

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Présenté par :

SOUIDI YUCEF

HENAOUI WALID

Sujet :

**Modélisation et commande de multi-véhicules
sous marins autonomes**

Soutenu publiquement, le 13 juin 2024, devant le jury composé de :

Mme.KELKOUL Bahia	MAB	Université de Tlemcen	Président
Mr.BENARIBA Hassane	MCA	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme.BENMANSOUR Souhila	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire :2023/2024.

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force, la volonté et surtout le courage nécessaires pour mener à bien ce mémoire. Nous sommes très reconnaissants à notre directrice de thèse, Mme BENMANSOUR Souhila, pour sa présence constante, son soutien indéfectible et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail. Ses avis éclairés et son expérience ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire, et nous lui en sommes infiniment reconnaissants.

Nous tenons à exprimer notre sincère respect aux membres du jury, Mr BENARIBA Hassane et Mme KELKOUL Bahia, qui ont accepté d'évaluer notre travail. Vos réflexions et critiques scientifiques nous seront d'une valeur inestimable, et nous espérons que nos travaux répondront à vos attentes. Nous sommes honorés que vous ayez accepté de revoir notre travail et nous attendons avec impatience vos commentaires.

Nous voudrions également exprimer notre infinie gratitude à tout le personnel du Département de génie électrique et électronique, ainsi qu'à tous les professeurs du Master d'automatique et informatique industrielle, pour leur enseignement et les cours passionnants qu'ils nous ont dispensés tout au long de nos études à Abou Bekr Belkaïd.

Dédicace

Souidi Youcef

- À ma mère, pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille.
- À mon père, pour ses conseils avisés et sa force.
- À mon frère, pour sa camaraderie et ses encouragements constants.
- À mes amis, pour leur présence et leur soutien précieux tout au long de ce parcours.

Merci à vous tous, sans qui ce travail n'aurait pas été possible.

Henaoui Walid

- À mon père, qui n'est plus parmi nous, mais dont l'influence et les valeurs continuent de me guider chaque jour.
- À ma mère, pour son soutien inébranlable, sa patience infinie et son amour sans condition. Tu as été une source constante de réconfort et de motivation.
- À mes sœurs, pour leur encouragement et leur amour. Vos familles et vous avez apporté de la joie et de la chaleur dans ma vie, me donnant l'énergie nécessaire pour accomplir cet objectif.
- À moi-même, pour ma persévérance, ma détermination et ma résilience face aux défis rencontrés.
- Et enfin, à tous ceux qui m'ont soutenu et inspiré tout au long de ce voyage académique.

Merci du fond du cœur.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
1 Généralités sur les systèmes sous-marins autonomes	5
1.1 Introduction	6
1.2 État de l'art sur les sous-marins	6
1.3 Catégories des robots sous-marins	10
1.3.1 Robots sous-marins habités MUV	10
1.3.2 Véhicules sous-marins non habités	10
1.4 Développement des sous-marins AUV	13
1.4.1 Un peu d'histoire	13
1.4.2 Technologie des AUVs	15
1.4.3 Descriptions des AUVs	17
1.4.4 Classification des AUVs selon la profondeur	19
1.4.5 Classification des AUVs selon la forme	20
1.4.6 Applications des AUVs	21
1.4.7 Techniques de commandes des AUV	22
1.5 Développement des systèmes multi-AUV	24
1.5.1 Un peu d'histoire sur les systèmes multi-AUV	24
1.5.2 Coordination des systèmes multi-AUV	26
1.5.3 Protocole de contrôle de formation des systèmes multi-AUV	27
1.5.4 Technologie des systèmes multi-AUV	28
1.6 Conclusion	30
2 Modélisation des véhicules sous-marins	31
2.1 Introduction	32
2.2 Préliminaire et notations	32
2.3 Hypothèses et repères associés	32
2.4 Modélisation cinématique de l'AUV	34
2.5 Modélisation dynamique de l'AUV	36
2.5.1 Expression du modèle dynamique	36
2.5.2 Forces et moments hydrodynamiques	37
2.5.3 Gravité et Flottabilité	40
2.5.4 Actionneurs hydrodynamiques	41
2.5.5 Modèle général de la dynamique	41
2.6 Modèle hydrodynamique adopté	42
2.6.1 Modèle cinématique	42
2.6.2 Modèle dynamique	42
2.7 Conclusion	44
3 Théorie des commandes appliquées au AUV	45
3.1 Introduction	46

3.2	Commande Proportionnelle Intégrale dérivée	46
3.2.1	Chaîne de régulation PID	46
3.2.2	Actions de régulation PID	47
3.2.3	Types de régulateur PID	48
3.3	Régulateur PD (Proportionnel-Dérivé)	49
3.3.1	Définition	49
3.3.2	Avantages	49
3.3.3	Domaines d'application des contrôleurs PD	50
3.3.4	Fonction de transfert	51
3.4	Commande par Logique floue- (FLC)	52
3.4.1	Technique de logique floue	52
3.4.2	Description d'un ensemble flou	52
3.4.3	Fonctions d'appartenance	54
3.4.4	Opérateurs de la logique floue	56
3.4.5	Commande par logique floue FLC	58
3.4.5.1	Structure de la commande floue	59
3.4.5.2	Structures d'un contrôleur PID flou	60
3.5	Conclusion	62
4	Simulations et interprétation des résultats	63
4.1	Introduction	64
4.2	Résultats des simulations	64
4.2.1	Système multi-AUV adopté	64
4.2.2	Perturbations et incertitudes	65
4.2.3	Les simulations du multi-AUV sans correction	65
4.2.4	Les simulations de la commande PD du multi-AUV	67
4.2.5	Les simulations de la commande FLC du multi-AUV	70
4.2.6	Comparaison entre PD et FLC	77
4.2.7	Navigation de système multi-AUV en 3D	78
4.2.8	Navigation en 3D du multi-AUV en utilisant LOS basé sur FLC	81
4.2.9	Navigation en 3D du multi-AUV en utilisant LOS basé sur PD	84
4.3	Conclusion	87
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	89
	ANNEXE	96
A	Paramètres du Robot sous-marin autonome de forme cylindrique	96
A.1	Paramètres inertiels	96
A.2	Les paramètres hydrodynamiques	97
A.3	Autre paramètres	98

Table des figures

Figure 1.1	Sous-marin "Tortue" (1776) [2]	7
Figure 1.2	Sous-marin "Nautilus" (1797) [3]	7
Figure 1.3	Sous-marin "Resurgam" (1879) [4]	8
Figure 1.4	Sous-marin "Gymnote" (1887)[5]	8
Figure 1.5	Sous-marin " Narval" (1904) [6]	9
Figure 1.6	Sous-marin "USS Nautilus" (SSN-571) (1950)[7]	9
Figure 1.7	Sous-marin habités, (a) : Alistar 3000, (b) : Nautille 1984	10
Figure 1.8	Sous marin Poisson remorqué [10]	11
Figure 1.9	Sous-marin ROV [10]	11
Figure 1.10	Sous-marin UUV [10]	12
Figure 1.11	Sous-marin AUV [10]	12
Figure 1.12	Classification des robots non-habités selon l'autonomie [10]	13
Figure 1.13	AUV de type torpille	13
Figure 1.14	Sous-marin AUV (SURV)	14
Figure 1.15	Réseau d'échantillonnage océanique autonome (AOSN [12]	14
Figure 1.16	Sous-marin AUV (ABE) [13]	15
Figure 1.17	Sous-marin AUV (AUSI)	15
Figure 1.18	Réseaux de capteurs sous-marins [14]	16
Figure 1.19	Différentes parties d'un AUV	17
Figure 1.20	Gouvernails ou Surfaces mobiles de l'AUV [17]	19
Figure 1.21	Propulseurs d'un AUV, (a) à hélice, (b) à aile battante [18],[19]	19
Figure 1.22	Sous-marin AUV grands fonds, (ASTERX) [20]	20
Figure 1.23	AUVs côtiers, (a) : AUV "ECOMAPPER", (b) : Mini AUV "NanoSooker" [21],[22]	20
Figure 1.24	(a) : AUV cylindrique, (b) : AUV parallélépipédique, (c) : AUV ellipsoïdale. [10]	21
Figure 1.25	Image de système multi-AUV (AOSN-II) [37]	24
Figure 1.26	Système multi-AUV (OOI) [38]	25
Figure 1.27	Image de projet système multi-AUV (ARENA) [41]	26
Figure 1.28	Système multi-AUV, (a) : Structure hétérogène, (b) : Structure homogène	26
Figure 1.29	Coordination des systèmes multi-AUV, (a) : schémas circulaires, (b) schémas en chaîne	27
Figure 1.30	Topologie typique de la structure leader-suiveur	28
Figure 1.31	Exemple de communication entre dans un système multi-AUV	29
Figure 2.1	Présentation de l'AUV selon les repères : fixe et inertiel [54]	33
Figure 2.2	Angles de rotation de l'AUV [56]	35
Figure 2.3	Forces de Gravité et de Flottabilité appliquées à un sous-marin [57]	40
Figure 3.1	Asservissement par un régulateur PID	47
Figure 3.2	Schéma bloc du contrôleur PD	51
Figure 3.3	Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous.	52
Figure 3.4	Classification des ensembles flous	53

Figure 3.5 Fonctions d'appartenance, (a) triangulaire, (b) trapézoïdale, (c) gaussienne, (d) sigmoïdale, (e) Singleton.	55
Figure 3.6 Opération floue "NON"	57
Figure 3.7 Opération floue "ET"	57
Figure 3.8 Opération floue "OU"	58
Figure 3.9 Structure d'un contrôleur flou	59
Figure 3.10 Schéma de principe d'un contrôleur flou type PI	61
Figure 3.11 Schéma de principe d'un contrôleur flou type PD.	61
Figure 3.12 Schéma de principe d'un contrôleur flou type PID.	61
Figure 4.1 Topologie du système multi-AUV adopté	64
Figure 4.2 Sous-marin autonome adopté	65
Figure 4.3 Évolution des positions angulaires du multi-AUV sans correcteur, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet	66
Figure 4.4 Erreurs de poursuite du Multi-AUV sans correcteur, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet	67
Figure 4.5 Schéma fonctionnel de la commande PD du multi-AUV.	67
Figure 4.6 Évolution des positions angulaires du multi-AUV avec correcteur PD, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet	69
Figure 4.7 Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec correcteur PD, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet	69
Figure 4.8 Évolution des vitesses angulaires du multi-AUV avec correcteur PD, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet	69
Figure 4.9 Schéma fonctionnel de la commande FLC du multi-AUV	70
Figure 4.10 Structure globale des FLC (entrée, sortie), (a) FLC de lacet, (b) FLC de tangage.	71
Figure 4.11 Fonctions d'appartenances de la variable floue (erreur de tangage $\tilde{\theta}$)	72
Figure 4.12 Fonctions d'appartenances de la variable floue (erreur de lacet $\tilde{\psi}$)	72
Figure 4.13 Fonctions d'appartenances de la variable floue (dérivée de l'erreur de tangage $\dot{\tilde{\theta}}$)	73
Figure 4.14 Fonctions d'appartenances de la variable floue (dérivée de l'erreur de lacet $\dot{\tilde{\psi}}$)	74
Figure 4.15 Représentation des règles d'inférence de système takagi-suegeno.	74
Figure 4.16 Fonctions d'appartenances de la sortie de la variable floue (τ_q)	75
Figure 4.17 Fonctions d'appartenances de la sortie de la variable floue (τ_r)	76
Figure 4.18 Évolution des positions angulaires du multi-AUV avec correcteur flou, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet.	76
Figure 4.19 Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec correcteur flou, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet.	76
Figure 4.20 Évolution des vitesses angulaires du multi-AUV avec correcteur flou, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet.	77
Figure 4.21 Système de principe de la méthode de guidage LOS.[71]	79
Figure 4.22 Organigramme de la planification de trajectoire.	81
Figure 4.23 Poursuite des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur flou, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet	82
Figure 4.24 Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec contrôleur flou, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet	82
Figure 4.25 Poursuite des vitesses angulaires du multi-AUV avec contrôleur flou, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet	82
Figure 4.26 Couple de la commande floue, (a) couple de tangage, (b) couple de lacet.	83
Figure 4.27 Navigation du multi-AUV en 2D avec contrôleur flou et LOS	83
Figure 4.28 Navigation du multi-AUV en 3D avec contrôleur flou et LOS	83

Figure 4.29 Poursuites des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet	85
Figure 4.30 Erreurs de poursuite des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Erreurs de tangage, (b) Erreurs de lacet	85
Figure 4.31 Poursuites des vitesses angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet	85
Figure 4.32 Couple de la commande PD, (a) couple de tangage, (b) couple de lacet.	86
Figure 4.33 Navigation du multi-AUV en 2D avec PD et LOS	86
Figure 4.34 Navigation du multi-AUV en 3D avec PD et LOS	86

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Notations standards de l'AUV à six degrés de liberté.[54]	32
Tableau 4.1	Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de $(\tilde{\theta})$	72
Tableau 4.2	Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de $(\tilde{\psi})$	73
Tableau 4.3	Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de $(\dot{\tilde{\theta}})$	73
Tableau 4.4	Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de $(\dot{\tilde{\psi}})$	74
Tableau 4.5	Règles d'inférence.	75
Tableau 4.6	Étude comparative entre les contrôleurs FLC et PD.	78
Tableau A.1	Centre de gravité	96
Tableau A.2	Paramètres inertiels	96
Tableau A.3	Les termes des masses	97
Tableau A.4	Les termes de coefficient hydrodynamique de trainer linéaire	97
Tableau A.5	Les termes de coefficient hydrodynamique de trainer quadratique	97
Tableau A.6	Autre paramètres	98

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les océans couvrent une grande partie de la surface terrestre, environ 70%, et ils sont essentiels à la vie sur terre en fournissant des ressources biologiques et minérales importantes. Ces océans jouent également un rôle crucial dans l'environnement mondial, notamment dans le cycle du carbone et la régulation de la pollution.

Avec l'augmentation de la population et le développement économique, les ressources terrestres deviennent insuffisantes pour répondre aux besoins humains. Le développement marin est donc essentiel pour assurer la survie et la croissance de l'humanité, nécessitant notamment l'exploration et l'exploitation des ressources marines, ainsi que la mise en place de mesures pour réduire les effets néfastes des catastrophes naturelles marines.

L'évolution des technologies marines a permis des avancées significatives dans de nombreux domaines tels que le transport maritime, l'énergie océanique, l'exploration des fonds marins, etc. Cependant, ces progrès sont accompagnés de défis importants, notamment en ce qui concerne la préservation de l'écologie marine et la sécurité.

Malgré les rénovations technologiques, notre connaissance des océans reste limitée, avec plus de 80 % de la mer non explorée. De nombreuses caractéristiques sous-marines restent inconnues en raison de limitations techniques et financières.

L'exploration des profondeurs marines est particulièrement difficile en raison de la pression excessive, de la présence de créatures inconnues et dangereuses, et des limitations techniques. Les véhicules sous-marins autonomes (AUV) sont devenus essentiels pour cette exploration en raison de leur capacité à fonctionner de manière autonome et à accomplir des tâches planifiées automatiquement.

Dans ce mémoire, nous sommes notamment intéressés par les robots sous-marins autonomes (AUV). Ces engins robotisés sont conçus pour fonctionner de manière autonome et indépendante dans des environnements sous-marins, tels que les océans, les lacs ou les rivières. Contrairement aux véhicules télécommandés, les AUV ne nécessitent pas de pilote humain en temps réel pour les guider pendant leurs missions. Ils sont équipés de capteurs, d'instruments et de systèmes de navigation avancés qui leur permettent de collecter des données, d'effectuer des tâches spécifiques, et de naviguer de manière autonome dans leur environnement. Ces véhicules peuvent être habités, semi-autonomes ou complètement autonomes, et peuvent être actionnés par des moteurs électriques, à combustion interne, ou par d'autres sources d'énergie.

Les AUV peuvent être utilisés pour une variété de missions, surtout l'exploration océanographique, la cartographie des fonds marins, la surveillance environnementale, la recherche scientifique et le sauvetage, ainsi que des applications militaires et commerciales telles que l'inspection de conduites sous-marines ou la collecte de données environnementales. La capacité à opérer de manière autonome de ces AUV les rend particulièrement utiles pour les missions à longue durée et dans des zones difficiles d'accès pour les humains. Un large éventail d'AUV ont été développés et mis en œuvre dans divers contextes pratiques. Les avancées récentes dans les spécifications techniques, telles que la profondeur de plongée et l'autonomie, ont considérablement renforcé la capacité des AUV à accomplir des tâches sous-marines complexes [1].

