les hypothèses suivantes sont admises :

- **Hypothèse 1** La profondeur z , l'angle de tangage θ , la vitesse angulaire q et l'angle de gouverne δ peuvent être mesurés avec précision par des capteurs directement ou indirectement.

Pour la vitesse longitudinale u la partie mesurée par le capteur est u_0 , on suppose que

$$|\Delta u / u_0| \leq \pi_1 \leq 1$$

Avec Δu erreur de mesure.

- **Hypothèse 2** L'erreur de modélisation Δb est inconnue, avec $|\Delta b / b_0| \leq \pi_2 \leq 1$.
- **Hypothèse 3** La profondeur de référence z_d et sa dérivée \dot{z}_d et sa deuxième dérivée \ddot{z}_d sont toutes bornées.
- **Hypothèse 4** L'incertitude d_z et sa dérivée sont les deux bornées.

III. 2. 1 Compensation de la saturation :

La compensation de l'effet de saturation se fait par la construction d'un système auxiliaire défini par [19] :

$$\dot{\xi}_q = -L_q \xi_q + H_q \Delta q \quad (III.4)$$

$$\dot{\xi}_\delta = -L_\delta \xi_\delta + H_\delta \Delta \delta \quad (III.5)$$

Où ξ_q et ξ_δ sont les états auxiliaires pour les entrées q et δ respectivement.

$\Delta q = q_d - sat(q)$ et $\Delta \delta = \delta - sat(\delta)$ la composante de l'erreur due à la saturation pour les deux entrées q, δ .

$H_q = k_s s$, $H_\delta = k_q (q - q_d)$, avec k_s, k_q, L_q et L_δ sont des constantes positives.

Remarque s et q_d sont respectivement la surface de glissement et la commande virtuelle de l'étape 1, leurs formules seront données lors du développement du schéma de commande.

ξ_q et ξ_δ Représente respectivement la version filtrée de l'effet de saturation ou bien de la composante d'erreur due à la saturation Δq et $\Delta \delta$, Ils resteront nuls tant que $\Delta q = 0$ et $\Delta \delta = 0$, et vis-versa si le contrôleur peut garantir que $\xi_q \rightarrow 0$ et $\xi_\delta \rightarrow 0$ La saturation peut être éliminer.

Soit la nouvelle variable d'erreur modifiée ' e ' Dans lequel on élimine l'effet de l'erreur due à la saturation. Cette variable est donnée par la relation :

$$e = x - x_d - \xi \quad (III.6)$$

Où : x état réel, x_d état désirée et ξ état auxiliaire.

En proposant un schéma de commande adéquat l'erreur peut converger vers zéro ou bien être uniformément borné et comme la saturation est une non linéarité bornée l'état auxiliaire est également borne de sorte que $x - x_d$ est borné.

Dans notre travail le choix du système auxiliaire (III .4) (III .5) avec H_q et H_δ deux fonctions non linéaires peut éliminer la supposition sur la bornitude de la non linéarité de saturation qui est indésirable.

Remarque Dans l'équation III.4 si $s = 0$ et $\Delta q \neq 0$ l'état auxiliaire ξ_q convergera vers zéro, cela est permis car le but d'un contrôleur est de faire converger s à zéro. Par conséquent, le système est toujours stable en présence de saturation la même chose pour ξ_δ .

III.3. Synthèse du contrôleur

Dans ce qui suite on s'intéressons aux développements d'un schéma de commande Backstepping dont le but est de contrôler la profondeur de l'AUV. la conception Backstepping passe par plusieurs étapes, commençant par la première :

Etape 1 :

En considérant la profondeur de référence z_d , la dynamique de l'erreur de poursuite en profondeur peut être écrite comme :

$$\dot{\tilde{z}} = -(u_0 + \Delta u) \sin \theta + \dot{d}_z - \dot{z}_d \quad (\text{III.7})$$

Où : $\tilde{z} = z - z_d$ c'est l'erreur de poursuite .

Dans la méthode traditionnelle de Backstepping, la loi de commande doit être conçu étape par étape, c'est-à-dire la commande θ_d doit être conçue en premier. Cependant, le model du système est non-affine en θ pour ce genre de problèmes plusieurs solutions ont été proposée dont la plupart sont très complexe.

De l'équation (III.7) en remarque que θ est une variable intermédiaire. Pour cela on propose la construction d'une surface de glissement de la forme :

$$s = \dot{\tilde{z}} + l_1 \tilde{z} \quad (\text{III.8})$$

Avec l_1 constante positive.

La construction d'une surface de glissement nous permet de calculer directement la commande virtuelle q_d à partir des deux premières équations du model (III.1).

D'après (III.1) et (III.7) si on remplace $sat(q)$ par $q_d - \Delta q$, la dynamique de la surface peut être obtenu comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{s} = & -l_1 u_0 \sin \theta - l_1 \dot{z}_d - \ddot{z}_d - u_0 \cos \theta (q_d - \Delta q) - \Delta u \cos \theta (q_d - \Delta q) \\ & - l_1 \Delta u \sin \theta + \dot{d}_z + l_1 \dot{d}_z \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Dans cette étape, notre but est de concevoir une commande virtuelle q_d qui remplace q , malheureusement on a des termes inconnus dans le model come Δu , alors la conception directe est impossible, on doit passer d'abord par l'identification des dynamiques inconnues.

La fonction des dynamiques inconnues à estimer est choisi comme :

$$y_1 = k_s \xi_q \Delta q + u_0 \cos \theta \Delta q + \Delta u \cos \theta \Delta q - l_1 \Delta u \sin \theta + \dot{d}_z + l_1 \dot{d}_z \quad (\text{III.10})$$

L'estimation comme on a de j a mentionnée avant est faite a base d'un approximateur flou, sa sortie est de la forme (voir chapitre II).

$$\hat{y}_1 = \hat{\mathcal{G}}_1 \varphi(x_1) \quad (\text{III.11})$$

\hat{y}_1 est l'approximation flou de la fonction y_1 .

x_1 l'entrée du système flou.

$\varphi(x_1)$ vecteur de fonction flou de base.

$\hat{\mathcal{G}}_1$ vecteur des paramètres a estimer.

Tant que les systèmes flous sont des approximateurs universel (voir théorème chapitre II) on admet qu'il existe un vecteur des paramètres optimaux qui peut reconstruire la fonction y_1 .

$$y_1 = \mathcal{G}_1 \varphi(x_1) + \varepsilon_1 \quad (\text{III.12})$$

Avec ε_1 est l'erreur d'approximation qui résulte de la représentation de la fonction y_1 par les systèmes flous elle est supposée bornée par une constant positive inconnu $|\varepsilon_1| < \alpha_1$

Sachant que le vecteur des paramètres est ajusté en ligne par une loi d'adaptation convenablement choisit le vecteur d'erreur paramétrique s'écrit :

$$\tilde{\mathcal{G}}_1 = \mathcal{G}_1 - \hat{\mathcal{G}}_1 \quad (\text{III.13})$$

Qui sera utile dans la détermination de l'erreur entre la fonction y_1 et sont approximation floue.

$$y_1 - \hat{y}_1 = \tilde{\mathcal{G}}_1 \varphi(x_1) + \varepsilon_1 \quad (\text{III.14})$$

Afin de pouvoir construire une commande virtuelle q_d et des lois d'adaptation adéquat on fait le choix de la fonction de Lyapunov comme [19].

$$V_1 = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \xi_q^2 + \frac{1}{2\gamma_{11}} \tilde{\alpha}_1^2 + \frac{1-\pi_1}{2\gamma_{12}} \tilde{\beta}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_{13}} \tilde{\mathcal{G}}_1 \tilde{\mathcal{G}}_1^T \quad (\text{III.15})$$

Avec γ_{11} , γ_{12} et γ_{13} sont des constantes positives.

$\tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 - \hat{\alpha}_1$, où $\hat{\alpha}_1$ est l'estimation de α_1 .

$\tilde{\beta}_1 = \beta_1 - \hat{\beta}_1$, où $\hat{\beta}_1$ est l'estimation de β_1 .

A noter que :

$$\beta_1 = 1/(1-\pi_1).$$

Comme déjà note π_1 représente la borne supérieure de la défaillance du capteur de la vitesse longitudinale.

Remarque : dans la plupart des travaux qui traite le problème de saturation par un système auxiliaire la fonction de Lyapunov est construite par le signal d'erreur modifie $1/2(s - \xi_q)^2$, un choix approprié des lois de commande permet la convergence ou la bornitude de signal d'erreur modifie mais la convergence de s n'est pas garantie.

Alors la meilleure manière pour garantir la bornitude de tous les signaux et de faire le choix $1/2\xi_q^2 + 1/2s^2$ mais l'analyse de stabilité devient difficile dans notre travail l'on essaye de compenser cette difficulté par le choix approprié du système axillaire (III.4)

En dérivant V_1 et invoquant (III.4) nous obtenons :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= s\dot{s} + \xi_q \dot{\xi}_q - \gamma_{11}^{-1} \tilde{\alpha}_1 \dot{\alpha}_1 - \gamma_{12}^{-1} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \dot{\beta}_1 - \gamma_{13}^{-1} \tilde{\mathcal{G}}_1 \dot{\mathcal{G}}_1^T \\ &= -L_q \xi_q^2 + s(-l_1 u_0 \sin \theta - l_1 \dot{z}_d - \ddot{z}_d - u_0 \cos \theta q_d + y_1 \\ &\quad - \Delta u \cos \theta q_d) - \gamma_{11}^{-1} \tilde{\alpha}_1 \dot{\alpha}_1 - \gamma_{12}^{-1} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \dot{\beta}_1 - \gamma_{13}^{-1} \tilde{\mathcal{G}}_1 \dot{\mathcal{G}}_1^T\end{aligned}\quad (III.16)$$

Choisissant la loi de commande virtuelle q_d et les lois d'adaptation de α_1 , β_1 et \mathcal{G}_1 comme :

$$q_d = \frac{1}{u_0 \cos \theta} \left(-l_1 u_0 \sin \theta - l_1 \dot{z}_d - \ddot{z}_d + k_1 s + \hat{\mathcal{G}}_1 \varphi(x_1) + \hat{\alpha}_1 \operatorname{sgn}(s) + \Gamma_1 \operatorname{sgn}(s) \right) \quad (III.17)$$

$$\dot{\alpha}_1 = \gamma_{11} (1 - \mu_q) (|s| - m_{11} \hat{\alpha}_1) \quad (III.18)$$

$$\dot{\beta}_1 = \gamma_{12} (1 - \mu_q / (1 + \lambda_1)) (\lambda_1 |s| - m_{12} \hat{\beta}_1) \quad (III.19)$$

$$\dot{\mathcal{G}}_1 = \gamma_{13} (1 - \mu_q) (s \varphi(x_1)^T - m_{13} \hat{\mathcal{G}}_1) \quad (III.20)$$

Avec $\Gamma_1 = -\lambda_1 + \hat{\beta}_1$

Où :

$$\lambda_1 = \left| l_1 u_0 \sin \theta + l_1 \dot{z}_d + \ddot{z}_d - k_1 s - \hat{\mathcal{G}}_1 \varphi(x_1) \right| + \hat{\alpha}_1 + \kappa_1$$

κ_1 est une constante positive.

D'autre part :

$$\mu_q = \left| \xi_q \right| / (1 + \left| \xi_q \right|), \quad 0 \leq \mu_q < 1 .$$

k_1 est une fonction choisit de la forme .

$$k_1 = \frac{1}{m_{11} (1 - \mu_q)} + \frac{1}{m_{12} (1 - \mu_q)} + \frac{1}{m_{13} (1 - \mu_q)} + \theta_1 \quad (III.21)$$

Où θ_1 , m_{11} , m_{12} et m_{13} sont des constantes positives.

Remarque : d'habitude les lois adaptations sont généralement conçus fonction de $|s|$ on constat que ces lois d'adaptation provoquent une instabilité lorsque l'actionneur est en saturation pour une longue durée parce que les lois sont en fonction de l'erreur, et l'erreur ne tend pas ver zéro lorsque la saturation des commandes est active, c'est pour ça dans notre travailles les lois d'adaptation sont en fonction de $1 - \mu_q$ ou $(1 - \mu_q) / (1 + \lambda_1)$ alors lorsque la saturation est active les lois de d'adaptation diminueront jusqu'à zéro.