En raison de la complexité croissante des tâches et de l'environnement sous-marin, un seul AUV peut rencontrer des difficultés pour réaliser des missions complexes. Cela a conduit au développement de

systèmes multi-AUV capables de coopérer pour accomplir des tâches de manière plus efficace, ce qui les rend adaptés à des environnements sous-marins complexes. Ces robots représentent un champ d'investigation très important et constitue actuellement un challenge dans le domaine de la robotique.

La coordination et la coopération entre plusieurs AUV sont essentielles au bon fonctionnement d'un système multi-AUV. Cette approche permet d'élargir la couverture spatiale pour des missions d'exploration plus étendues, de relever des défis plus complexes nécessitant des compétences spécialisées, et d'améliorer la robustesse du système en cas de défaillance de un des véhicules.

Le passage à un système multi-AUV aboutit à une efficacité accrue des opérations marines, une réduction du temps nécessaire pour effectuer les missions, une meilleure flexibilité dans la planification des tâches, et une capacité à aborder des problèmes complexes qui pourraient dépasser les capacités d'un seul véhicule. Cependant, cela nécessite une coordination précise entre les véhicules, ainsi qu'une gestion appropriée des ressources énergétiques et des communications pour assurer le bon fonctionnement du système dans son ensemble.

L'objectif principal de notre travail est de concevoir un système multi-AUV composé de trois véhicules, dont l'un agit en tant que leader et les deux autres en tant que suiveurs. Ces AUV doivent suivre une trajectoire de référence identique tout en maintenant une certaine distance entre eux. Notre contribution commence par l'attribution à chaque AUV un modèle cinématique et dynamique compatible. Pour garantir que les véhicules accomplissent avec précision leur mission, nous proposons ensuite l'application de deux stratégies de commande, à savoir : la commande classique proportionnelle dérivée (PD) et la commande basée sur la logique floue (FLC), qui ne nécessite pas la connaissance du modèle du système. Nous abordons ensuite la navigation système multi-AUV en 3D en assurant la poursuite des AUV vers leurs consignes.

Enfin, les résultats des simulations concernant les performances et la robustesse des lois de commande ainsi que la poursuite de trajectoire du système sont exposés.

Le plan de ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente les concepts de base nécessaires à la bonne compréhension du mémoire. Pour cela nous avons présenté un état de l'art sur les véhicules sous-marins autonomes, comprenant une brève histoire, les différentes applications et classifications de ces engins, ainsi que les multiples techniques de commande dédiées à ces systèmes.
- Le deuxième chapitre décrit le modèle dynamique et cinématique qui gouvernent les différents mouvements d'un AUV.
- Le troisième chapitre présente la théorie des contrôleurs PID et FLC, ainsi que leurs avantages.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'application des régulateurs PD et FLC au système multi-AUV après avoir synthétisé leurs lois de commande. La navigation des AUVs en 3D ainsi que la poursuite de ces engins à leurs références seront analysées ensuite et les résultats de simulation obtenus seront présentés et interprétés.

- Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale en faisant la synthèse des principaux résultats obtenus et en proposant quelques travaux futurs.

Ce plan offre une structure claire pour présenter les différentes étapes de recherches et les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes sous-marins autonomes

1.1 Introduction

L'exploration du milieu sous-marin est cruciale et occupe plusieurs domaines, tels que la recherche océanographique, les applications militaires et plus récemment l'exploitation des ressources naturelles à plus de 1000 mètres de profondeur. Pour automatiser les tâches d'inspection et de mesure dans ce vaste environnement, les véhicules télé-opérés ont été les premiers développés, mais leur efficacité est limitée par l'intervention humaine. Depuis les années 80, plusieurs recherches ont été menées pour développer des solutions basées sur des véhicules autonomes, confrontés à des défis tels que l'autonomie énergétique et la navigation. Aujourd'hui, les robots sous-marins autonomes (AUV) sont indispensables pour explorer les mers et les océans, utilisés dans divers domaines comme l'inspection et la cartographie. Dans ces différents champs d'application, la robotique sous-marine offre une alternative pour prévenir les risques encourus par les êtres humains (notamment la lutte contre la pollution et les missions en eaux profondes) et permet parfois de réduire les coûts opérationnels grâce à l'automatisation de certaines tâches.

Ce genre de robot fait l'objet de plusieurs investigations dans la robotique moderne. C'est donc tout naturellement que ce premier chapitre expose une revue bibliographique sur les sous-marins en général et particulièrement les sous-marins autonomes AUV ainsi que les systèmes multi-AUV.

1.2 État de l'art sur les sous-marins

Le concept du sous-marin remonte à l'Antiquité. La première forme de plongée était une cloche nommée "Tonneau d'Alexandre" car c'est Alexandre le Grand qui l'a utilisée en premier. Cette cloche, sous forme d'un tonneau de verre ouvert en bas, permettait de descendre verticalement dans l'eau jusqu'à environ 20 mètres de profondeur à l'aide d'une corde. Cet engin, représentant l'un des premiers équipements ayant permis l'exploration sous-marine, a été utilisé pour observer les créatures marines .

En 1690, à Marbourg en Allemagne, Denis Papin, un Français, a conçu deux modèles de sous-marins. Le premier, un parallélépipède de fer hermétique, utilise une pompe pour comprimer l'air à l'intérieur. Après des essais réussis à terre, le sous-marin est accidentellement détruit avant sa mise à l'eau.

En 1692, Denis Papin a créé un second modèle de sous-marin. Sa coque en forme de tonneau résiste naturellement à la pression de l'eau, éliminant le besoin d'air comprimé. Ce sous-marin permet à un homme de se maintenir à l'intérieur. Avec l'accompagnement d'un collègue, Papin a réalisé au moins une plongée réussie.

En 1775, David Bushnell, un Américain, a construit le premier sous-marin américain (Figure 1.1) sous forme d'un œuf en bois connu sous le nom de "la Tortue", construite entièrement en bois. Malgré sa petite taille, la Tortue était un exploit technologique de son époque. Pour se déplacer vers l'avant, le pilote, seul à bord, fait tourner une manivelle pour actionner une hélice. Pour descendre, il ouvre des vannes afin de remplir les ballasts ; pour remonter, il utilise une pompe pour expulser l'eau. La Tortue, a été utilisée lors du premier engagement naval de l'histoire impliquant un sous-marin, qui a eu lieu dans le port de New York en 1776 [2].

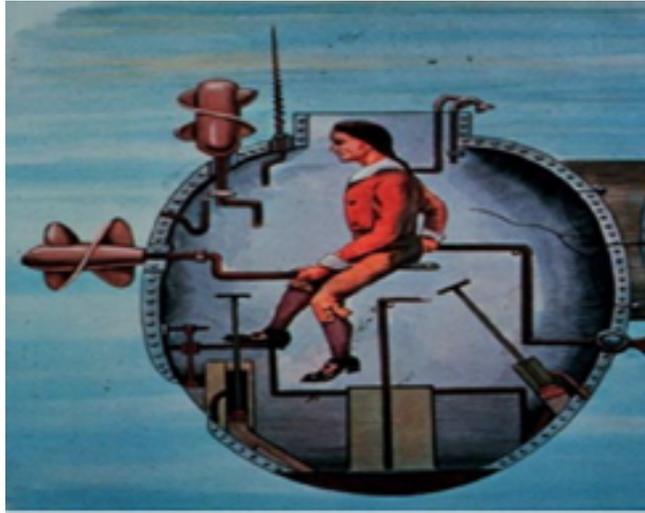


FIGURE 1.1 – Sous-marin "Tortue" (1776) [2]

En 1797, l'ingénieur américain Robert Fulton construit le Nautilus (Figure 1.2), un navire en acier recouvert de cuivre mesurant 6,50 mètres de long. Propulsé par une hélice manuellement actionnée par trois membres d'équipage, le Nautilus est équipé d'une charge explosive déclenchée à distance et destinée à être fixée sous les navires ennemis, bien que cela s'avère difficile en pratique. L'ingénieur Fulton a tenté de convaincre la France et la Grande-Bretagne avec son invention, mais ces deux pays ont refusé d'accepter ce projet [3].



FIGURE 1.2 – Sous-marin "Nautilus" (1797) [3]

En 1879, l'ingénieur George W. Garrett a conçu ce qui était considéré par certains comme le premier sous-marin propulsé pratique au monde, le "Resurgam" (Figure 1.3). Cet engin a été construit en Angleterre, et il était actionné par un moteur à vapeur, capable de fonctionner pendant une dizaine d'heures grâce à l'énergie stockée dans un réservoir isolé [4].



FIGURE 1.3 – Sous-marin "Resurgam" (1879) [4]

En 1887, le "Gymnote", conçu par l'ingénieur français Henri Dupuy, est devenu le premier sous-marin pleinement opérationnel. Avec ses dimensions de 17 mètres de longueur, il était équipé d'un moteur électrique de 50 chevaux, lui permettant d'atteindre respectivement 8 nœuds en surface et 4 nœuds en plongée. Ce sous-marin est piloté par un groupe de cinq membres, équipé de deux torpilles, et sa portée opérationnelle s'étend sur 65 milles en surface, mais seulement environ un tiers de cette surface en plongée[5].



FIGURE 1.4 – Sous-marin "Gymnote" (1887)[5]

En 1904, l'ingénieur français Maxime Laubuf a conçu le "Narval" (Figure 1.5), un sous-marin novateur qui a bénéficié d'une grande popularité auprès de la marine de l'époque. Il est remarquable en tant que premier sous-marin à avoir une propulsion mixte : utilisant une machine à vapeur en surface et un moteur électrique en plongée [6].



FIGURE 1.5 – Sous-marin "Narval" (1904) [6]

De 1914 à 1918, les sous-marins ayant un système de propulsion diesel-électrique sont largement utilisés durant la guerre. Ils fonctionnent grâce à des batteries qui alimentent un moteur électrique de propulsion, rechargeables en surface par un moteur diesel.

En 1944, les Allemands améliorent le "schnorchel" , un dispositif hollandais, permettant aux sous-marins d'utiliser en plongée leurs moteurs diesels sans devoir remonter à la surface, où leur fragilité est plus grande.

À partir des années 1950, les sous-marins commencent à adopter la propulsion nucléaire, suite à la mise en service du sous-marin "USS Nautilus" (SSN-571) en 1954 par la marine des États-Unis (Figure 1.6). Cet engin était le premier sous-marin à propulsion nucléaire de l'histoire. Il représentait une avancée technologique majeure, utilisant un réacteur nucléaire pour propulser le navire au lieu des moteurs diesel conventionnels. Cette innovation lui permettait de fonctionner de manière autonome et de rester en immersion prolongée, révolutionnant ainsi ses capacités opérationnelles.[7]



FIGURE 1.6 – Sous-marin "USS Nautilus" (SSN-571) (1950)[7]

A la fin du XIXe siècle, le terme "sous-marin" a été utilisé pour désigner les premiers navires capables de plonger sous la mer, mais avec des performances limitées en termes de profondeur, d'autonomie et de vitesse. À la fin de la seconde guerre mondiale, les progrès technologiques, tels que le perfectionnement du schnorchel et les avancées dans la propulsion électrique par les ingénieurs allemands, ont conduit à une distinction entre les navires principalement conçus pour naviguer en surface avec une capacité limitée de plongée et une nouvelle génération de navires dotés d'une autonomie sous-marine étendue, appelés "sous-marins". Ces engins, initialement coûteux, n'ont véritablement prospéré qu'à partir des années 2000, trouvant une utilité accrue dans des contextes

civils variés. Leur champ d'application s'étend de la recherche scientifique au milieu sous-marin à l'installation et à la maintenance d'équipements immergés.

1.3 Catégories des robots sous-marins

Actuellement, une large gamme de robots sous-marins est disponible pour accomplir diverses tâches [8]. Parmi ceux-ci, les robots sous-marins télé-opérés qui sont reliés à un navire en surface par un câble, tandis que les véhicules sous-marins autonomes qui peuvent effectuer leur mission sans intervention humaine. Autonomes sur le plan énergétique et décisionnel, ces véhicules présentent des structures différentes selon qu'ils sont destinés à explorer les grandes profondeurs ou à évoluer dans des zones côtières. Les sous-marins ont connu une forte évolution sur le plan technologique, et il est possible de les classer selon certains critères ou spécifications en deux grandes familles, à savoir [6], [8] :

- Véhicules Habités avec équipage (Manned Vehicles, en anglais).
- Véhicules Non-Habités (Unmanned Vehicles, en anglais).

1.3.1 Robots sous-marins habités MUV

Il existe deux catégories distinctes de cette classe [9] :

• Véhicules sous-marins de grande taille

Ces engins sont manœuvrés par un équipage et peuvent effectuer des missions de durée variable. Cette catégorie englobe surtout les sous-marins militaires.

• Submersibles

Ces robots sont de petite taille et destinés à l'exploration des grandes profondeurs. Ces engins sont habités par un équipage réduit de 2 à 3 personnes en raison de la limitation de la quantité d'oxygène disponible. À titre d'exemple, le Nautilus qui a été conçu par l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) en 1984.



(a)



(b)

FIGURE 1.7 – Sous-marin habités, (a) : Alistar 3000, (b) : Nautilus 1984

1.3.2 Véhicules sous-marins non habités

La classe de ces robots sous-marins est déterminée par le type de liaison avec la surface, ce qui détermine le degré d'autonomie du robot. On peut distinguer trois catégories d'engins sous-marins : ceux

qui sont reliés par un câble à la surface, ceux qui sont reliés par un lien acoustique, et enfin les véhicules complètement autonomes. Il existe trois principales catégories de robots sous-marins de ce type :

- **Poissons remorqués**

Ces engins sont remorqués par un navire via un câble qui transmet à la fois l'énergie et les données vers l'utilisateur. La principale utilisation des poissons remorqués est la cartographie sous-marine à partir d'images acoustiques capturées par un sonar latéral (Figure 1.8) [10].



FIGURE 1.8 – Sous marin Poisson remorqué [10]

- **Véhicules télé-opérés (ROV)**

Les ROV (Remotely Operated Vehicles), ou véhicules télécommandés, sont connectés à la surface par un câble appelé ombilical, qui transmet les commandes, l'énergie et les données des capteurs. Ils sont équipés d'un bras manipulateur unique ou de deux bras manipulateurs fonctionnant en parallèle. Leur utilisation se concentre sur les missions d'intervention et d'inspection. Leur mobilité est limitée par la longueur du câble, et ils se déplacent à des vitesses relativement faibles, tout en offrant une précision variable (Figure 1.9)[10].



FIGURE 1.9 – Sous-marin ROV [10]

- **Véhicules sous-marins non attachées (UUV)**

Les UUV (Untethered Underwater Vehicles), ou véhicules sous-marins sans liaison, ressemblent beaucoup aux AUV en termes de conception et d'équipement. Contrairement aux ROV, ils sont pilotés depuis la surface par un opérateur, mais cette fois-ci en utilisant des ondes acoustiques. Leur utilisation principale est centrée sur l'intervention et l'inspection. Leur mobilité est contrainte par le champ acoustique environnant. Un exemple d'un système UUV est présenté par Figure 1.10 [10].



FIGURE 1.10 – Sous-marin UUV [10]

• Véhicules sous-marins autonomes (AUV)

Les AUV (Autonomous Underwater Vehicles), ou véhicules sous-marins autonomes, sont entièrement automatisés et équipés de capteurs et d'un ordinateur intégré qui leur permettent de déterminer leur position et de naviguer vers des destinations spécifiques. Leurs principales applications incluent l'exploration, la collecte de données et la surveillance. Les objectifs de leur mission sont initialement définis par un opérateur. Conçus pour parcourir de longues distances, ces robots adoptent une forme limitée qui réduit la résistance hydrodynamique, favorisant ainsi une direction de déplacement préférentielle. Un exemple de robot AUV est illustré par Figure (1.11) [10].



FIGURE 1.11 – Sous-marin AUV [10]

Chacun des systèmes précédemment présentés possède ses propres avantages et limites, étant donné leur diversité. Le choix entre eux dépend de l'application spécifique envisagée. L'illustration ci-dessous offre une visualisation de ces véhicules selon un niveau croissant d'autonomie, allant du poisson remorqué au ROV, en passant par l'UUV et l'AUV (voir Figure 1.12) [10],[11].

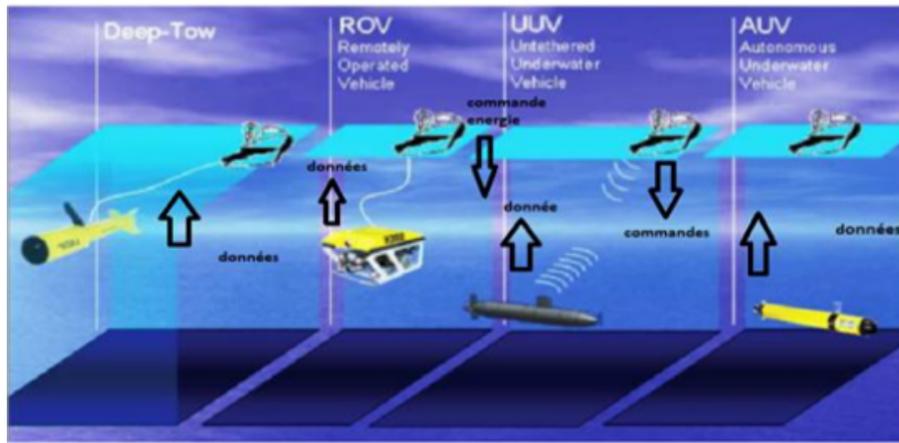


FIGURE 1.12 – Classification des robots non-habités selon l'autonomie [10]

Dans notre travail nous nous sommes notamment intéressés par les robots sous-marins Autonomes AUV. Pour cela, nous allons décrire ce genre de système dans la suite de ce chapitre.

1.4 Développement des sous-marins AUV

1.4.1 Un peu d'histoire

Le système AUV appartient à un domaine multidisciplinaire comprenant la mécanique des fluides, l'acoustique sous-marine, l'optique, les communications, la navigation, le contrôle automatique, l'informatique, la technologie des capteurs et d'autres domaines. La forme principale de l'AUV est celle d'une torpille (voir Figure 1.13). L'AUV a attiré l'attention des chercheurs du monde entier en raison de son importante valeur d'application dans les domaines civil et militaire. Des travaux de recherche approfondis sur l'AUV ont été entrepris, et il est devenu un équipement crucial pour accomplir diverses tâches sous-marines.

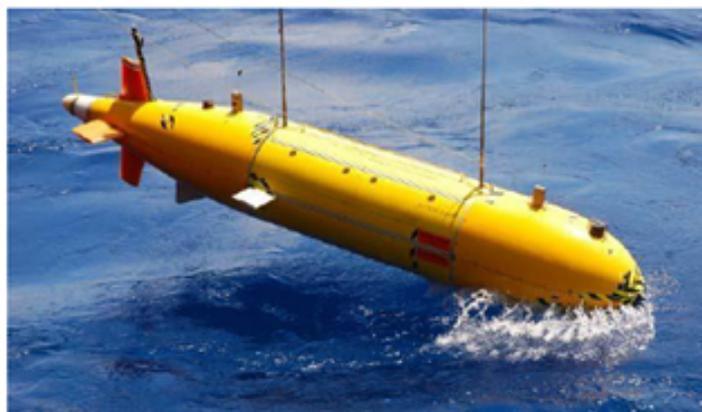


FIGURE 1.13 – AUV de type torpille

Le développement des AUV peut remonter aux années 1960 pour des applications spécifiques et explicites, telles que la collecte de données. De 1970 à 1980, l'intérêt pour l'exploration potentielle des AUV a augmenté, ce qui aboutit au développement de nombreux bancs d'essai dédiés à ces véhicules. Par exemple, le SPURV (illustré par Figure 1.14) développé par le laboratoire de physique appliquée de l'université de Washington. Pendant ce temps, l'Institut de technologie marine de l'Académie des

sciences de Russie (IMTP, RAS) avait lancé ses projets AUV pour développer la première génération d'AUV à plongée profonde.

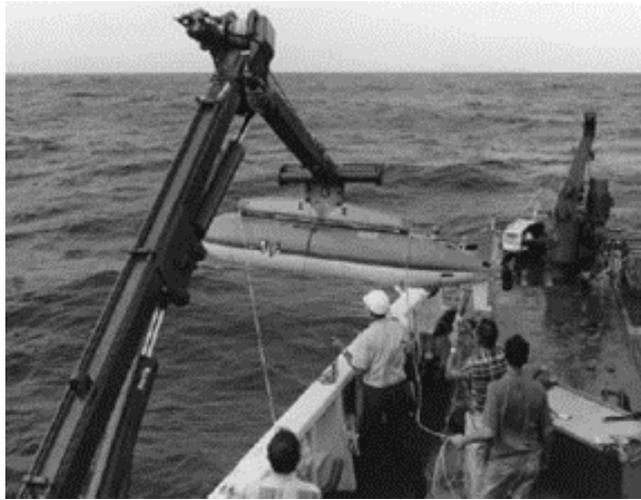


FIGURE 1.14 – Sous-marin AUV (SURV)

Dans les années 1980, la Preuve de Concept (POC) des AUV a été proposée. Le développement de micro-ordinateurs à faible consommation, de mémoires et de systèmes logiciels a rendu possible l'exécution d'algorithmes de navigation et de contrôle complexes des AUV.

Dans les années 1990, les recherches fondamentales sur les technologies avancées ont été étendues, et le développement des AUV est devenu plus international. Au cours de cette période, les AUV ont évolué de la phase théorique à la première génération de systèmes opérationnels capables d'accomplir des missions souhaitées. Pour une grande variété de tâches, de nombreuses institutions dans le monde entier ont développé des AUV. Au cours de cette décennie, le nouveau paradigme des AUV a été conçu, favorisant également une technologie de plus en plus commerciale, comme le Réseau d'échantillonnage océanique autonome (Autonomous Ocean Sampling Network : AOSN) [59] illustré dans la Figure 1.15.

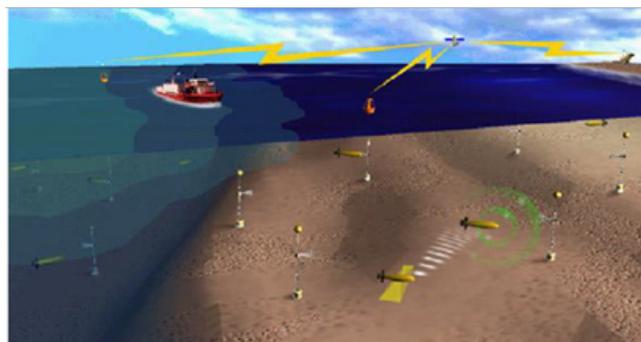


FIGURE 1.15 – Réseau d'échantillonnage océanique autonome (AOSN [12])

Depuis 2000, les AUV ont été appliqués aux affaires commerciales. Par exemple, Ces engins ont été utilisés dans l'exploitation pétrolière et gazière en eaux profondes en Afrique du Sud et en Amérique du Sud, dans la recherche et le sauvetage sous-marines, dans la recherche scientifique marine, etc. Les données de recherche scientifique collectées par l'ABE (Figure 1.16) et d'autres véhicules marins ont également eu des impacts positifs sur la science marine [13].



FIGURE 1.16 – Sous-marin AUV (ABE) [13]

1.4.2 Technologie des AUVs

Le développement des AUV comprend six domaines : autonomie, alimentation énergétique, navigation, capteurs, communication sous-marine et contrôle des mouvements.

• Autonomie des AUV

Cela revient à doter ces véhicules d'un système intelligent capable de détecter et d'évaluer leur environnement pour accomplir des tâches spécifiques. Cependant, malgré les progrès, le niveau d'intelligence actuel reste limité, et les AUV opèrent principalement selon une série d'instructions programmées.

• Alimentation énergétique des AUV

C'est la capacité d'endurance des AUV. Actuellement, ces derniers peuvent fonctionner pendant environ 10 heures, voire plusieurs jours pour certains modèles. Cependant, cette endurance accrue peut compromettre les performances des capteurs et la vitesse de transmission. Les premiers AUV utilisaient principalement des batteries coûteuses au plomb-acide et au zinc-argent, mais certains modèles plus récents optent pour des batteries au lithium. De plus, l'énergie solaire peut être une source d'alimentation alternative, comme démontré par l'AUSI des États-Unis (Figure 1.17).



FIGURE 1.17 – Sous-marin AUV (AUSI)

• Navigation des AUV dans l'eau

Cette tâche est principalement liée à leur auto-localisation. Contrairement à la navigation terrestre ou aérienne, l'utilisation du GPS est limitée en raison de la dégradation rapide des signaux électromagnétiques sous-marins. Actuellement, il existe trois principaux systèmes de navigation sous-marine : la navigation inertielle, la navigation acoustique et la navigation géophysique. Chaque type de navigation présente ses propres avantages et inconvénients, et ils peuvent être utilisés individuellement ou combinés pour former un système de navigation plus robuste. En outre, de nouveaux systèmes de communication et de navigation apparaissent, tels que les réseaux de capteurs sous-marins comme le montre Figure 1.18[14].

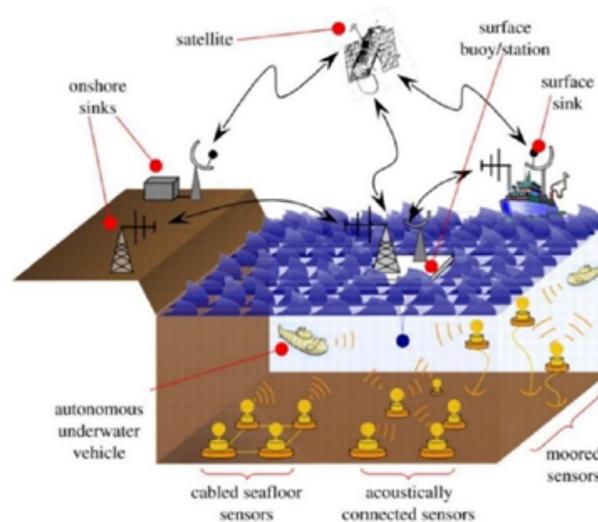


FIGURE 1.18 – Réseaux de capteurs sous-marins [14]

• Capteurs des AUV

Les AUV sont principalement des plateformes équipées de capteurs. Après que les AUV peuvent naviguer de manière stable sous l'eau, des capteurs sont équipés pour acquérir des informations efficaces de l'océan. Cependant, certains capteurs existants ne sont pas conçus pour les AUV, et il existe certaines limitations dans leur utilisation. Par conséquent, des capteurs plus intelligents, de faible puissance, hautement fiables et de petite taille sont développés pour les AUV.

De nombreux travaux ont été menés pour approuver le développement de systèmes d'imagerie haute résolution, optiques et acoustiques, facilitant l'obtention d'images détaillées sur de longues distances grâce à des processeurs améliorés. Bien que le sonar demeure le principal capteur pour recueillir des informations sous-marines, utilisé pour diverses tâches telles que la navigation, la communication et la détection d'objets, les caméras sous-marines offrent une résolution supérieure et la capacité de prendre des images en couleur.

• Communication sous-marine

Cela dépend principalement de la communication acoustique, offrant une portée maximale d'environ 20 km [15], mais avec une bande passante limitée et influencée par des bruits et d'autres facteurs [9]. D'autres technologies de communication, telles que la communication optique et RF-EM (Radio Frequency Electromagnetic), sont envisagées, offrant des avantages tels qu'une bande passante élevée ou une résistance accrue aux interférences, mais avec des limitations telles que la sensibilité à l'interférence électromagnétique [16].

1.4.3 Descriptions des AUVs

Dans cette section, nous examinerons les caractéristiques des véhicules autonomes sous-marins. Leur forme allongée favorise une meilleure hydrodynamique, facilitant ainsi leur déplacement dans l'eau. Ces engins sont généralement équipés d'un ou deux propulseurs à l'arrière pour la propulsion. Ces véhicules intègrent des actionneurs tels que des surfaces mobiles et des propulseurs, qui leur permettent de plonger et de modifier leur direction. En outre, le robot peut être subdivisé en quatre parties distinctes, comme illustré dans la Figure 1.19 : Partie électronique, partie de communication, partie des capteurs et partie des actionneurs hydrodynamiques.

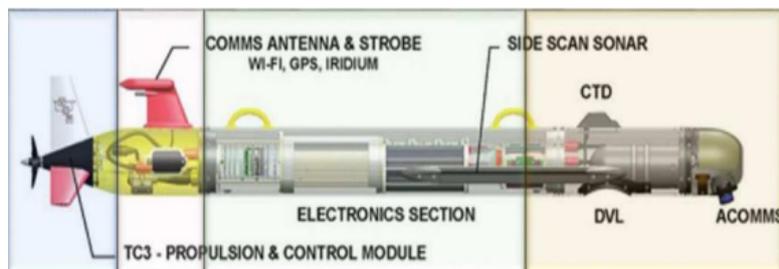


FIGURE 1.19 – Différentes parties d'un AUV

• Partie électronique

C'est le cœur du robot qui est composé de deux niveaux. Le premier niveau contient la batterie principale, tandis que le second englobe toutes les cartes électroniques intégrées, telles que les interfaces entre la partie commande et la partie puissance, la carte de contrôle basée sur un microprocesseur ou un processeur, les cartes des capteurs, les cartes de contrôle des moteurs, les cartes de communication, les cartes d'entrées/sorties et les cartes de conversion analogique/numérique, ainsi que les dispositifs de sauvegarde des données tels que l'EEPROM, les cartes mémoire, les disques durs, etc. Cette section est bien entendu étanche.

• Partie communication

La communication avec les robots sous-marins lorsqu'ils sont en plongée est un défi technique majeur nécessitant des méthodes et des équipements spécifiques. La difficulté réside dans l'incapacité des fréquences d'ondes électromagnétiques conventionnelles à traverser des conducteurs électriques épais comme l'eau salée. La solution courante consiste à utiliser une antenne radio à la surface de l'eau et à adopter des méthodes de télécommunication classiques.

Les ondes radio à très basses fréquences (VLF), entre 3 et 30 kHz, peuvent pénétrer l'eau de mer sur une épaisseur d'une vingtaine de quelques mètres, permettant ainsi aux sous-marins en plongée peu profonde de communiquer en utilisant ces fréquences. En plongée plus profonde, les robots sous-marins peuvent utiliser une bouée équipée d'une antenne exploitée sous la surface de l'eau. Une fois à la surface, les sous-marins peuvent recourir aux communications hertziennes traditionnelles, voire aux communications par satellite pour éviter de perdre leur position.

• Partie des capteurs

L'AUV est doté de capteurs de navigation performants, adaptés aux exigences spécifiques de chaque mission. Il est courant de trouver le compartiment des capteurs situé à l'avant de l'AUV afin de permettre une détection précise des moindres détails. Nous donnons par la suite un aperçu sur les capteurs les plus importants utilisés par les AUV :

- **Un accéléromètre** : qui est un capteur mesurant l'accélération linéaire d'un objet ou d'un mobile. Bien qu'il soit souvent désigné sous le nom d'accéléromètre, il se compose en réalité de trois capteurs distincts qui calculent les accélérations selon les trois axes orthogonaux.
- **Un gyromètre** : qui est un instrument utilisé pour mesurer la vitesse angulaire. Il est principalement employé dans divers domaines tels que l'aviation, la navigation maritime et sous-marine afin de déterminer la vitesse et la position de l'objet ou du véhicule.
- **Un magnétomètre** : qui est un dispositif mesurant l'intensité ou la direction d'un champ magnétique, ou encore l'aimantation d'un échantillon. Il contient un capteur sensible au champ magnétique et il est souvent utilisé dans des études géologiques pour détecter des anomalies magnétiques ou des objets contenant du fer. Ces appareils ont également des applications militaires, comme la détection de sous-marins.
- **Un loch-Doppler** : est un appareil utilisé pour mesurer la vitesse d'un AUV par rapport à l'eau. Il utilise le principe du décalage Doppler pour calculer la vitesse en mesurant la différence de fréquence entre les signaux acoustiques émis et reçus par l'AUV. Cette méthode offre une mesure précise de la vitesse du sous-marin par rapport à l'eau, indépendamment des courants marins ou des vents.
- **Une CTD** : est l'acronyme de "Conductivity, Temperature, Depth". Il s'agit d'un instrument utilisé en océanographie pour mesurer plusieurs paramètres physiques de l'eau de mer simultanément à savoir : la conductivité, la température et la profondeur de l'eau.
- **Un sonar** : abréviation de "sound navigation and ranging", Un sonar est un dispositif utilisé pour repérer des objets sous-marins en émettant des signaux sonores dans l'eau et en analysant les échos renvoyés. Il fonctionne selon le principe de l'écholocalisation, permettant de déterminer la distance, la direction et la taille des objets en se basant sur le temps nécessaire aux signaux pour voyager et revenir. Les AUV sont équipés de trois types de sonars : un orienté vers l'avant, un incliné à 45° vers le bas, et un dernier dirigé directement vers le bas, utilisés pour le suivi du fond marin et l'évitement des obstacles.
- **Un capteur photographique** : qui est un composant électronique sensible à la lumière, capable de convertir divers types de rayonnements électromagnétiques en un signal électrique analogique. Ce signal est ensuite amplifié, numérisé et traité pour produire une image numérique.