Maintenant si on remplace la commande virtuelle (III.17) et les lois d'adaptation (III.18-III.20)

la dérivée de la fonction de Lyapunov deviendra :

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &\leq -L_q \xi_q^2 - k_1 s^2 + s \tilde{\mathcal{G}}_1 \varphi(x_1) - \gamma_{13}^{-1} \dot{\hat{\mathcal{G}}}_1 \tilde{\mathcal{G}}_1^T + |s| (-\hat{\alpha}_1 + \alpha_1) \\
 &\quad - \gamma_{11}^{-1} \tilde{\alpha}_1 \dot{\hat{\alpha}}_1 - s \Delta u \cos \theta_{q_d} - \Gamma_1 |s| - \gamma_{12}^{-1} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \dot{\hat{\beta}}_1 \\
 &\leq -L_q \xi_q^2 - k_1 s^2 + |s| \|\tilde{\mathcal{G}}_1\| + m_{13} (1 - \mu_q) \hat{\mathcal{G}}_1 \tilde{\mathcal{G}}_1^T + |\tilde{\alpha}_1| |s| \\
 &\quad + m_{11} (1 - \mu_q) \hat{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_1 - s \Delta u \cos \theta_{q_d} - \Gamma_1 |s| - \gamma_{12}^{-1} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \dot{\hat{\beta}}_1
 \end{aligned} \tag{III.22}$$

En se basant sur la supposition (1) et la commande virtuelle le terme $-s \Delta u \cos \theta_{q_d}$ peut-être borné comme Suit :

$$\begin{aligned}
 -s \Delta u \cos \theta_{q_d} &\leq |s| \pi_1 \left(|l_1 u_0 \sin \theta + l_1 \dot{z}_d + \ddot{z}_d - k_1 s - \hat{\mathcal{G}} \varphi(x_1)| + \hat{\alpha}_1 + \kappa_1 + \Gamma_1 - \kappa_1 \right) \\
 &= |s| \pi_1 \left(\hat{\beta}_1 \lambda_1 - \kappa_1 \right)
 \end{aligned} \tag{III.23}$$

D'autre par les inégalités suivantes satisfait :

$$m_{11} (1 - \mu_q) \hat{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_1 \leq -\frac{m_{11}}{2} (1 - \mu_q) \tilde{\alpha}_1^2 + \frac{m_{11}}{2} \alpha_1^2 \tag{III.24}$$

$$m_{13} (1 - \mu_q) \hat{\mathcal{G}}_1 \tilde{\mathcal{G}}_1^T \leq -\frac{m_{13}}{2} (1 - \mu_q) \|\tilde{\mathcal{G}}_1\|^2 + \frac{m_{13}}{2} \|\mathcal{G}_1\|^2 \tag{III.25}$$

On remplace (III.20), (III.23), (III.24) et (III.25) dans (III.22) on trouve :

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &\leq -L_q \xi_q^2 - k_1 s^2 + \kappa_1 |s| \pi_1 - \frac{m_{13}}{2} (1 - \mu_q) \|\tilde{\mathcal{G}}_1\|^2 + |s| \|\tilde{\mathcal{G}}_1\| \\
 &\quad - \frac{m_{11}}{2} (1 - \mu_q) \tilde{\alpha}_1^2 + |\tilde{\alpha}_1| |s| + \frac{m_{13}}{2} \|\mathcal{G}_1\|^2 + \frac{m_{11}}{2} \alpha_1^2 \\
 &\quad + (1 - \pi_1) |\tilde{\beta}_1| |s| + m_{12} \left(1 - \frac{\mu_q}{1 + \lambda_1} \right) (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \hat{\beta}_1
 \end{aligned} \tag{III.26}$$

Si on admet les quatre inégalités suivantes :

$$\begin{aligned}
 m_{12} \left(1 - \frac{\mu_q}{1 + \lambda_1} \right) (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1 \hat{\beta}_1 &\leq -\frac{m_{12}}{2} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1^2 + \frac{m_{12}}{2} \beta_1^2 \\
 -\frac{m_{11}}{2} (1 - \mu_q) \tilde{\alpha}_1^2 + |\tilde{\alpha}_1| |s| &
 \end{aligned} \tag{III.27}$$

$$\leq -\left(\frac{1}{\sqrt{m_{11}(1 - \mu_q)}} |s| - \sqrt{\frac{m_{11}}{4} (1 - \mu_q)} |\tilde{\alpha}_1| \right)^2 + \frac{1}{m_{11}(1 - \mu_q)} s^2 \tag{III.28}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_{12}}{4} \left(1 - \frac{\mu_q}{1 + \lambda_1}\right) (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1^2 + (1 - \pi_1) |\tilde{\beta}_1| |s| \\
 & \leq -(1 - \pi_1) \left(\frac{1}{\sqrt{m_{12} \left(1 - \frac{\mu_q}{1 + \lambda_1}\right)}} |s| - \sqrt{\frac{m_{12}}{4} \left(1 - \frac{\mu_q}{1 + \lambda_1}\right)} |\tilde{\beta}_1| \right)^2 + \frac{1}{m_{12}(1 - \mu_q)} s^2
 \end{aligned} \tag{III.29}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_{13}}{4} (1 - \mu_q) \|\tilde{\mathcal{G}}_1\|^2 + |s| \|\tilde{\mathcal{G}}_1\| \\
 & \leq -\left(\frac{1}{\sqrt{m_{13} (1 - \mu_q)}} |s| - \sqrt{\frac{m_{13}}{4} (1 - \mu_q)} \|\tilde{\mathcal{G}}_1\| \right)^2 + \frac{1}{m_{12}(1 - \mu_q)} s^2
 \end{aligned} \tag{III.30}$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov peut se réduire à :

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 \leq & -\theta_1 s^2 - L_q \xi_q^2 - \frac{m_{11}}{4} (1 - \mu_q) \tilde{\alpha}_1^2 - \frac{m_{12}}{4} (1 - \pi_1) \tilde{\beta}_1^2 \\
 & - \frac{m_{13}}{4} (1 - \mu_q) \|\tilde{\mathcal{G}}_1\|^2 + \frac{m_{11}}{2} \alpha_1^2 + \frac{m_{12}}{2} \beta_1^2 + \frac{m_{13}}{2} \|\mathcal{G}_1\|^2
 \end{aligned} \tag{III.31}$$

$$\dot{V}_1 \leq -\rho_1 V_1 + \iota_1 \tag{III.32}$$

Où : $\rho_1 = \min(2\theta_1, 2L_q, m_{11}(1 - \mu_q)\gamma_{11}/2, m_{12}(1 - \pi_1)\gamma_{12}/2, m_{13}(1 - \mu_q)\gamma_{13}/2)$.

Et : $\iota_1 = m_{11}\alpha_1^2/2 + m_{12}\beta_1^2/2 + m_{13}\|\mathcal{G}_1\|^2/2$.

D'après (III.32), on obtient :

$$0 \leq V_1 \leq \frac{\iota_1}{\rho_1} + \left(V_1(0) - \frac{\iota_1}{\rho_1} \right) e^{-\rho_1 t} \tag{III.33}$$

D'après (III.33), le système est uniformément borné, et le taux de convergence dépend des paramètres m_{11} , m_{12} et m_{13} .