• **Partie des actionneurs hydrodynamiques**

Un actionneur hydrodynamique est un procédé physique commandable qui permet d'agir sur l'état cinématique du véhicule. Nous présenterons de manière simplifiée les différents types d'actionneurs hydrodynamiques, que nous pouvons regrouper en deux classes :

- **Les gouvernails ou surfaces mobiles** : Ils sont des éléments essentiels pour contrôler la profondeur et la direction du véhicule. Les gouvernails de profondeur, situés à l'arrière, ajustent l'angle d'avancement de l'AUV pour contrôler sa profondeur, tandis que les gouvernails de direction permettent de modifier la trajectoire en ajustant l'angle de virage. Ces gouvernails sont contrôlés par un logiciel de pilotage intégré à l'AUV, garantissant une navigation précise et autonome lors des missions sous-marines (Figure 1.20) [17].



FIGURE 1.20 – Gouvernails ou Surfaces mobiles de l’AUV [17]

- **Les propulseurs** : Il existe deux types des propulseurs, à savoir :

Les propulseurs à hélice : qui utilisent des pales fixes sur un arbre en rotation. Ils sont mobiles et très utilisés pour le déplacement des AUV (voir Figure 1.21(a)) [18].

Les propulseurs à aile battante, qui sont des systèmes dont le principe de fonctionnement est s’inspiré du mouvement utilisé par les poissons, où une aile subit un mouvement oscillant combiné de translation et de rotation. La Figure 1.21(b) illustre cette conception [19].



(a)



(b)

FIGURE 1.21 – Propulseurs d’un AUV, (a) à hélice, (b) à aile battante [18],[19]

1.4.4 Classification des AUVs selon la profondeur

Les caractéristiques (la structure et les dimensions) des véhicules sous-marins autonomes changent dès qu’ils atteignent quelques mètres de profondeur. Cette profondeur marque la distinction entre les véhicules grands fonds et les véhicules côtiers.

• AUVs grands fonds

Ces robots, conçus pour explorer les profondeurs marines, ont généralement une grande autonomie énergétique ainsi qu’un poids et des dimensions importants, ce qui exige une logistique conséquente. Par exemple, l’AUV ASTERX mesure 4,5 mètres de long, 0,95 mètre de diamètre, pèse 993 kg, peut

atteindre une profondeur de 3000 mètres et il peut naviguer à une vitesse de 5 nœuds et il a une autonomie de 11 heures (Figure 1.22) [20].

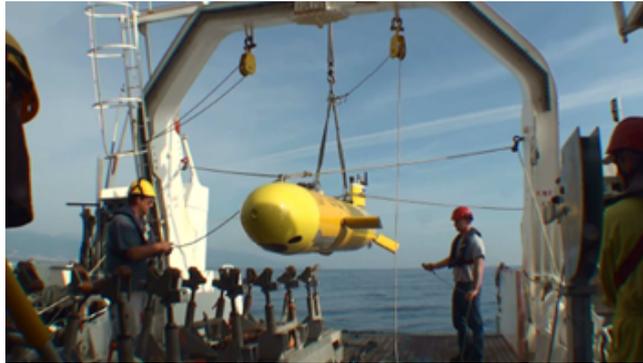


FIGURE 1.22 – Sous-marin AUV grands fonds, (ASTERX) [20]

• AUVs côtiers

Ces véhicules sont conçus pour réduire leur taille et la logistique nécessaire à leur fonctionnement, permettant à une seule personne de les mettre à l'eau. Ils sont modulaires en termes de capteurs et entièrement autonomes, capables de déterminer leur position absolue et de naviguer vers un objectif désiré. Ils sont essentiels pour les missions en eaux peu profondes. Par exemple, l'AUV "ECOMAPPER" mesure 1,52 m de long, 0,14 m de diamètre, pèse 27,2 kg, atteint une profondeur de 200 m et il se déplace à 4 nœuds et a une autonomie de 8 heures (Figure 1.23, (a)) [21].

Un autre type d'AUV se distingue, c'est les "Mini-AUVs". Ces engins de petite taille (longueur : 0,15 m, diamètre : 0,02 m, poids : 0,3 kg, profondeur : 50 m, vitesse : 3 nœuds, autonomie : 2 h) sont capables d'entrer et de naviguer dans des endroits hostiles (inaccessibles à l'homme), comme les grottes sous-marines (Figure 1.23, (b)) [22].



(a)



(b)

FIGURE 1.23 – AUVs côtiers, (a) : AUV "ECOMAPPER", (b) : Mini AUV "NanoSooker" [21],[22]

1.4.5 Classification des AUVs selon la forme

Les AUVs peuvent être classés en trois groupes selon leurs formes [10].

• Forme cylindrique

Ces robots sont équipés d'un unique propulseur arrière, d'un gouvernail, et de deux paires de barres de plongée horizontales situées soit à l'arrière, soit à l'arrière et à l'avant (Figure 1.24, (a)) [10].

• **Forme parallélépipédique**

Ces engins disposent de deux propulseurs à l'arrière et de deux paires de gouvernail situées à l'avant et à l'arrière pour contrôler la plongée (Figure 1.24, (b)). Pour les changements de position dans le plan horizontal, deux configurations sont possibles [10] :

- Deux propulseurs latéraux, l'un à l'avant et l'autre à l'arrière.
- Une ou deux paires de gouvernail.

• **Forme ellipsoïdale**

Ces engins sont équipés d'un propulseur arrière et de quatre gouvernails à l'arrière : deux pour le contrôle de la plongée et deux pour le changement de position dans le plan horizontal (Figure 1.24, (c)) [10].

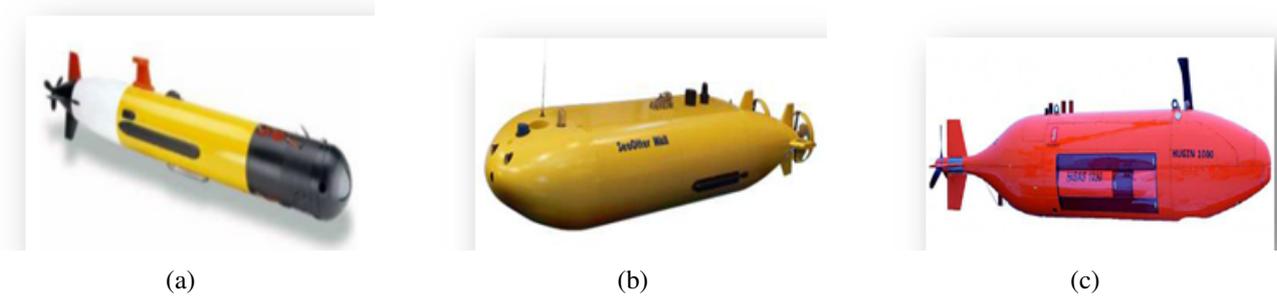


FIGURE 1.24 – (a) : AUV cylindrique, (b) : AUV parallélépipédique, (c) : AUV ellipsoïdale. [10]

1.4.6 Applications des AUVs

Les robots sous-marins sont devenus essentiels pour l'homme lorsqu'il doit intervenir dans des environnements dangereux. Les applications de ces AUVs sont extrêmement variées. Elles se concentrent principalement sur deux secteurs : civil et militaire.

• **Secteur civil**

Les robots sous-marins trouvent notamment trois applications : l'environnement, les sciences et l'industrie.

-L'environnement

Les lois sur les restrictions de pêche et la protection de l'environnement maritime nécessitent l'utilisation de robots sous-marins pour détecter, identifier, poursuivre et interdire les bateaux suspects. Ces robots peuvent aussi identifier les pollutions intentionnelles, comme les dégazages, en analysant les polluants et en comparant les résidus chimiques des cuves des navires attachés. De plus, ils peuvent prélever des échantillons de glace à différentes profondeurs pour étudier l'historique du climat, nécessitant un positionnement précis et la capacité de rester stationnaire malgré les perturbations.

-Les sciences

Les archéologues utilisent des engins sous-marins pour explorer les débris et les trésors cachés sous les océans. Là où l'autonomie et la profondeur des plongeurs sont limitées, les robots sous-marins franchissent les frontières de la recherche humaine en améliorant les possibilités d'exploration. La connaissance du débit et de la salinité des sources sous-marines, ainsi que de leurs variations dans le

temps, est cruciale. Cela permet aux hydrologues d'estimer la quantité d'eau dans la mer et d'évaluer si cette eau peut être utilisée.

-L'industrie

L'industrie pétrolière et gazière utilise les AUVs pour réaliser des cartographies détaillées du fond marin avant d'installer des infrastructures sous-marines telles que les pipelines. Cette approche permet une installation rentable de l'environnement. Les AUV offrent une précision supérieure dans des zones où les méthodes conventionnelles sont limitées. De plus, ils permettent l'inspection post-installation des pipelines, ce qui renforce leur utilité croissante dans ce domaine ainsi que dans l'exploration des fonds marins et l'extraction de roches nodules polymétalliques [23].

• Secteur militaire

L'une des applications militaires les plus utilisées concerne la détection et la destruction des mines sous-marines. La neutralisation de ces objets est une tâche dangereuse et spécifique, où des engins robotisés peuvent remplacer les humains pour localiser et désamorcer ces bombes. Une autre activité en pleine expansion est la surveillance des ports. Pour prévenir l'intrusion de plongeurs ou de véhicules sous-marins ennemis dans les ports, des robots autonomes peuvent effectuer un quadrillage dans une zone proche de l'entrée du port. En général, les applications militaires se concentrent sur les tâches suivantes :

- Réalisation de cartographies détaillées sur les espionnages.
- Localisation et identification des mines sous-marines.
- Détection et reconnaissance des navires et des sous-marins.
- Sécurisation des ports militaires et des zones portuaires.
- Surveillance sonar passive (analyse des bruits émis par chaque cible).
- Surveillance sonar active (analyse des coefficients de réflexion sonore de chaque cible).
- Inspection des coques de navires et des sous-marins habités.

1.4.7 Techniques de commandes des AUV

Le robot AUV peut être représenté par un modèle non linéaire, sous-actionné, fortement couplés et soumis à des contraintes du système ainsi que des perturbations externes tels que les courants marins et les vagues. Pour vaincre toutes ces perturbations, les commandes de ces AUV doivent être suffisamment robustes. Plusieurs techniques de contrôle ont été proposées, parmi lesquelles, on peut citer :

• Commandes linéaires

Les lois de commande linéaire sont simples à mettre en œuvre. Elles fonctionnent en exprimant la commande du système en fonction des erreurs des états que l'on souhaite réguler. A titre d'exemple, en 1994, Jalving a proposé des stratégies de commande PID pour l'AUV "NDRE" (Norwegian Defence Research Establishment). Le contrôleur linéaire est divisé en trois parties distinctes : une pour le contrôle du plan vertical, une pour le contrôle du plan horizontal, et une pour le contrôle de la vitesse le long de l'axe longitudinal du l'AUV. Les résultats expérimentaux obtenus sont satisfaisants [24]. En 2001, Prestero a élaboré un modèle dynamique non linéaire du l'AUV "REMUS" lors de ses travaux au sein du laboratoire (USA). À partir d'un modèle linéaire pour la plongée du véhicule, il a intégré un contrôleur PID à retour d'état afin de gérer la profondeur et le tangage du robot. Les simulations effectuées ont donné de bon résultat [25].

• Commande non linéaire

Les lois de commande non linéaire sont souvent complexes et nécessitent beaucoup de calculs. De plus, leur efficacité dépend directement du modèle de l'engin. Nous présentons quelques travaux, tels que : en 1995, Santos a appliqué une loi de commande LQG/LTR (Linéaire Quadratique Gaussienne / Loop Transfer Recovery) basée sur un observateur filtre de Kalman étendu pour la poursuite de plongé d'un AUV. Les résultats de simulations acquis sont satisfaisants [21]. En 2007, Lapierre et Soetanto ont proposé un contrôleur non linéaire dans le plan horizontal pour la poursuite de la référence d'un AUV. Cette commande est basée sur la théorie de Lyapunov et utilise une technique de guidage non-singulière [26]. Plus récemment, en 2018, Safaei, Ali et Mahyuddin ont appliqué une technique de commande adaptative sans modèle (OAMFC) à un modèle dynamique d'un véhicule sous-marin autonome [27].

• Commande par mode glissant SMC

La commande par mode glissant est largement utilisée pour contrôler les robots sous-marins car elle est robuste face aux perturbations. Mais son inconvénient major réside dans le phénomène de réticence qui est une commutation indésirable à très haute fréquence [28]. Nous citons les travaux suivants : en 1990, Cristi et al. ont soulevé le problème de ce contrôleur SMC pour l'AUV de la Naval Postgraduate School, en utilisant un modèle linéarisé dans le plan de plongée et en lui appliquant une commande SMC adaptative [29]. En 1996, Rodrigues et son équipe ont recommandé l'utilisation d'une commande en mode glissant de premier ordre pour l'AUV. Cette approche, appliquée à deux modèles linéaires simplifiés et découplés du robot, a été testée en simulation, donnant un comportement satisfaisant malgré des variations importantes des paramètres hydrodynamiques. [40]. En 2007, Jean-Mathis Spiewak a contrôlé un AUV de type torpille par une commande SMC d'ordre un et deux. Ce contrôleur a été ensuite appliqué sur un système multi-AUV [28]. En 2009, Halil Akcakaya a modifié la fonction de saturation dans les régimes glissants d'ordre un pour atténuer l'effet de réticence [30]. En 2011, Marzbanrad, A.R a exploré les régimes glissants d'ordre un et les lois de commande par logique floue pour surmonter l'effet indésirable du broutement [31]. En 2014, Simon a comparé une commande classique basée sur le régulateur PID avec une commande robuste SMC de premier ordre pour un micro robot sous-marin autonome [32]. En 2015, Zool H a développé une technique de commande SMC de deuxième ordre pour un robot sous-marin sphérique, démontrant son efficacité face aux perturbations externes et aux incertitudes du modèle [33]. En 2022, González et García ont développé un contrôleur intelligent adapté aux missions coopératives avec communication limitée. Leur contrôleur a été testé avec succès sur un AUV, montrant une réduction significative de l'erreur par rapport à des méthodes conventionnelles comme le PID et le SMC, avec une convergence rapide vers les trajectoires de profondeur désirées. [34]

• Logique floue et réseaux de neurones

Actuellement, la logique floue et les réseaux de neurones attirent l'attention tant des chercheurs que des industriels.

La logique floue offre la possibilité de généraliser les modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans divers domaines et de développer des systèmes artificiels capables d'accomplir des tâches réalisées par des humains. Tandis que, l'utilisation d'un réseau de neurones pour contrôler un engin sous-marin revient à faire l'apprentissage du réseau avec des données historiques pour prédire la sortie désirée en fonction des entrées fournies.

En 2013, Anirban et ses collègues ont comparé une commande conventionnelle basée sur le régulateur PID à une commande floue pour la régulation d'un robot sous-marin autonome. Ils ont utilisé un modèle linéaire du robot pour contrôler sa profondeur. Les simulations ont révélé des différences

significatives dans la convergence vers les états désirés entre les deux approches de commande proposées. [35]. Dans la même année, L. Kailei et al. ont proposé dans leurs travaux un contrôleur neural flou (NFLC) adapté automatiquement par des Algorithmes Génétiques (GA) pour commander un AUV dans le plan horizontal [36].

1.5 Développement des systèmes multi-AUV

Avec la complexité croissante des missions, il devient presque impossible pour un AUV unique de réussir seul sa tâche. Ainsi, les avancées des systèmes multi-agents ont conduit au développement de systèmes de véhicules sous-marins autonomes multiples appelés système multi-AUV, attirant l'attention des communautés de contrôle et d'ingénierie océanique. Utiliser un groupe d'AUV permet de gérer efficacement de nombreuses difficultés et offre des avantages tels que flexibilité, facilité d'extension et de maintenance, et meilleure robustesse face aux perturbations et défaillances. Dans la suite de ce chapitre, nous allons développer ce type de système multi-AUV qui représente le cœur de notre travail.

Les systèmes multi-AUV sont des robots sous-marins capables de fonctionner de manière autonome ou semi-autonome et qui travaillent en équipe pour accomplir des missions sous-marines complexes. Les multi-AUV travaillent ensemble pour atteindre des objectifs communs, partager des informations, coordonner leurs mouvements et exécuter des tâches de manière synchronisée, contrairement aux AUV individuelles.