D'autre part la formule (III.17) présente une commande virtuelle et non plus réel.

Où : $q \neq q_d$

Soit la nouvelle variable d'erreur :

$$\tilde{q} = q - q_d \tag{III.34}$$

Réellement V_1 est :

$$\dot{V}_1 \leq -\rho_1 V_1 + \iota_1 - (\Delta u + u_0) \cos \theta \tilde{q} s \tag{III.35}$$

Par conséquent l'objectif de l'étape 2 est de minimiser cette erreur, et faire converger q vers q_d [19].

Etape 2 :

Comme on le sait parmi les inconvénients de la commande par Backstepping est l'explosion des termes a cause des dérivés de la commande virtuelle. Pour remédier ce problème on utilise une solution déjà existante dans la littérature qui est le Backstepping filtrée ou au lieu de calculer analytiquement les dérivées des commande virtuelles on les remplace par un filtre d'ordre 1 de la forme :

$$l_2 \dot{q}_d + q_d = q \quad (\text{III.36})$$

l_2 constante positive.

D'après (III.1) et (III.35) la dérivée de l'erreur de poursuite de la vitesse angulaire de langage est :

$$\dot{\tilde{q}} = f_q - (b_0 + \Delta b)(\delta - \Delta\delta) + d_q - l_2^{-1} \tilde{q} \quad (\text{III.37})$$

Comme on a déjà vu dans la premier étape la dynamique du système n'est pas complètement connue et on fait appel au système flous pour les approximer. Dans cette étape la fonction qui porte les dynamiques inconnues est donnée par :

$$y_2 = k_q \xi_\delta \Delta\delta + b_0 \Delta\delta + d_q - \Delta u \cos \theta_s + \Delta b \Delta\delta \quad (\text{III.38})$$

Et l'approximation flou de cette fonction inconnue est :

$$\hat{y}_2 = \hat{\mathcal{G}}_2 \varphi(x_2) + \varepsilon_2 \quad (\text{III.39})$$

Avec :

x_2 est l'entrée du système de logique floue .

$\hat{\mathcal{G}}_2$ vecteur des paramètres a ajustée.

Bien sur une reconstruction optimale peut se faire et on écrit :

$$y_2 = \mathcal{G}_2 \varphi(x_2) + \varepsilon_2 \quad (\text{III.40})$$

Où : \mathcal{G}_2 est le vecteur des paramètres optimale.

ε_2 erreur d'estimation supposé bornée comme suite :

$$|\varepsilon_2| < \alpha_2$$

α_2 constant positive inconnue .

Finalement l'écart entre la fonction inconnue et son approximation floues peut se définir comme suit :

$$y_2 - \hat{y}_2 = \hat{\mathcal{G}}_2 \varphi(x_2) + \varepsilon_2 \quad (\text{III.41})$$

Où : $\tilde{\mathcal{G}}_2 = \mathcal{G}_2 - \hat{\mathcal{G}}_2$.

Pour construire le schéma de commande on propose la deuxième fonction de Lyapunov par :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \tilde{q}^2 + \frac{1}{2} \xi_\delta^2 + \frac{1}{2\gamma_{21}} \tilde{\alpha}_2^2 + \frac{1-\pi_2}{2\gamma_{22}} \tilde{\beta}_2^2 + \frac{1}{2\gamma_{23}} \tilde{\mathcal{G}}_2 \tilde{\mathcal{G}}_2^T \quad (\text{III.42})$$

Avec γ_{21} , γ_{22} et γ_{23} sont des constants positifs.

$\tilde{\alpha}_2 = \alpha_2 - \hat{\alpha}_2$, $\hat{\alpha}_2$ estimation de la borne supérieure de l'erreur l'approximation floue α_2 .

$\tilde{\beta}_2 = \beta_2 - \hat{\beta}_2$, $\hat{\beta}_2$ est l'estimation de β_2 avec :

$$\beta_2 = 1/(1-\pi_2)$$

Où π_2 la borne supérieure de l'erreur de modélisation.

Choisisant la loi de commande réelles δ par :

$$\delta = \frac{1}{b_0} \left(-u_0 \cos \theta s - (l_2^{-1} - k_2) \tilde{q} + f_q + \hat{\mathcal{G}}_2 \varphi(x_2) + \hat{\alpha}_2 \operatorname{sgn}(\tilde{q}) + \Gamma_2 \operatorname{sgn}(\tilde{q}) \right) \quad (\text{III.43})$$

Avec $\Gamma_2 = -\lambda_2 + \hat{\beta}_2$

Où : $\lambda_2 = \left| u_0 \cos \theta s + (l_2^{-1} - k_2) \tilde{q} - f_q - \hat{\mathcal{G}}_2 \varphi(x_2) \right| + \hat{\alpha}_2 + \kappa_2$

Pour les lois d'estimations :

$$\dot{\hat{\mathcal{G}}}_2 = \gamma_{23} (1 - \mu_\delta) \left(\tilde{q} \varphi(x_2)^T - m_{23} \hat{\mathcal{G}}_2 \right) \quad (\text{III.44})$$

$$\dot{\hat{\alpha}}_2 = \gamma_{21} (1 - \mu_\delta) \left(|\tilde{q}| - m_{21} \hat{\alpha}_2 \right) \quad (\text{III.45})$$

$$\dot{\hat{\beta}}_2 = \gamma_{22} (1 - \mu_\delta / (1 + \lambda_2)) \left(\lambda_2 |\tilde{q}| - m_{22} \hat{\beta}_2 \right) \quad (\text{III.46})$$

Avec $\mu_\delta = |\xi_\delta| / (1 + |\xi_\delta|)$, $0 \leq \mu_\delta < 1$.

et

$$k_2 = \frac{1}{m_{21}(1-\mu_\delta)} + \frac{1}{m_{22}(1-\mu_\delta)} + \frac{1}{m_{23}(1-\mu_\delta)} + \theta_2 \quad (\text{III.47})$$

Où θ_2 , m_{21} , m_{22} et m_{23} Sont des constant positive.