1.5.1 Un peu d'histoire sur les systèmes multi-AUV

Les systèmes multi-AUV ont été envisagés dans les années 1980, mais ils ont échoué en raison du manque d'études techniques fondamentales. Cependant, au cours des trente dernières années, les chercheurs ont progressivement réalisé leur potentiel. Les études sur N véhicules sous-marins ont débuté avec le Réseau Autonome d'Échantillonnage Océanique (Autonomous Ocean Sampling Network "AOSN") soutenu par la Marine américaine en 1993 [37]. Comparés aux véhicules individuels, les N véhicules offrent une meilleure résolution spatiale et une efficacité de travail accrue, ce qui les rend adaptés à des tâches telles que la surveillance océanique et la lutte contre les mines.



FIGURE 1.25 – Image de système multi-AUV (AOSN-II) [37]

D'autres projets de systèmes multi-AUV ont été développés par la suite tels que :

-Projet "OOI" (ocean observatories initiative) initiative des Observatoires Océaniques est un ensemble de plateformes et d'instruments mesurant diverses propriétés de l'océan, du fond marin à la surface (voir Figure 1.26). Ce projet fournit des données pour étudier la dynamique côtière, le climat, la santé des écosystèmes, le cycle du carbone et les interactions entre le volcanisme sous-marin et la vie. L'infrastructure cybernétique de l'OOI gère plus de 250 téraoctets de données, accessibles gratuitement à tous, transformant ainsi la recherche océanique et permettant des études à différentes échelles temporelles et spatiales [38].

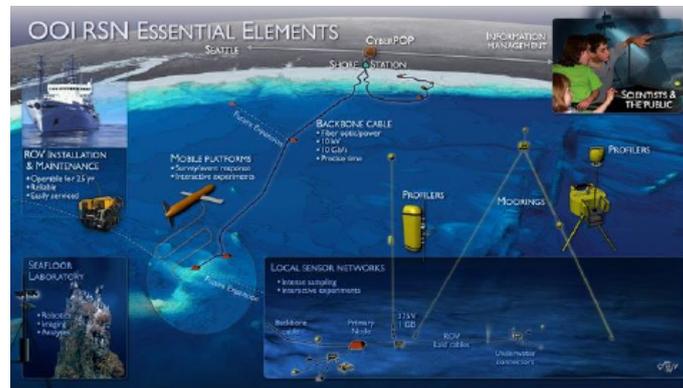


FIGURE 1.26 – Système multi-AUV (OOI) [38]

-Projet "GOATS" (Generic Oceanographic Array Technology Systems) Système technologique générique de réseau océanographique, est un projet de recherche qui concerne le développement de la technologie AOSN adaptative à l'environnement, spécifiquement destinée à l'évaluation rapide de l'environnement et aux mesures de lutte contre les mines dans les environnements côtiers. Ce projet combine la théorie et la modélisation de l'acoustique environnementale en 3D avec des expériences impliquant la technologie AOSN et les capteurs. [39].

- Projet "GREX" (Green Marine Resources Extraction) est un projet de recherche (2006-2009) qui consiste à développer des technologies pour l'extraction de minéraux et de métaux précieux dans les fonds marins, telles que les nodules polymétalliques riches en métaux précieux comme le cobalt, le nickel et le cuivre. L'objectif est de permettre une exploitation économique de ces ressources tout en minimisant les impacts environnementaux [40].

- Projet "ARENA" Réseau de surveillance terrestre en temps réel avancé dans la région (Voir Figure 1-27), qui vise à effectuer des observations continues et à long terme en installant des capteurs bidimensionnels sur le fond marin via un réseau de câbles. Ce projet fournira une plateforme polyvalente pour des domaines tels que l'océanographie, la géophysique, la sismologie et la biologie marine, générant ainsi de nouvelles connaissances et avançant la science [41].

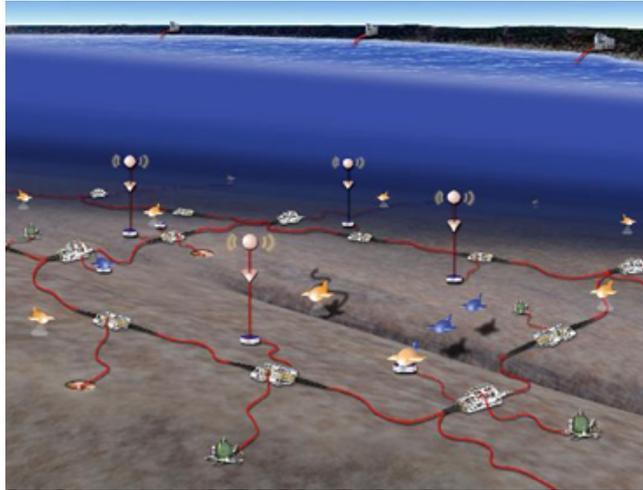


FIGURE 1.27 – Image de projet système multi-AUV (ARENA) [41]

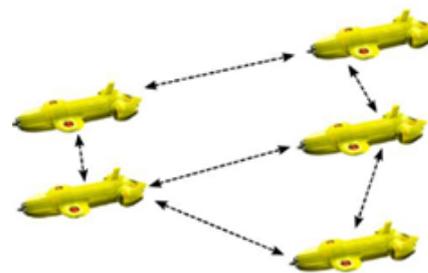
1.5.2 Coordination des systèmes multi-AUV

Au cours des dernières années, l'intérêt des chercheurs pour la coordination des systèmes multi-AUV a augmenté de façon significative. Les unités AUV doivent constituer un modèle de formation et coopérer les unes avec les autres par des méthodes de contrôle correspondantes. Ces modèles de formation ont principalement deux structures : une structure homogène et une structure hétérogène.

- Dans les systèmes à structure hétérogène, les types d'unités AUV sont différents, comme illustré par (Figure 1.27, (a)), et ils sont principalement utilisés dans la navigation coopérative, la numérisation du fond marin et la cartographie.
- Dans les systèmes à structure homogène, les unités AUV sont de même type et partagent les mêmes algorithmes (voir Figure 1.28, (b)). Ce type de système est principalement utilisé pour la surveillance océanique et la collecte d'échantillons biologiques marins, etc.



(a)



(b)

FIGURE 1.28 – Système multi-AUV, (a) : Structure hétérogène, (b) : Structure homogène

Afin d'accomplir des tâches dans des environnements spécifiques, tels que des environnements avec des obstacles, des espaces restreints, des courants ou une communication limitée. Deux principaux types de schémas sont évoqués : les schémas circulaires et les schémas en chaîne (Voir Figure 1.29). Les schémas circulaires incluent des motifs tels que le cercle et l'ellipse, utilisés, par exemple, pour collecter des échantillons océaniques ou capturer des objets cibles [42]. Les schémas en chaîne

comprennent des motifs comme la ligne, le triangle et le polygone, avec des systèmes multi-AUV capables d'évaluer et de sélectionner automatiquement des formations appropriées en fonction de la situation [43]. Ces schémas sont utilisés dans diverses applications, notamment dans l'exploration en eaux profondes et dans les systèmes multi-robots aériens.

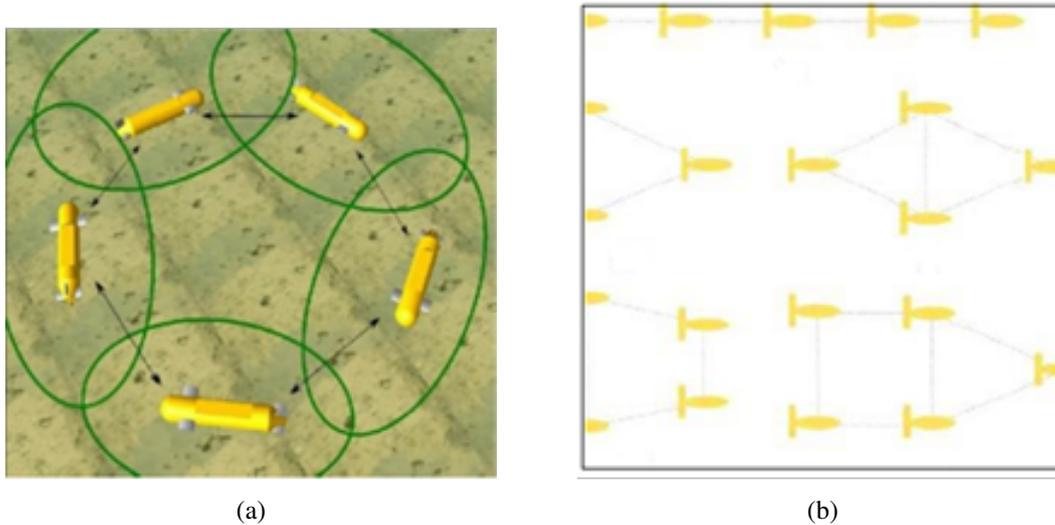


FIGURE 1.29 – Coordination des systèmes multi-AUV, (a) : schémas circulaires, (b) schémas en chaîne

Dans ce mémoire, nous nous sommes notamment intéressés par la structure homogène d'un système multi-AUV avec un schéma en chaîne.

1.5.3 Protocole de contrôle de formation des systèmes multi-AUV

Le protocole de contrôle de formation est important pour coordonner efficacement les mouvements des véhicules sous-marins autonomes. Il existe deux formes de stratégies de coordination multi-AUV : la coordination centralisée et la coordination décentralisée. Contrairement à la coordination centralisée qui implique une planification rassemblée des actions pour chaque AUV, la coordination décentralisée permet à chaque AUV de prendre ses propres décisions en fonction de ses informations locales.

Le contrôle de formation décentralisé des systèmes multi-AUV peut être classé en quatre méthodes :

- **Méthodes basées sur le comportement [44],[45]**

Dans cette méthode, la tâche de formation est divisée en une série de comportements de base des robots incluant : la réunion, l'évitement d'obstacles, l'évitement de collisions. Chaque robot détermine son prochain comportement en détectant l'environnement et les informations des autres AUV, telles que le changement de vitesse, de direction, etc.

- **Méthodes de structure virtuelle [46],[47]**

L'idée de cette méthode est de concevoir une structure idéale comme référence, appelée structure virtuelle (VS). Cette méthode contrôlera cette VS pour se déplacer selon une référence désirée, tandis que les robots ajusteront leur vitesse pour tendre vers les positions dans la VS.

• Méthodes de champ de potentiels artificiels [48],[49]

Cette méthode a été proposée par Khatib [50] dont l'idée de base est que les mouvements des robots sont similaires au champ électrique généré par des charges positives et négatives, les destinations des AUV sont considérées comme des charges d'attraction mutuelle, tandis que les obstacles des AUV sont aperçus comme des charges de répulsion mutuelle. Cette méthode est principalement utilisée dans des scènes en 2D.

• Méthodes Leader-Suiveur [51],[52],[53]

La structure leader-suiveur est largement utilisée pour contrôler la formation de systèmes à plusieurs agents en raison de sa simplicité (Figure 1.30). Dans cette Figure, un AUV est considéré comme un leader tandis que les autres sont des suiveurs. Le leader suit un signal de référence prédéfini et les suiveurs maintiennent une position et orientation désirées par rapport au leader. Cette approche est facile à mettre en œuvre et flexible. Il existe plusieurs recherches dans la littérature sur le contrôle de formation des AUV basé sur la structure leader-suiveur [52],[53].

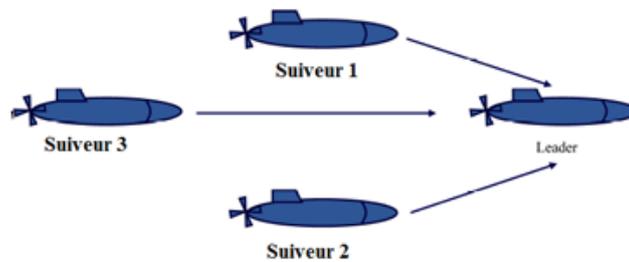


FIGURE 1.30 – Topologie typique de la structure leader-suiveur

- **L'AUV leader** est un véhicule sous-marin autonome qui joue le rôle de chef ou de guide au sein d'un groupe d'autres AUV autonomes. Sa principale fonction est de planifier et d'exécuter des missions sous-marines complexes impliquant plusieurs véhicules autonomes. Équipé de capteurs sophistiqués, d'algorithmes de planification de trajectoire et de systèmes de communication robustes, l'AUV leader dirige efficacement les autres véhicules pour atteindre les objectifs de la mission de manière coordonnée. Il prend des décisions de manière autonome, ajuste les trajectoires des autres véhicules et surveille leur progression tout en maintenant la cohésion et l'efficacité du groupe.
- **L'AUV suiveur** est spécialement conçu pour suivre et surveiller un autre objet ou véhicule sous-marin. Équipé de capteurs sophistiqués tels que des sonars, des caméras, des capteurs d'évitement d'obstacles et des systèmes de navigation avancés, l'AUV peut détecter et maintenir une distance spécifique par rapport à sa cible tout en rassemblant des données sur son mouvement et son environnement.

Comme les systèmes multi-AUV est un ensemble des AUV, les techniques de commandes appliquées à un seul AUV, citées précédemment, peuvent être appliquées à chaque robot d'un système multi-AUV.

Dans notre travail, le contrôle de la formation du basé sur la structure leader suiveurs et une commande proportionnelle ou floue va être appliquée sur le système multi-AUV envisagé.

1.5.4 Technologie des systèmes multi-AUV

Les technologies des systèmes multi-AUV comprennent la navigation, la planification de trajectoire, le contrôle de coordination et la communication acoustique, etc.

• Navigation du système multi-AUV

Actuellement, la communication entre les unités AUV est basée principalement sur le sonar. Ces systèmes utilisent différents techniques de navigation selon leur structure. Dans les systèmes homogènes, chaque AUV est équipé de dispositifs de navigation de haute précision, tandis que dans les systèmes leader-suiveur, le leader utilise des dispositifs de haute qualité, tandis que les suiveurs ont des dispositifs moins précis.

• Planification de trajectoire du système multi-AUV

La planification de trajectoire est une étape cruciale dans les systèmes multi-AUV, permettant à chaque véhicule de sélectionner sa consigne afin d'atteindre une position désire dans un espace de travail, même dans un environnement inconnu. Ce processus doit tenir compte de la détection de l'environnement et de la navigation sans ou avec collision avec l'évitement d'obstacle. Dans les environnements connus, les algorithmes heuristiques sont couramment utilisés, tandis que dans les environnements inconnus, des méthodes, telles que le filtre de Kalman, le filtre H distribué, et le filtre de consensus distribué sont utilisées pour percevoir l'environnement et établir un modèle correspondant.

• Contrôle coordonné du système multi-AUV

Le contrôle coordonné du système multi-AUV vise à connecter efficacement toutes les unités du système pour former une seule structure (formation de motif). Ces AUV doivent ainsi coordonner entre eux pour partager des informations en temps réel. La méthode de contrôle coordonné a l'avantage de partager les tâches, résoudre les problèmes de ressources et améliorer l'efficacité du travail ensemble.

• Communication du système multi-AUV

Dans les systèmes multi-AUV, la communication acoustique reste prédominante, mais la communication optique est également utilisée. Cependant, le développement de ces systèmes est limité par le coût et la fiabilité. Pour être compétitifs, les coûts doivent être réduits, notamment en diminuant la taille des unités AUV et en utilisant des capteurs de navigation moins précis. Malgré ces défis, l'avancement de la technologie micro-AUV offre des opportunités de réduction des coûts. De plus, la fiabilité des systèmes s'améliore avec l'expérience croissante dans les tâches sous-marines. La Figure (1.31) présente un exemple de communication dans un système multi-AUV.

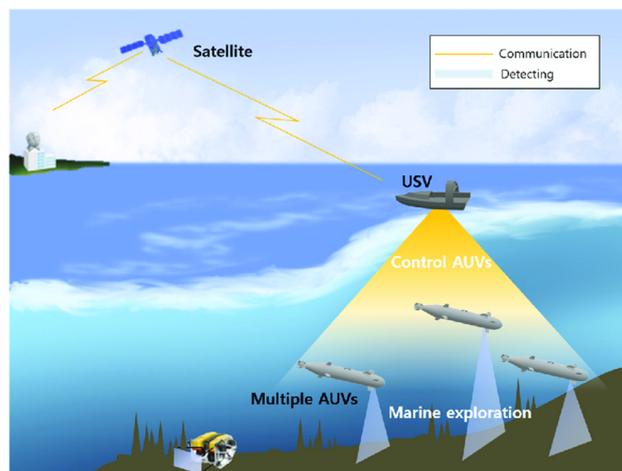


FIGURE 1.31 – Exemple de communication entre dans un système multi-AUV

1.6 Conclusion

Tout d'abord, nous avons arboré dans ce chapitre, les robots sous-marins en exposant leur état de l'art ainsi que leur classification. Nous avons développé ensuite les robots sous-marins autonomes en présentant une revue bibliographique afin de donner un aperçu compréhensif sur les investigations existants dans la littérature concernant les AUV, leur catégorie, leurs domaines d'applications et les techniques de commandé dédiées à ces robots. Enfin, nous avons entamé les systèmes multi-AUV qui font l'objet de ce mémoire. Dans le chapitre suivant nous allons attribuer un modèle cinématique et dynamique aux AUV afin que nous pouvons contrôler leur mouvement par la suite.

Chapitre 2

Modélisation des véhicules sous-marins

2.1 Introduction

La modélisation du robot sous-marin autonome est une étape primordiale permettant d'attribuer un modèle cinématique et dynamique à cet engin afin que nous puissions contrôler ses mouvements par la suite.

Dans notre travail nous avons opté pour un système multi-AUV à structure homogène et un schéma en chaîne afin de réaliser une mission prédéfinie. Ce système est constitué de trois AUV identiques dont un est un leader et les deux autres sont des suiveurs. Ces AUV ont donc le même modèle cinématique et dynamique que nous allons déterminer après avoir analysé le comportement du robot sous-marin dans l'espace de 6 degrés de liberté.

2.2 Préliminaire et notations

La modélisation de l'AUV sera décrite en deux parties : la modélisation cinématique, qui traite des aspects géométriques du mouvement, et le modèle dynamique analysant les effets des forces et des moments qui créent le mouvement.

La Figure 2.1 représente l'AUV que nous allons modéliser et Tableau 2.1 résume la notation utilisée pour décrire l'attitude (position et orientation) de l'engin issue de la norme établie par Fossen [54].

TABLEAU 2.1 – Notations standards de l'AUV à six degrés de liberté.[54]

DDL	Mouvement de translation et rotation	Forces et Moments	Vitesse linéaire et angulaire	Position et angles d'Euler
1	Mouvement dans la direction x	X	u	x
2	Mouvement dans la direction y	Y	v	y
3	Mouvement dans la direction z	Z	w	z
4	Rotation autour de l'axe x (roulis)	K	p	ϕ
5	Rotation autour de l'axe y (tangage)	M	q	θ
6	Rotation autour de l'axe z (Lacet)	N	r	ψ

Dans le Tableau 2.1, les trois premières coordonnées ainsi que leurs dérivées temporelles représentent les positions et les mouvements de translation de l'AUV suivant les axes x, y et z, alors que les trois dernières coordonnées indiquent les angles d'orientation ainsi que les mouvements de rotation angulaire.

2.3 Hypothèses et repères associés

Le modèle de l'AUV est nonlinéaire, fortement couplé en mouvement et très sensible aux incertitudes hydrodynamiques. Pour cela, nous supposons quelques hypothèses afin de simplifier le modèle dynamique de l'AUV. Il s'agit particulièrement de :

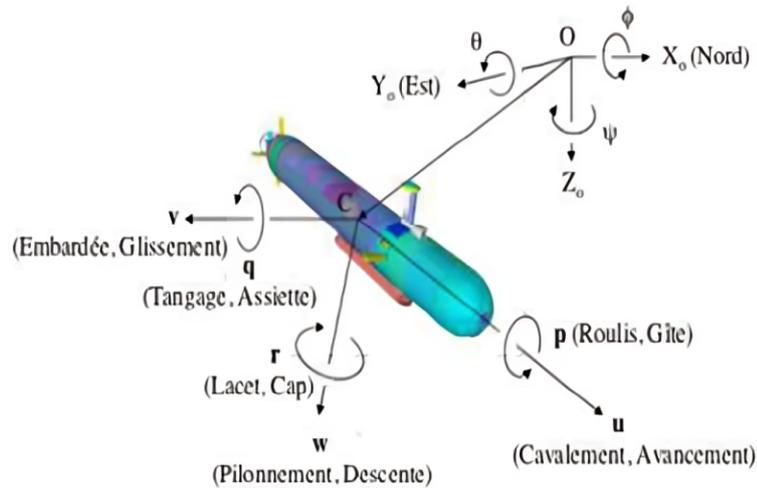


FIGURE 2.1 – Présentation de l'AUV selon les repères : fixe et inertiel [54]

- L' AUV est un corps rigide qui est entièrement plongé dans l'eau.
- L'eau est supposée être un fluide idéal, incompressible et non visqueux (sans friction).
- L'AUV se déplace lentement pour accomplir ses missions (la rapidité de l'AUV n'est pas exigée).
- Les perturbations dues aux vagues et courants marins sont négligés.
- Le repère fixé à la terre est inertiel.

• Référentiels

Afin de faciliter l'analyse des mouvements de l'AUV, deux systèmes de coordonnées sont définis : le repère absolu R_0 , et le repère du robot R_v [34],[55]

On définit d'abord le repère absolu $R_0 = (0, x_0, y_0, z_0)$ représenté dans la Figure 2.1 avec :

- x_0 : Axe longitudinal confondu avec le Nord géographique,
- y_0 : Axe transversal orienté vers l'Est,
- z_0 : Axe normal dirigé vers le bas (fond sous-marin).

La caractéristique fondamentale de ce référentiel est qu'il est fixe par rapport à la terre, ce qui lui accorde les propriétés d'un référentiel galiléen ou inertiel. L'effet de la rotation du globe est considéré comme négligeable au niveau du robot et de son environnement.

Le deuxième repère c'est le repère du robot $R_v = (c, x_v, y_v, z_v)$ qui permet d'exprimer les vitesses de l'engin, avec :

- x_v : Axe longitudinal orienté de l'arrière vers l'avant de l'engin
- y_v : Axe transversal orienté vers tribord
- z_v : Axe normal dirigé vers le bas

• Dénomination des variables

On définit dans le repère absolu la position du véhicule $n = [n_1, n_2]^T$ avec :

$n_1 = [x, y, z]^T$: Les trois composantes de position.

$n_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$: Les trois composantes d'orientation.

Où ϕ , θ et ψ représentent respectivement les angles de Roulis, de Tangage et de Lacet.

Dans le repère du véhicule, on définit le vecteur vitesse $V = [v_1, v_2]^T$ avec :

$v_1 = [u, v, w]^T$: vitesses linéaires.

$v_2 = [p, q, r]^T$: vitesses angulaires.

Où u , v et w représentent respectivement les vitesses linéaires d'avancement, de glissement et de descente.

Et v_2 est défini par les vitesses angulaires suivantes :

$p = \dot{\phi}$: Vitesse de Roulis

$q = \dot{\theta}$: Vitesse de Tangage

$r = \dot{\psi}$: Vitesse de Lacet

Nous définissons aussi le vecteur des forces et des moments $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ appliqués au robot, avec :

$\tau_1 = [X, Y, Z]^T$: Vecteur des forces (couples).

$\tau_2 = [K, M, N]^T$: Vecteur des moments

2.4 Modélisation cinématique de l'AUV

La modélisation cinématique d'un engin sous-marin permettant de déterminer la trajectoire qu'il doit suivre en fonction de sa configuration initiale ainsi que de ses vitesses de translation et de rotation. Pour cela, nous utilisons les "angles d'Euler" qui correspondent au système de référence en robotique (Roulis, Tangage et Lacet).

L'orientation est décrite par le vecteur $n_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$.

Les angles sont définis comme suit : les référentiels $R_0 = (x_0, y_0, z_0)$ et $R_v = (x_v, y_v, z_v)$ étant initialement confondus, on passe de R_0 à R_v par trois rotations successives :

- Rotation ψ autour de o_{z_3} , angle de lacet (cap), Figure 2.2(a).
- Rotation θ autour de o_{y_2} , angle de tangage (assiette), Figure 2.2(b).
- Rotation ϕ autour de o_{x_1} , angle de roulis, Figure 2.2(c).

• Transformation des vitesses linéaires

La trajectoire de l'AUV dans le référentiel inertiel lié à la terre est donnée par la relation cinématique suivante [56] :

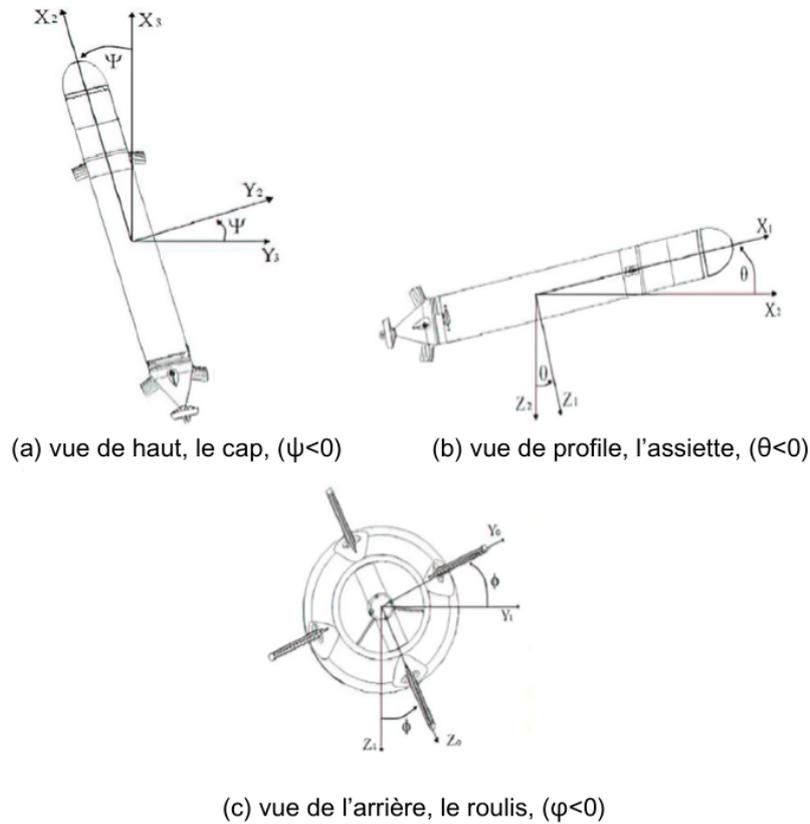


FIGURE 2.2 – Angles de rotation de l'AUV [56]

$$\dot{n}_1 = J_1(n_2)v_1 \quad (2.1)$$

$J_1(n_2)$ est la matrice de passage de R_0 à R_v , c'est une matrice de rotation orthogonale, de déterminant unité et ayant pour inverse sa transposée.

$$J_1(n_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \psi & \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \cos \psi - \sin \psi \cdot \cos \phi & \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \cos \psi + \sin \psi \cdot \sin \phi \\ \cos \theta \cdot \sin \psi & \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \sin \psi + \cos \phi \cdot \cos \psi & \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \sin \psi - \cos \psi \cdot \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \phi & \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

• Transformation des vitesses angulaires

Les vitesses angulaires dans les différents repères considérés sont liées par la relation [57] :

$$\dot{n}_2 = J_2(n_2)v_2 \quad (2.3)$$

où $J_2(n_2)$ est la matrice de passage de R_0 à R_v , c'est une matrice de rotation orthogonale, de déterminant unité et ayant pour inverse sa transposée.

$$J_2(n_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \theta \cdot \tan \theta & \cos \phi \cdot \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix}, \quad \theta \neq \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (2.4)$$

On obtient enfin la relation cinématique en regroupons les transformations (2.1) et (2.3) :

$$\dot{n} = J_{(n_2)} v = \begin{bmatrix} \dot{n}_1 \\ \dot{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(n_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(n_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cette représentation a une singularité pour l'angle de tangage $\theta = \pm 90^\circ$. Si le lecteur désire plus de détails concernant l'obtention des matrices de transformation $J_1(n_2)$ et $J_2(n_2)$ (3 rotations successives pour passer de R_0 à R_v), il pourra se référer à [58] ou encore à [59].

2.5 Modélisation dynamique de l'AUV

2.5.1 Expression du modèle dynamique

En se basant sur la deuxième loi de mouvement de Newton reliant la masse m de l'AUV, son accélération \dot{v} et la force τ_{RB} . La cinétique du corps rigide peut être exprimée sous forme matricielle suivante [56]

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (2.6)$$

Où :

- M_{RB} est la matrice d'inertie.
- C_{RB} est la matrice de forces de Coriolis et de forces centrifuges.
- $\tau_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ est le vecteur des forces et moments externes.
- $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ est le vecteur des vitesses linéaires et angulaires.

La matrice d'inertie M_{RB} est représentée comme suit [56] :

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & -I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{yy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zy} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Avec :

m est la masse du sous-marin.

(x_G, y_G, z_G) sont les coordonnées du robot par rapport au centre de gravité.

I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} sont les moments d'inertie autour de X_0 , Y_0 , Z_0 .

$$I_{xy} = I_{yx} , I_{xz} = I_{zx} , I_{yz} = I_{zy}$$

La matrice C_{RB} est représentée comme suit selon [56] :

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G \cdot q + z_G \cdot r) & -m(x_G \cdot q + w) & -m(x_G \cdot r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G \cdot q + w) & m(z_G \cdot r + x_G \cdot p) & -m(y_G \cdot r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G \cdot p + v) & -m(z_G \cdot q + u) & m(x_G \cdot p + y_G \cdot q) \\ m(y_G \cdot q + z_G \cdot r) & -m(x_G \cdot q - w) & -m(x_G \cdot r + v) & 0 & -I_{yx} \cdot q - I_{xz} \cdot p + I_{zz} \cdot r & I_{yz} \cdot r + I_{xy} \cdot p - I_{yy} \cdot q \\ -m(y_G \cdot p + w) & m(z_G \cdot r + x_G \cdot p) & -m(y_G \cdot r - u) & -I_{yz} \cdot q + I_{xz} \cdot p - I_{zz} \cdot r & 0 & -I_{xz} \cdot r - I_{xy} \cdot q + I_{xx} \cdot p \\ -m(z_G \cdot v) & -m(z_G \cdot q + u) & m(x_G \cdot p + y_G \cdot q) & -I_{yz} \cdot r - I_{xy} \cdot p + I_{yy} \cdot p & -I_{xz} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La majorité des véhicules sous-marins possèdent une symétrie horizontale, ce qui facilite les calculs numériques en se basant sur les relations suivantes [56] :

$$\begin{aligned} I_{xy} &= I_{yz} = 0 \\ y_G &= 0 \end{aligned}$$

τ_{RB} représente le vecteur des forces et des moments qui agissent sur le véhicule, et peut être décomposé de la manière suivante [56] :

$$\tau_{RB} = \tau_h + \tau_g + \tau_c + \tau_p \quad (2.9)$$

Où :

τ_h est la somme des forces et des moments hydrodynamiques .

τ_g est le vecteur des forces et moments dus à l'action de la gravité et de la flottabilité .

τ_c Corrigé est le vecteur des forces et moments générés par les actionneurs du véhicule.

τ_p est la somme des forces et des moments des perturbations extérieurs (courants marins, vague, . . .).

2.5.2 Forces et moments hydrodynamiques

Les efforts hydrodynamiques interviennent sur tout objet plongé en mouvement relatif dans un fluide visqueux, et peuvent être classés de la manière suivante [56] :

- Les forces et les moments engendrés par l'inertie et la masse de l'eau supplémentaire (τ_a).
- Les forces engendrées par les frottements visqueux du fluide sur le corps, qui correspondent aux efforts de portance et de traînée(τ_d).

$$\tau_h = \tau_a + \tau_d \quad (2.10)$$

• Inertie et la masse d'eau ajoutées

Selon les lois de la physique, tout objet en mouvement dans l'eau libre entraîne un déplacement d'une certaine quantité d'eau. Les forces dues à l'inertie et à la masse d'eau ajoutée peut être exprimées de la manière suivante [56] :

$$\tau_a = - (M_a \dot{v} + C_a(v)v) \quad (2.11)$$

Où

M_a est la matrice d'inertie d'eau ajoutée, définie positive, et elle est représentée par :

$$M_a = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

où $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$ sont respectivement les masses ajoutées dans les directions x, y, z due à la translation dans l'eau.

$K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}$ sont respectivement les inerties ajoutées autour des axes x, y, z due à la rotation dans l'eau.

Une caractéristique fondamentale de cette matrice est : $M_{ij} = M_{ji}$. De plus, il convient de noter que tous les coefficients de trainée, de poussée et de dérivé sont négatifs par convention. Si nous supposons que le robot possède deux plans de symétrie, un suivant (x,y) et l'autre suivant (x,z), nous obtenons ainsi [60],[61]

$$M_a = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

C_a : représente la matrice des forces de Coriolis et des forces centrifuges hydrodynamiques pour une catégorie de sous-marins conçus pour des déplacements à faible vitesse. Dans le cas où certains termes de couplage deviennent négligeables [57].