Selon le schéma de commande propose par l'équations (III.43) à (III.46) et l'analyse de stabilité développe dans l'étape précédente la dérivée de la fonction de Lyapunov peut se redire :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\rho_1 V_1 - L_\delta \xi_\delta^2 - \theta_2 \tilde{q}^2 - \frac{m_{21}}{4} (1 - \mu_\delta) \tilde{\alpha}_2^2 - \frac{m_{22}}{4} (1 - \pi_2) \tilde{\beta}_2^2 \\ & - \frac{m_{23}}{4} (1 - \mu_\delta) \|\tilde{\mathcal{G}}_2\|^2 + \frac{m_{21}}{2} \alpha_2^2 + \frac{m_{22}}{2} \beta_2^2 + \frac{m_{23}}{2} \|\mathcal{G}_2\|^2 \end{aligned} \quad (\text{III.48})$$

$$\leq -\rho_2 V_2 + \iota_2 \quad (\text{III.49})$$

Où : $\rho_2 = \min(\rho_1, 2\theta_2, 2L_\delta, m_{21}(1-\mu_\delta)\gamma_{21}/2, m_{22}(1-\pi_2)\gamma_{22}/2, m_{23}(1-\mu_\delta)\gamma_{23}/2)$.

Et : $\iota_2 = \iota_1 + m_{21}\alpha_2^2/2 + m_{22}\beta_2^2/2 + m_{23}\|\mathcal{G}_2\|^2/2$.

D'après (III.49) on obtient :

$$0 \leq V_2 \leq \frac{\iota_2}{\rho_2} + \left(V_2(0) - \frac{\iota_2}{\rho_2} \right) e^{-\rho_2 t} \quad (\text{III.50})$$

D'après (III.50) le système est uniformément borné.

Remarque Dans (III.16) et (III.43), la fonction de signe $\text{sgn}(\zeta)$ est une fonction discontinue, ce qui peut provoquer le broutement des lois de commande. C'est très nocif pour le système de commande. Dans ce travail, $\text{sgn}(\zeta)$ est remplacé par la fonction continue $\zeta / (|\zeta| + \zeta_0)$ approximativement, où ζ_0 est constante positif petite.

III.4. Test de simulation

Dans cette section, des simulations sur un AUV seront menées pour illustrer l'efficacité de la méthode proposée. Envisager le modèle suivant [19] :

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u = 1.5 \text{ m/s} \quad , \quad \Delta u = 0.1 u \text{ rand}(1,1) \quad , \quad d_z = 0.02 \sin(2\pi t / 10) \quad , \quad f_q = -0.24 \sin \theta \quad , \\ d_q &= -4.65q - 0.002q|q| \quad , \quad b_0 = 0.326u_0^2 \quad , \quad \Delta b = 0.326(\Delta u^2 + 2u_0\Delta u) \quad , \quad \delta_{\min} = -0.436 \quad , \\ \delta_{\max} &= 0.436 \quad , \quad q_{\min} = -0.5 \quad , \quad q_{\max} = 0.5 \quad , \quad l_1 \text{ et } l_2 = 0.1 \quad , \quad k_s = 6 \text{ et } k_q = 1 \quad , \quad k_s = 6 \text{ et } k_q = 1 \quad , \\ L_\delta \text{ et } L_q \text{ et } k_1 \text{ et } k_2 \text{ et } \mathcal{G}_1 \text{ et } \mathcal{G}_2 &= 5 \quad , \quad \gamma_{11} \text{ et } \gamma_{12} \text{ et } \gamma_{13} \text{ et } \gamma_{21} \text{ et } \gamma_{22} \text{ et } \gamma_{23} = 10 \\ m_{11} \text{ et } m_{12} \text{ et } m_{13} \text{ et } m_{21} \text{ et } m_{22} \text{ et } m_{23} &= 10 \quad , \quad z_d = 2 + 0.02 \sin(0.2t) \end{aligned}$$

Les résultats de simulation de la méthode proposée sont illustrés à les (Figure III.(1,2,3,4,5)) Comme observé sur les (Figure III.(1,2,3,4,5)), lorsque le gouverne angle est n'est pas en saturation, le contrôleur proposé peut suivre la profondeur de référence z_d bien, et l'erreur de suivi de profondeur et la surface de glissement peuvent tous deux converger vers le voisinage de zéro. Lorsque l'angle de barre est en saturation, la profondeur a une grande oscillation. Le dépassement maximal de la profondeur est 55,9 %. Mais l'erreur de suivi est à nouveau convergente.

Afin de lisser la commande, la fonction $\text{sgn}(s)$ dans q_d et δ est remplacée par une fonction $\tanh(s/0.01)$.