Cette matrice peut être exprimée de la manière suivante :

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w - Z_{\dot{q}}q & Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{r}}r \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{r}}r & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u + Z_{\dot{w}}u & Y_{\dot{r}}v & -Z_{\dot{q}}u & -K_{\dot{p}}p + N_{\dot{r}}p \\ 0 & X_{\dot{u}}u - Y_{\dot{v}}u & 0 & -Z_{\dot{q}}w & K_{\dot{p}}p - M_{\dot{q}}p & -Y_{\dot{r}}u \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

• Amortissement hydrodynamique

Lorsqu'un AUV se déplace dans l'eau, il doit affronter une résistance hydrodynamique qui est en réalité un amortissement et qui peut avoir diverses origines, tels que :

- Les oscillations forcées de l'AUV qui résultent une force de frottement ralentissant la vitesse de l'engin.
- Les éléments du fluide qui entrent en contact avec la surface mouillée de l'AUV peuvent induire une force de friction, connue sous le nom de frottement linéaire.
- Les vagues et des courants marins peuvent créer une force de résistance ajoutée.

Il est donc primordial de tenir compte de tous ces éléments lors de la modélisation de la dynamique du sous-marin.

L'ensemble des efforts dus aux amortissements peuvent être présentés de la manière suivante. [57] :

$$\tau_d = - (D_p(v) + D_t(v)) v \quad (2.15)$$

où :

$D_p(v)$ est la matrice de portance ou d'amortissement linéaire, définie négative et constante :

$$D_p(v) = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$D_t(v)$ est la matrice de traînée ou d'amortissement hydrodynamique quadratique, est définie négative

et non constante. Cette matrice est définie par :

$$D_t(v) = \begin{bmatrix} X_{uu}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{vv}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ww}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{pp}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{qq}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{rr}|r| \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.5.3 Gravité et Flottabilité

Le terme hydrostatique $g(n)$ est l'équilibre entre les forces gravitationnelles et la poussée d'Archimède, aussi connue sous le nom de force de rappel. La force gravitationnelle W agit à travers le centre de gravité (CG) du sous-marin, défini par ses coordonnées $r_G = [x_G, y_G, z_G]$. De manière similaire, la poussée d'Archimède B agit à travers le centre de flottabilité (CB) avec ses coordonnées $r_B = [x_B, y_B, z_B]$. Ces forces sont représentées dans les plans xz et yz sur la Figure 2.3. La stabilité du navire dépend essentiellement de la tenue de l'équilibre entre les deux forces W et B . Ces forces hydrostatiques dépendent des caractéristiques géométriques du navire, telles que son volume et la forme de sa coque, et elles sont influencées par la densité et la viscosité du fluide environnant.

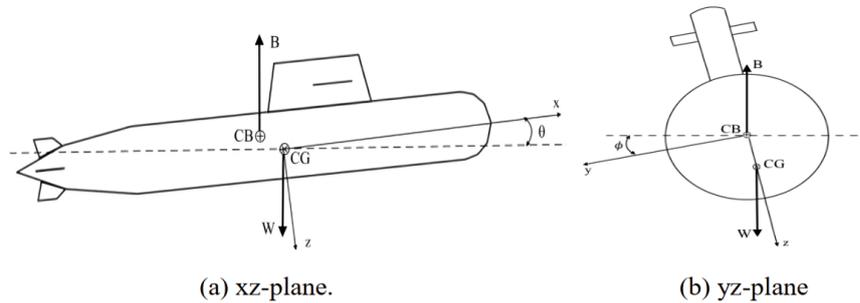


FIGURE 2.3 – Forces de Gravité et de Flottabilité appliquées à un sous-marin [57]

L'application de la méthode des angles d'Euler permet de résoudre les forces appliquées au sous-marin et il est possible donc d'identifier les forces et les moments de rappel dans les six degrés de liberté, comme donné dans la référence [54].

$$\tau_g = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(W - B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(y_G W - y_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) + (z_G W - z_B B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (z_G W - z_B B) \sin(\theta) + (x_G W - x_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(x_G W - x_B B) \cos(\theta) \sin(\phi) - (y_G W - y_B B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.5.4 Actionneurs hydrodynamiques

Les actionneurs hydrodynamiques ajustent leur orientation et leur vitesse afin de générer les mouvements désirés du sous-marin. Ainsi, la conception de ces actionneurs représente une étape cruciale afin de garantir la manœuvrabilité et les bonnes performances du véhicule sous-marin.

Comme nous avons mentionné dans le chapitre 1, les actionneurs hydrodynamiques de l'AUV peuvent être classés en deux catégories : les gouvernes de direction et de profondeur, ainsi que les propulseurs.

• Les gouvernes de direction et de profondeur

Assurent le contrôle de l'orientation et de la profondeur du sous-marin respectivement. Les gouvernes de direction sont généralement placées à l'arrière de l'engin produisant un couple noté τ_5 et permettant d'ajuster le cap du robot. Les gouvernes de profondeur, habituellement situées à l'avant et délivrant un couple noté τ_6 permettant de réguler la profondeur de plongée.

• Les propulseurs

Gènèrent la force de propulsion, noté τ_1 sont indispensable au déplacement du sous-marin dans l'eau. Ils sont placés habituellement à l'arrière de l'engin et peuvent être de divers types, tels que des hélices ou des jets d'eau.

Nous obtenons le vecteur des couples moteurs suivants :

$$\tau_c = [\tau_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \tau_5 \ \tau_6]^T \quad (2.19)$$

2.5.5 Modèle général de la dynamique

Le modèle dynamique d'un robot sous-marin autonome est donné par les équations suivantes [57] :

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_g + \tau_c \quad (2.20)$$

Avec :

M est la matrice d'inertie, symétrique et définie positive. Elle est égale à :

$$M = M_{RB} + M_a \quad (2.21)$$

$C(v)$ est la matrice de forces de Coriolis et d'eau ajouté, défini par :

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_a(v) \quad (2.22)$$

$D(v)$ est la matrice des coefficients d'amortissement. Elle est égale à :

$$D(v) = D_p(v) + D_t(v) \quad (2.23)$$

τ_g est le vecteur des forces et moments dus à l'action de la gravité et de la poussée d'Archimède. τ_c est le vecteur des forces et moments générés par les actionneurs du véhicule.

2.6 Modèle hydrodynamique adopté

La détermination des paramètres hydrodynamiques peut s'avérer complexe et nécessite souvent l'utilisation d'équations empiriques ou de tests en bassin de carène. Afin de simplifier le modèle, nous suggérons de considérer les hypothèses suivantes[57] :

- Tout d'abord, le véhicule AUV est considéré comme un corps rigide à flottabilité neutre avec une distribution de masse homogène.
- Ensuite, le mouvement de roulis est négligé, ce qui simplifie les calculs.
- La structure de forme du véhicule est également supposée être symétrique par rapport à trois plans de symétrie principaux.
- Enfin, nous négligeons les effets du vent, des vagues et des courants pour obtenir un modèle simplifié et plus facilement utilisable.

2.6.1 Modèle cinématique

En général, les équations de la cinématique simplifiée pour cinq (05) degrés de liberté (en excluant les mouvements de roulis) sont couramment décrites dans les références [62] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = u \cos \psi \cos \theta - v \sin \psi + w \cos \psi \sin \theta \\ \dot{y} = u \sin(\psi) \cos(\theta) + v \cos(\psi) + w \sin(\psi) \sin(\theta) \\ \dot{z} = -u \sin(\theta) + w \cos(\theta) \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\psi} = r / \cos(\theta) \end{array} \right. \quad (2.24)$$

2.6.2 Modèle dynamique

En ce qui concerne le modèle dynamique de l'AUV, si l'origine du repère du véhicule est le centre de gravité et que certains termes inertiels sont négligés, et sous l'hypothèse que la structure du véhicule est symétrique par rapport à trois plans de symétrie principaux, la matrice devient diagonale sous la forme suivante [57] :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Avec :

$$m_{11} = m + X_{\dot{u}}$$

$$m_{22} = m + Y_{\dot{v}}$$

$$m_{33} = m + Z_{\dot{w}}$$

$$m_{44} = -I_{xx} + K_{\dot{p}}$$

$$m_{55} = I_{yy} + M_{\dot{q}}$$

$$m_{66} = I_{zz} + N_{\dot{r}}$$

A partir des équations (2.8) et (2,14) nous pouvons calculer la matrice C(v).

En générales, et comme nous avons démontré précédemment que la matrice d'amortissement hydrodynamique D(v) est une matrice diagonale :

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{uu}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{vv}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{ww}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{pp}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{qq}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{rr}|r| \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

En supposant que notre véhicule est un corps rigide à flottabilité neutre avec une distribution de masse homogène, une représentation encore plus simple est obtenue où le centre de gravité et le centre de flottabilité sont situés sur l'axe z, c'est-à-dire $x_G = x_B$ et $y_G = y_B$. Donc la force hydrostatique τ_g devienne [57].

$$\tau_g = [0, 0, 0, 0, -(z_G \cdot W - z_B \cdot W) \sin(\theta), 0]^T \quad (2.27)$$

Nous pouvons reformuler l'équation 2.20 comme suit [61] :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11}.\dot{u} = m_{22}.v.r - m_{33}.w.q - X_u.u - X_{uu}.u.|u| + \tau_1 \\ m_{22}.\dot{v} = -m_{11}.u.r - Y_v.v - Y_{vv}.v.|v| \\ m_{33}.\dot{w} = m_{11}.u.q - Z_w.w - Z_{ww}.w.|w| \\ m_{55}.\dot{q} = (m_{33} - m_{11}).u.w - M_{qq}.q.|q| - (z_G.W - z_B.B)\sin(\theta) + \tau_5 \\ m_{66}.\dot{r} = (m_{11} - m_{22}).u.v - N_{rr}.|r| + \tau_6 \end{array} \right. \quad (2.28)$$

τ_1 désigne la force de propulsion, tandis-que τ_5 et τ_6 expriment les couples de tangage et de lacet, respectivement.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu les équations qui caractérisent le déplacement et l'orientation d'un AUV plongé dans l'eau. Nous avons ensuite attribué à ce sous-marin un modèle mathématique adéquat en se basant sur des hypothèses simplificatrices. Nous avons enfin déterminé le modèle cinématique et dynamique du l'engin pour lui appliqué des commandes qui assurent son mouvement suivant sa référence désirée. Le développement de ces lois de commande fait l'objet du prochain chapitre .

Chapitre 3

Théorie des commandes appliquées au AUV

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder la théorie des commandes que nous allons appliquer au système multi-AUV (Leader-suiveur) afin de guider le robot leader le long d'une trajectoire souhaitée et de faire en sorte que les robots suiveurs maintiennent une formation souhaitée par rapport à la configuration du l'AUV chef dans l'espace tridimensionnel [63] dont l'objectif principale est d'assurer l'achèvement des missions d'exploration du sous-marine multiple. Ces deux approches distinctes sont la commande Proportionnelle Dérivée (PD) et la commande basée sur la logique floue (FLC).

Le contrôleur PD utilise des algorithmes mathématiques pour garantir des ajustements précis et rapides de la formation en fonction des erreurs de position et de vitesse des AUV. En revanche, la commande FLC utilise des règles linguistiques pour prendre des décisions de contrôle plus flexibles en tenant compte des incertitudes et des aspects qualitatifs des AUV. Ces deux techniques de commande vont nous servir à faire une étude comparative concernant les performances de ces deux approches en se basant sur des critères d'évaluation. Une telle analyse permettra de mieux comprendre les avantages et les limitations de chaque méthode dans le contexte spécifique des systèmes multi-AUV.

3.2 Commande Proportionnelle Intégrale dérivée

La commande PID, acronyme pour Proportionnel, Intégral, Dérivé, est une méthode de contrôle utilisée dans les systèmes dynamiques pour maintenir une variable de sortie près d'une valeur de consigne. Le terme "proportionnel" ajuste la sortie en fonction de l'erreur actuelle, "intégral" accumule l'erreur au fil du temps pour corriger les erreurs systématiques, et "dérivé" anticipe les variations de l'erreur dans le temps pour stabiliser le système. En combinant ces composantes, le contrôleur PID régule efficacement le système tout en minimisant les erreurs et les oscillations.

3.2.1 Chaîne de régulation PID

Une chaîne de régulation PID, ou boucle de régulation PID, donnée par Figure (3.1) est un système de contrôle utilisant un contrôleur PID pour réguler une variable de sortie d'un processus ou d'un système. La boucle de régulation PID comprend généralement trois composants principaux liés les uns aux autres et ils doivent être compatibles sur le plan électrique :

- **Capteur**

Permet de mesure la variable de sortie du système et fournit cette information au contrôleur PID. Le capteur peut être un capteur de température, de pression, de débit, etc., en fonction de la nature du processus contrôlé.

- **Contrôleur PID**

Ce contrôleur utilise les données fournies par le capteur pour calculer la commande de sortie nécessaire afin de maintenir la variable de sortie aussi proche que possible de la consigne prédéfinie. Le contrôleur PID prend en compte l'erreur actuelle, l'erreur cumulée dans le temps et la variation de l'erreur pour ajuster la commande de sortie.

• Actionneur

C'est le composant qui reçoit la commande de sortie du contrôleur PID et agit sur le processus pour effectuer les ajustements nécessaires. Par exemple, dans un système de contrôle de température, l'actionneur pourrait être un dispositif de chauffage ou de refroidissement.

Ensemble, ces trois composants forment une boucle de rétroaction qui permet au système de réguler sa propre performance. La chaîne de régulation PID est largement utilisée dans une variété d'applications industrielles et de contrôle de processus en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de ses performances acceptables dans de nombreux cas d'utilisation.[64]

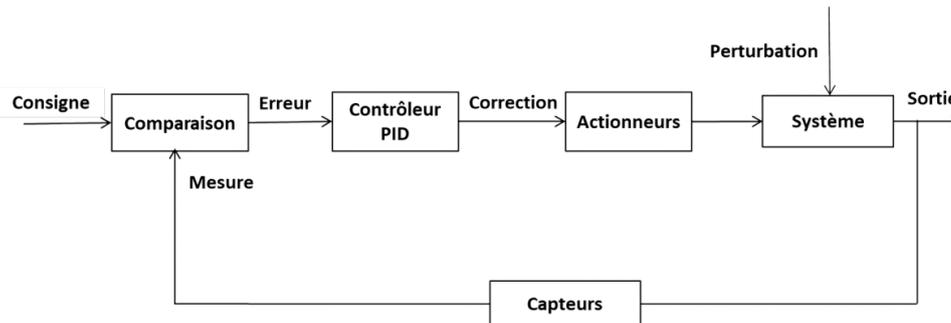


FIGURE 3.1 – Asservissement par un régulateur PID

3.2.2 Actions de régulation PID

Les actions de régulation PID font référence aux opérations effectuées par un contrôleur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) pour ajuster la sortie d'un système afin de le maintenir aussi proche que possible de sa consigne désirée. Chaque composante de la régulation PID (P, I et D) contribue de manière distincte à ce processus :

• Action Proportionnelle (P)

L'action proportionnelle est basée sur l'erreur actuelle entre la valeur mesurée du système et la consigne. Elle génère une sortie proportionnelle à cette erreur, plus l'erreur est grande, plus l'action proportionnelle est grande aussi. Le rôle principal de cette action est de réduire l'erreur présente dans le système. De plus, l'action proportionnelle contribue à la stabilité du système en réduisant les oscillations et en amortissant les perturbations. Cependant, une action proportionnelle seule peut conduire à un dépassement et à des oscillations autour de la consigne.

• Action Intégrale (I)

L'action intégrale agit sur la somme cumulée des erreurs passées au fil du temps. Elle corrige les erreurs systématiques persistantes qui ne sont pas corrigées par l'action proportionnelle seule. En accumulant l'erreur sur une période prolongée, l'action intégrale permet de ramener l'erreur à zéro à long terme, assurant ainsi que le système atteint finalement la consigne, même en présence de perturbations.

• Action Dérivée (D)

L'action dérivée est un élément clé du régulateur PID. Elle est basée sur la variation temporelle de l'erreur dont son rôle est d'anticiper les variations futures de l'erreur et d'ajuster le signal de commande

en conséquence pour atténuer ces variations et améliorer ainsi la stabilité du système. Contrairement à l'action proportionnelle (P) qui réagit seulement à l'erreur actuelle, l'action D prend en compte le taux de variation de l'erreur. En anticipant les tendances futures de l'erreur, elle permet au régulateur d'agir de manière proactive. De plus, l'action D réduit le temps de réponse en permettant au système de réagir plus rapidement aux perturbations et aux variations de consigne. Elle contribue également à la stabilité en amortissant les oscillations et en réduisant le dépassement autour de la consigne, permettant ainsi au système de converger vers la consigne de manière plus fluide avec moins d'oscillations.