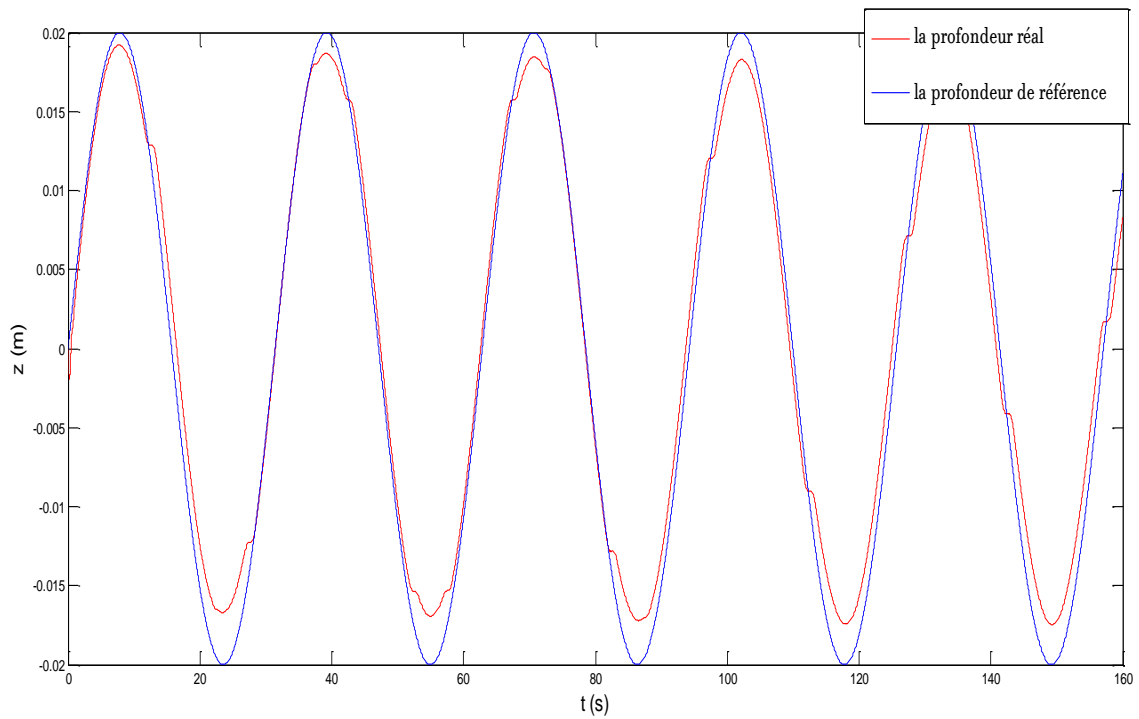


Figure III.1: Trajectoire de profondeur

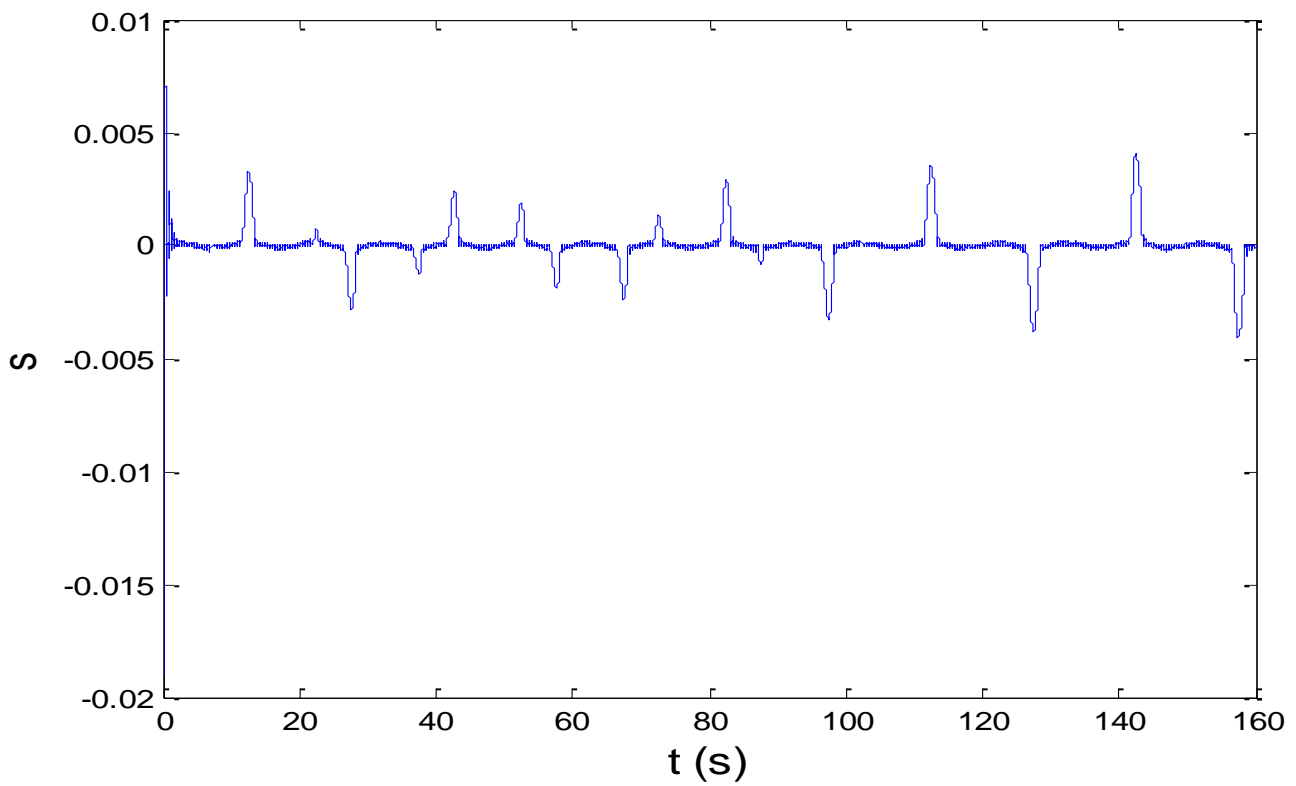


Figure III.2: La surface de glissement

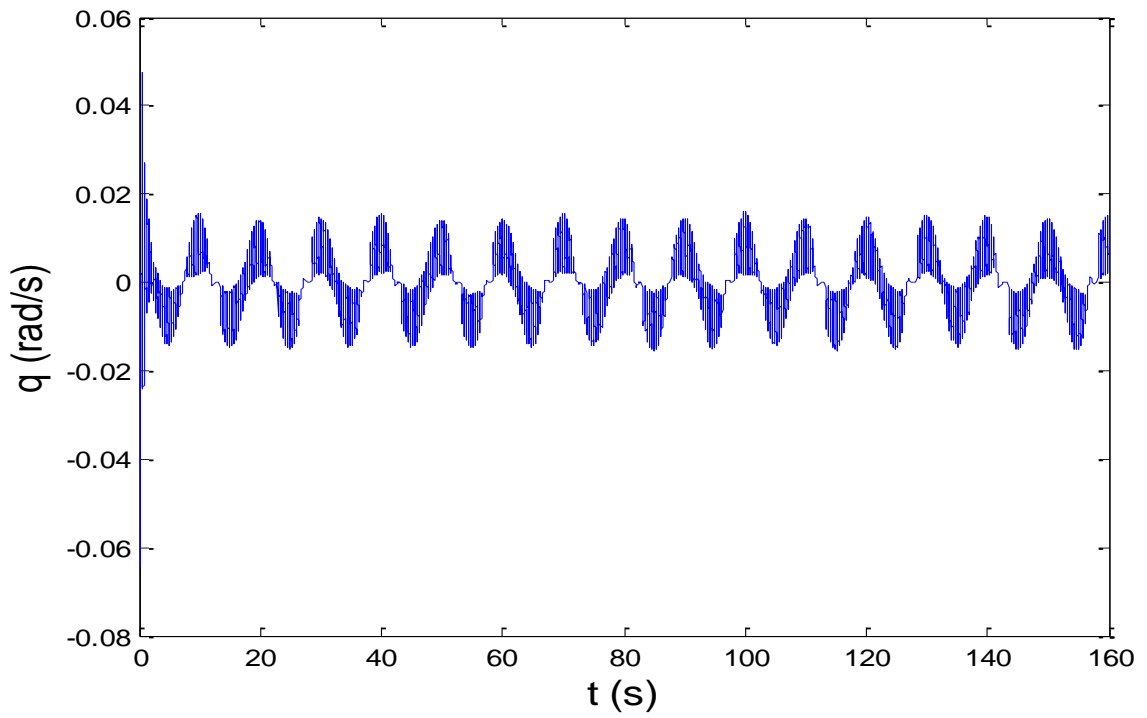


Figure III.3: Dynamique de tangage

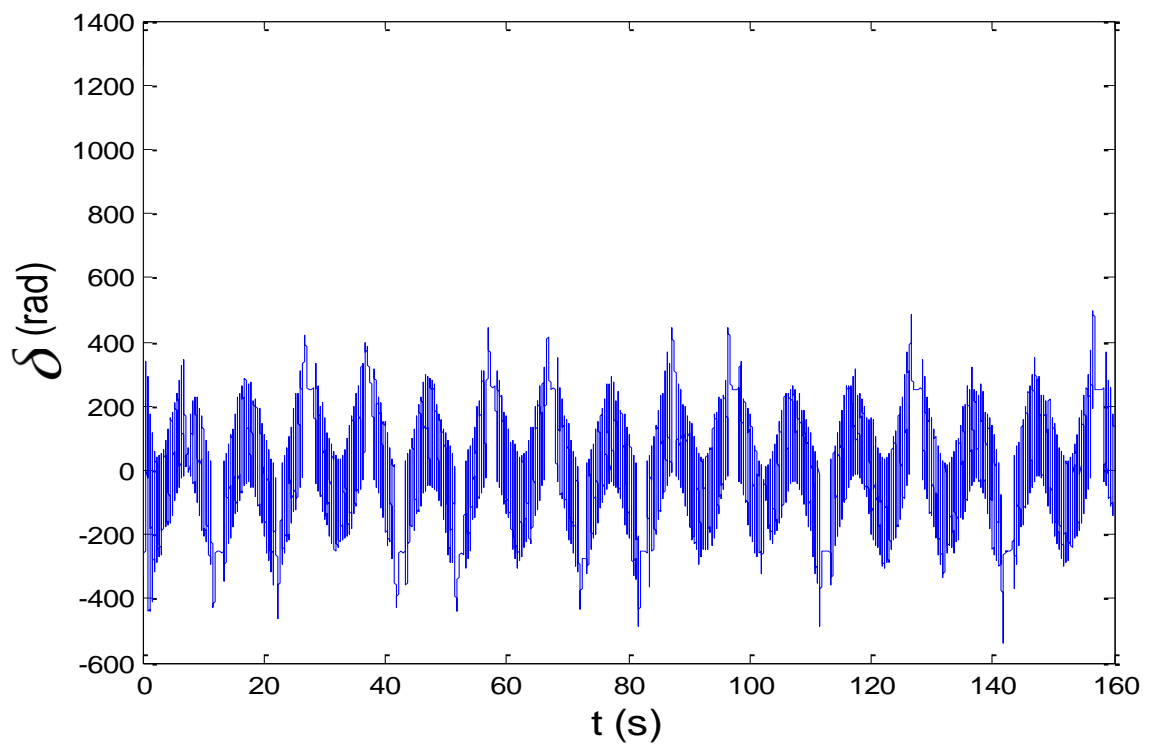


Figure III.4: L'angle de gouverne donné par le contrôleur

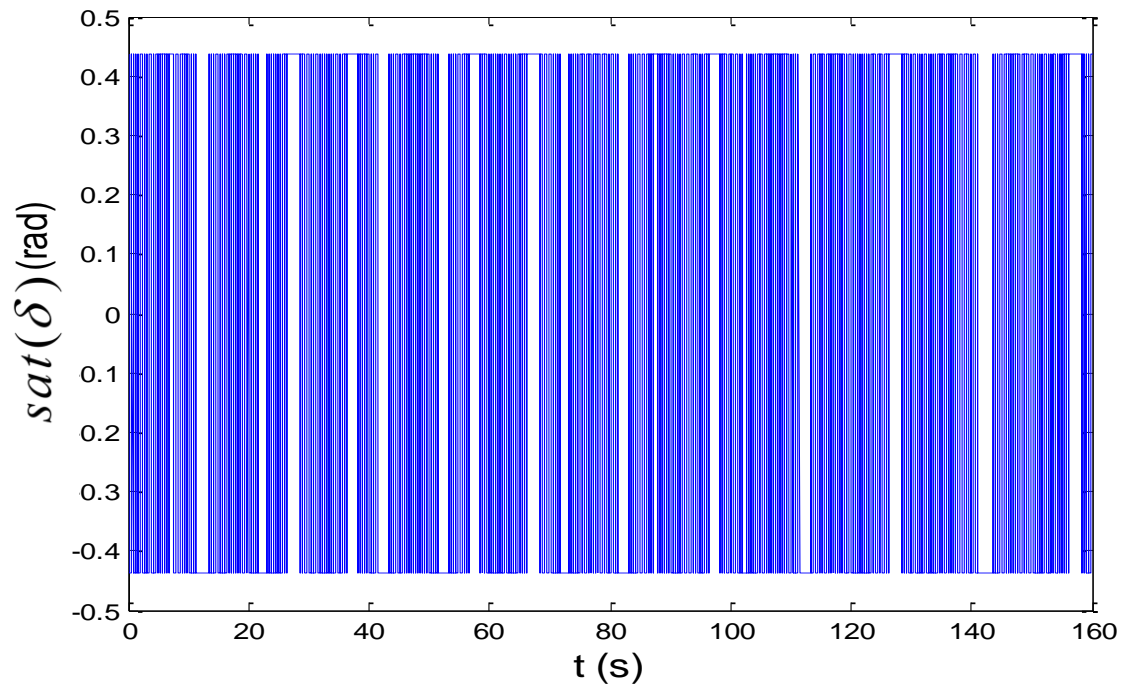


Figure III.5: L'angle de gouverne saturé

Il est à conclure que la méthode proposée est efficace pour la commande de profondeur du sous-marin malgré la saturation d'entrée.

III.5. Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre, un schéma de Commande Backstepping adaptative flou par mode glissant non linéaire pour le control de profondeur d'un véhicule sous-marin.

Pour ce faire, on a utilisé la combinaison de La commande par Backstepping et la commande par mode glissement pour éviter la complexité de commande des systèmes non-affines, les systèmes flous ont pur rôle l'estimation des dynamiques inconnues, pour compenser la saturation on fait appel à un système auxiliaire donc le schéma de commande assure la convergence de l'erreur modifiée.

Les résultats de la simulation montrent que le contrôleur proposé peut bien exécuter la commande de la profondeur même lorsqu'il existe une saturation d'entrée, et la stabilité de la boucle fermée est prouvée.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de concevoir un contrôleur intelligent pour les systèmes non linéaires et d'évaluer son efficacité par simulation. Nous avons développé un schéma utilisant des méthodes de commande non linéaire.

La mise en œuvre de l'algorithme est basée sur une approche naturelle, mettant en évidence l'applicabilité des solutions théoriques proposées pour le contrôle de systèmes non linéaires complexes.

Pour l'algorithme proposé, nous cherchons à corrélérer des critères de robustesse et de stabilité pour synthétiser des lois de commande efficaces.

Pour la non-linéarité de saturation d'entrée, un nouveau système auxiliaire est fourni. Visant le problème de la dynamique inconnue du système de profondeur des AUV, une méthode d'identification en ligne adaptative basée sur un système flou est proposée, ainsi que de nouvelles règles de mise à jour incluant des états auxiliaires.

Les résultats de la simulation montrent que le contrôleur proposé peut bien effectuer le contrôle de la profondeur même en présence de saturation. De plus, dans un véritable contrôle de plongée AUV, la puissance de la gouverne est inévitable

Par conséquent, la dynamique des surfaces doit être prise en compte dans la conception du contrôleur à l'avenir pour améliorer les résultats obtenus, ce qui peut confirmer les résultats obtenus dans la simulation et garantir les performances de poursuite souhaitées.

Références bibliographies

- [1] Pararas-Carayannis, G. (1976). Turtle : A revolutionary submarine. *Sea Frontiers*, 22(4) :234.
- [2] Alt, C. V. (2003). Autonomous underwater vehicles. In Workshop report of Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors (ALPS), La Jolla, California.
- [3] Danson, E. (2002). The economics of scale : using AUVs for wide-area hydrographic survey and ocean data acquisition. In Proceedings of FIG XXII International Congress, Washington, D.C. US.
- [4] Kojima, J., Kato, Y., Asakawa, K., and Kato, N. (1998). Experimental results of autonomous underwater vehicle aqua explorer 2 for inspection of underwater cables. In Proceedings of MTS/IEEE OCEANS'98, Nice, France.
- [5] Yoon, J., Park, Y., Oh, W., Kim, K., and Cho, H. (1998). Underwater wall climbing robot for decontamination of nuclear research reactors. In Proceedings of World Automation Congress, Anchorage, Alaska, USA.
- [6] Caccia, M., Indiveri, G., and Verrugio, G. (2000). Modeling and identification of openframe variable configuration unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(2) :227–240.
- [7] Rolfes, S. and Rendas, M. (2004). Statistical snakes : robust tracking of benthic contours under varying background. In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan.
- [8] Fossen, T. I. (1994). Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd.
- [9] Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No. 1-5, April 1950, pp. 1-15.
- [10] Xiang, X., Yu, C., Zhang, Q.: Robust fuzzy 3D path following for autonomous underwater vehicle subject to uncertainties. *Comput. Oper. Res.* 84, 165–177 (2017).
- [11] Li, J.H., Lee, P.M.: A neural network adaptive controller design for free-pitch-angle diving behavior of an autonomous under- water vehicle. *Robot Auton. Syst.* 52, 132–147 (2005).
- [12] B. Khalissa, « Contribution à la commande des systèmes non linéaires incertains et perturbés », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1, 2020.
- [13] J.E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.

- [14] Cour en ligne, commande avancé, master 2 Automatique, université de Jijel
- [15] L.X. Wang, Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems, *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1, (2), 146-155, 1993.
- [16] L. Zadeh, "Fuzzy logic," *ZEEE Comput.*, vol. 21, no. 4, pp. 83-93, Apr. 1988.
- [17] T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, (1), 116-132, 1985.
- [18] L.X. Wang and J.M. Mendel, Fuzzy basis function, universal approximation, and orthogonal least square learning. *IEEE Trans on neural networks*, 3, (5), 807-814, 1992.
- [19] Chu, Z., Xiang, X., Zhu, D. et al. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Diving Control for Autonomous Underwater Vehicle with Input Constraint. *Int. J. Fuzzy Syst.* 20, 1460–1469 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40815-017-0390-2>.
- [20] R. Rout, « Control of Autonomous Underwater Vehicles », Mémoire de Master, National Institute of Technology Rourkela, 2013.
- [21] Jean-Mathias Spiewak. Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes. *Automatique / Robotique*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. tel-00195079 .

Résumé : Dans les véhicules sous-marins, la limitation de l'angle de gouverne est inévitable. C'est un problème pratique qu'on le coïncide lors de l'implémentation des contrôleurs est la saturation des entrées de commande. Si ce problème est négligé lors de la synthèse des lois de commande on arrive à une dégradation significative des performances qui peut arriver à l'instabilité. Ce travail, s'intéresse au développement d'un schéma de commande adaptative floue Backstepping par mode glissant avec saturation des entrées pour le contrôle d'attitude d'un véhicule sous marin. Le problème de saturation qui s'avère plus délicat dans le cas adaptatif est traité par la construction d'un système auxiliaire et par la suite la modification du signal d'erreur utilisée dans les lois d'adaptation paramétriques. L'analyse de stabilité est effectuée par la méthode directe de Lyapunov. Le schéma de commande proposé est validé par un teste de simulation.

Mots clés : système non linéaire, commande adaptative, commande backstepping, commande par mode glissant, commande par logique floue.

Abstract: In underwater vehicles, the limitation of the steering angle is inevitable. It is a practical problem that coincides with the implementation of the controllers is the saturation of the control inputs. If this problem is neglected during the synthesis of the control laws, we arrive at a significant degradation of the performances that can arrive to the instability. This work focuses on the development of an adaptive fuzzy backstepping control scheme by sliding mode with input saturation for the attitude control of an underwater vehicle. The saturation problem which is more delicate in the adaptive case is treated by the construction of an auxiliary system and then the modification of the error signal used in the parametric adaptation laws. The stability analysis is performed by the direct Lyapunov method. The proposed control scheme is validated by a simulation test.

Keywords: nonlinear system, adaptive control, backstepping control, sliding mode control, fuzzy control.

ملخص: في الغواصات الالية المستقلة، تقييد زاوية التوجيه لا مفر منه. وهي مشكلة عملية تتزامن مع تنفيذ المتحكمات وهي التي تشبع مدخلات التحكم. إذا تم إهمال هذه المشكلة أثناء توليف قوانين التحكم ، فإننا نصل إلى تدهور كبير في الأداء يمكن أن يؤدي إلى عدم الاستقرار. يركز هذا العمل على تطوير نظام التحكم التراجعي المكيف في وضعية الانزلاق مع تشبع المداخل للتحكم في المركبات الغواصة المستقلة. يتم التعامل مع مشكلة التشبع الأكثر حساسية في الحالة التكيفية من خلال بناء نظام مساعد ثم تعديل إشارة الخطأ المستخدمة في قوانين التكيف البارامترية، يتم إجراء تحليل الثبات بواسطة طريقة Lyapunov المباشرة. يتم التحقق من صحة مخطط التحكم المقترح عن طريق اختبار المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة غير خطية، تحكم تكيفي، تحكم تراجعي، التحكم في وضعية الانزلاق، تحكم غامض .