En combinant ces trois actions de manière appropriée, le contrôleur PID peut ajuster la commande de sortie du système de manière dynamique pour maintenir la variable contrôlée aussi proche que possible de la consigne, tout en minimisant les erreurs et en assurant la stabilité du système. Les paramètres du contrôleur PID doivent être réglés avec soin pour obtenir des performances optimales dans différentes applications et conditions de fonctionnement.

3.2.3 Types de régulateur PID

Les différentes actions de PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) peuvent être combinées de différentes manières pour créer des contrôleurs adaptés à diverses applications. Voici quelques-unes des combinaisons les plus couramment utilisées :

- **Régulateur P (Proportionnel)**

- Utilise uniquement l'action proportionnelle pour ajuster la sortie du système en fonction de l'erreur actuelle.
- Réduit l'erreur immédiate, mais ne peut pas éliminer l'erreur systématique à long terme.
- Simple à mettre en œuvre et efficace pour des systèmes stables.

- **Régulateur PI (Proportionnel-Intégral)**

- Ajoute une composante intégrale à l'action proportionnelle pour éliminer l'erreur systématique à long terme.
- Accumule l'erreur au fil du temps, permettant une correction à long terme.
- Utilisé lorsque la précision à long terme est essentielle.

- **Régulateur PD (Proportionnel-Dérivé)**

- Ajoute une composante dérivée à l'action proportionnelle pour anticiper les changements de la variable contrôlée.
- Réagit rapidement aux changements de consigne, mais peut être sensible au bruit.
- Adapté aux systèmes nécessitant une réponse rapide et une stabilisation rapide.

Chaque combinaison de contrôleur PID présente des avantages et des limitations spécifiques. Le choix du type approprié dépend des caractéristiques du système, des exigences de performances et des contraintes de l'application. En pratique, une combinaison de ces types peut être utilisée pour obtenir un contrôle optimal du système, en fonction de ses besoins spécifiques.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés par le contrôleur PD que nous allons développer par la suite.

3.3 Régulateur PD (Proportionnel-Dérivé)

3.3.1 Définition

Le contrôleur PD (Proportionnel-Dérivé) repose sur deux composantes principales : l'action proportionnelle (P) et l'action dérivée (D). Ensemble, ces deux composantes permettent au contrôleur de réguler efficacement un système en maintenant la sortie aussi proche que possible de la consigne désirée.

En combinant l'action proportionnelle et l'action dérivée, le contrôleur PD peut ajuster efficacement la commande de sortie pour maintenir la variable contrôlée aussi proche que possible de la consigne désirée. L'action proportionnelle agit pour réduire l'erreur actuelle, tandis que l'action dérivée agit pour prévenir les dépassements et les oscillations en anticipant les changements futurs de l'erreur. Ainsi, le contrôleur PD offre une réponse rapide et stable, ce qui en fait un outil précieux dans de nombreuses applications de contrôle automatique.

3.3.2 Avantages

Le contrôleur PD (Proportionnel-Dérivé) offre plusieurs avantages dans les systèmes de contrôle automatique par rapport aux contrôleurs P, PI et PID dans certaines situations :

- **Réponse plus rapide aux changements**

Le contrôleur PD réagit plus rapidement aux variations de la variable contrôlée en utilisant l'action dérivée. Cela permet d'ajuster la commande de sortie plus rapidement pour réduire les écarts par rapport à la consigne, comparé aux contrôleurs P et PI qui n'ont pas d'action dérivée.

- **Moindre risque de dépassement**

L'action dérivée du contrôleur PD contribue à prévenir les dépassements en anticipant les variations de la variable contrôlée. Cela permet d'atteindre la consigne plus rapidement et de maintenir une réponse précise sans dépasser la valeur désirée, ce qui peut être un défi pour les contrôleurs P et PI.

- **Stabilité accrue en présence de perturbations**

La composante dérivée du contrôleur PD aide à stabiliser le système en réduisant les oscillations indésirables causées par les perturbations, ce qui peut être un avantage par rapport au contrôleur P qui ne dispose que d'une action proportionnelle.

- **Simplicité de conception et d'implémentation**

Le contrôleur PD nécessite uniquement deux paramètres à régler (la constante proportionnelle et la constante dérivée), ce qui simplifie sa conception et son ajustement par rapport au contrôleur PID, qui comportent une composante intégrale nécessitant un réglage supplémentaire.

- **Moins sensible au bruit**

Contrairement à l'action intégrale du contrôleur PI et du PID, qui peut amplifier le bruit dans le système, l'action dérivée du contrôleur PD est moins sensible au bruit. Cela permet d'obtenir une réponse plus robuste et précise, même en présence de perturbations ou de variations de mesure.

Enfin nous pouvons dire que le contrôleur PD offre une réponse plus rapide, une réduction du dépassement, une stabilité accrue en présence de perturbations, une simplicité de conception et une moindre sensibilité au bruit par rapport aux contrôleurs P, PI et PID. Ces avantages en font un choix attrayant pour de nombreuses applications de contrôle automatique, en particulier lorsque des réponses dynamiques rapides sont nécessaires et que les systèmes sont soumis à des perturbations.

3.3.3 Domaines d'application des contrôleurs PD

Le contrôleur PD est largement utilisé dans divers domaines, notamment :

- **Robotique Industrielle**

Les régulateurs PD sont utilisés pour contrôler les mouvements des robots terrestres, aériens et marins. Ces robots peuvent être utilisés dans des applications telles que la surveillance, l'inspection, la cartographie et la livraison autonome. Les contrôleurs PD aident à maintenir la stabilité et à ajuster rapidement la trajectoire du robot en fonction des obstacles et des changements d'environnement.

- **Robotique Mobile**

Les régulateurs PD sont utilisés pour contrôler les mouvements des robots terrestres, aériens et marins. Ces robots peuvent être utilisés dans des applications telles que la surveillance, l'inspection, la cartographie et la livraison autonome. Les contrôleurs PD aident à maintenir la stabilité et à ajuster rapidement la trajectoire du robot en fonction des obstacles et des changements d'environnement.

- **AUV (Véhicules Sous-Marins Autonomes)**

Les contrôleurs PD sont largement utilisés dans les AUV pour réguler leur profondeur, leur cap et leur vitesse. Ces contrôleurs permettent aux AUV de naviguer de manière autonome tout en maintenant une trajectoire précise et en évitant les obstacles.

- **Systèmes de Contrôle de Processus Industriels**

Dans l'industrie, les contrôleurs PD sont utilisés dans une variété de systèmes de contrôle de processus tels que le contrôle de la température, le contrôle de la pression, le contrôle du débit, etc. Ces contrôleurs permettent de maintenir les variables du processus à des niveaux souhaités en ajustant les actionneurs en réponse aux variations des conditions de fonctionnement.

• Contrôle de la Stabilité des Véhicules et des Structures

Les contrôleurs PD sont également utilisés pour le contrôle de la stabilité des véhicules tels que les avions, les hélicoptères, les drones et les satellites. Ces contrôleurs aident à maintenir la stabilité et le contrôle des véhicules en ajustant les surfaces de contrôle, les gouvernes et les propulseurs en réponse aux perturbations et aux changements des conditions de vol.

3.3.4 Fonction de transfert

La fonction de transfert d'un contrôleur PD, donné par son schéma bloc Figure 3.2, est généralement représentée dans le domaine de Laplace et elle est donnée par :

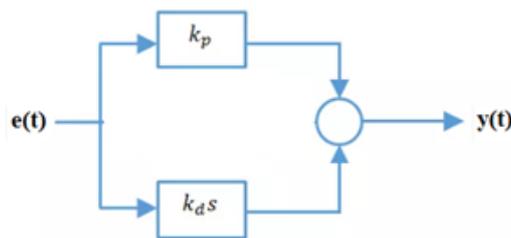


FIGURE 3.2 – Schéma bloc du contrôleur PD

$$G(s) = K_p + K_d \cdot s$$

Où :

- $G(s)$ est la fonction de transfert du contrôleur PD.
- K_p est la constante proportionnelle, qui règle l'effet de l'erreur actuelle sur la commande de sortie.
- K_d est la constante dérivée, qui règle l'effet de la vitesse de variation de l'erreur sur la commande de sortie.
- s est la variable complexe de Laplace.

Cette fonction de transfert exprime comment la sortie du contrôleur PD est influencée par l'erreur actuelle et sa variation dans le temps. Elle montre que la sortie du contrôleur PD est la somme de deux termes : un terme proportionnel à l'erreur actuelle ($K_p e(t)$) et un terme proportionnel à la dérivée de l'erreur par rapport au temps ($K_d \frac{de(t)}{dt}$), où $e(t)$ est l'erreur à l'instant t .

En utilisant cette fonction de transfert, il est possible de déterminer la réponse du système contrôlé à différentes entrées et de régler les paramètres K_p et K_d pour obtenir les performances désirées en termes de réponse, de stabilité et de réjection des perturbations.

3.4 Commande par Logique floue- (FLC)

3.4.1 Technique de logique floue

La logique floue, introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie à Berkeley, propose une description mathématique des processus basée sur la théorie des ensembles flous. Cette approche a été initialement ignorée en raison du fonctionnement des ordinateurs qui utilisent des valeurs binaires 0 et 1. Contrairement à la logique booléenne classique, la logique floue offre une méthode de raisonnement approximatif qui imite le mode de raisonnement humain, permettant de traiter des informations imprécises et des variables non exactes dont les valeurs peuvent varier entre 0 et 1. Elle utilise des degrés d'appartenance entre 0 et 1 pour représenter des concepts vagues tels que "chaud", "froid" ou "proche", par exemple pour décrire la variation de la température corporelle humaine. L'objectif principal de cette technique est similaire à celui de l'automatique classique, consistant à gérer des processus en fonction d'une consigne donnée, mais elle se distingue en se basant souvent sur les connaissances des experts ou des opérateurs humains qualifiés travaillant sur le processus. [65]

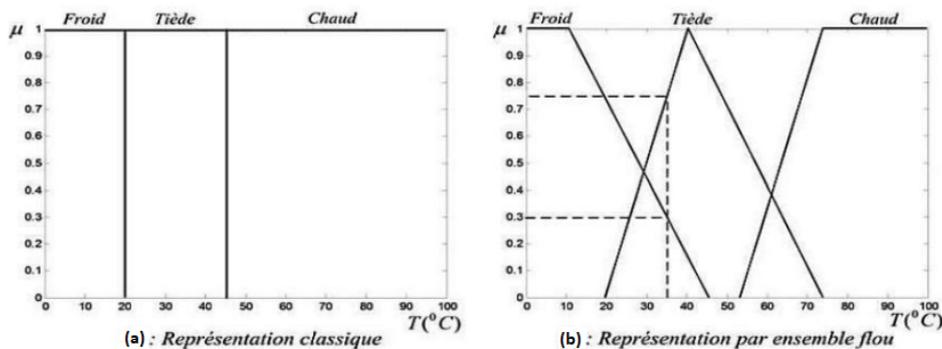


FIGURE 3.3 – Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous.

3.4.2 Description d'un ensemble flou

Dans la théorie des ensembles conventionnels, une entité appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Cependant, dans la réalité, il est rare de trouver des entités dont l'appartenance à un ensemble est clairement définie. Par exemple, quelle est la différence entre une personne considérée comme grande et une autre de taille moyenne? C'est à partir de ce constat que Zadeh a formulé sa théorie. Il a introduit les ensembles flous comme des termes linguistiques tels que "zéro", "grand", "négatif", "petit", qui sont également présents dans les ensembles conventionnels.

Nous considérons l'exemple suivant :

Soit la taille d'un individu représentée par un ensemble booléen et un ensemble flou comme le montre Figure 3.4

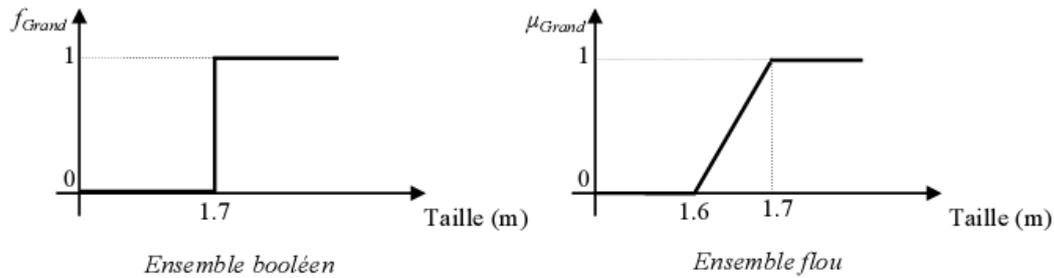


FIGURE 3.4 – Classification des ensembles flous

La variable "taille" englobe toutes les différentes dimensions qu'un individu peut avoir, ce qui constitue l'univers de discours de cette variable. Parmi ces dimensions, on retrouve la valeur linguistique "grand".

Supposons que la taille de x soit de 1,65 mètre. Dans le cas où x est un ensemble booléen, il ne fait pas partie de la classe des "grand". Cependant, dans le cas où x est un ensemble flou, il appartient à la classe des "grand" avec un certain degré d'appartenance.

La notion d'ensemble flou permet d'éviter l'utilisation arbitraire pour déterminer l'appartenance à des classes. Il serait absurde de considérer qu'un individu mesurant 1,70 mètre est grand, tandis qu'un individu mesurant 1,695 mètre ne l'est pas.

Degré d'appartenance

D'un point de vue mathématique, on peut définir un ensemble flou A dans un univers de discours U à l'aide d'une fonction d'appartenance, notée μ_A , qui attribue à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1. Ce degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indique le niveau d'appartenance de x à l'ensemble A . $\mu_A(x) = 1$ correspond à une appartenance totale, tandis que $\mu_A(x) = 0$ indique une non-appartenance.

Pour mieux comprendre, reprenons l'exemple donné par la Figure 3.3

A partir de la Figure 3.3(a) de la logique classique, le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). Dans ce cas, le corps peut être :

— **Froid** : La fonction d'appartenance du froid est définie par :

$$\mu_{\text{Froid}}(T) = 1, \quad \mu_{\text{Tiède}}(T) = 0, \quad \mu_{\text{Chaud}}(T) = 0$$

— **Tiède** : La fonction d'appartenance du tiède est définie par :

$$\mu_{\text{Froid}}(T) = 0, \quad \mu_{\text{Tiède}}(T) = 1, \quad \mu_{\text{Chaud}}(T) = 0$$

— **Chaud** : La fonction d'appartenance du chaud est définie par :

$$\mu_{\text{Froid}}(T) = 0, \quad \mu_{\text{Tiède}}(T) = 0, \quad \mu_{\text{Chaud}}(T) = 1$$

Il est impossible d'attribuer simultanément deux qualificatifs à la température du corps.

A partir de la Figure 3.3(b) de la logique floue, le degré d'appartenance est représenté par une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1, incluant les deux extrêmes. Ainsi, pour le qualificatif "Tiède", le corps peut être considéré à la fois comme "Froid" avec un degré d'appartenance de 0,3 et comme "Tiède" avec un degré d'appartenance de 0,75.

Pour $T = 35^{\circ}C$: les températures froides, tièdes et chaudes sont respectivement définies comme étant égales à $0.3T$, $0.75T$ et $0T$.

Conformément à la théorie des ensembles flous, le raisonnement précis est considéré comme un cas particulier du raisonnement approximatif. Toutes les structures logiques peuvent être adaptées à la logique floue, y compris la logique booléenne qui en constitue une sous-catégorie. La pertinence de la logique floue réside dans sa capacité à représenter le raisonnement humain, souvent basé sur des approximations.

3.4.3 Fonctions d'appartenance

Dans la pratique, les fonctions d'appartenance peuvent prendre diverses formes (voir Figure 3.5), telles que la forme d'onde triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, en cloche, sigmoïdale, etc. Le choix de la forme dépend des applications spécifiques. Pour les systèmes nécessitant une variation dynamique significative sur une courte période de temps, il est recommandé d'utiliser une forme d'onde triangulaire ou trapézoïdale [66].

Cependant, pour les systèmes nécessitant une précision de contrôle élevée, il est préférable de choisir une forme d'onde gaussienne ou en courbe S. Il existe diverses fonctions d'appartenance parmi lesquelles les plus fréquemment employées sont illustrées par Figure 3.5 [66] :

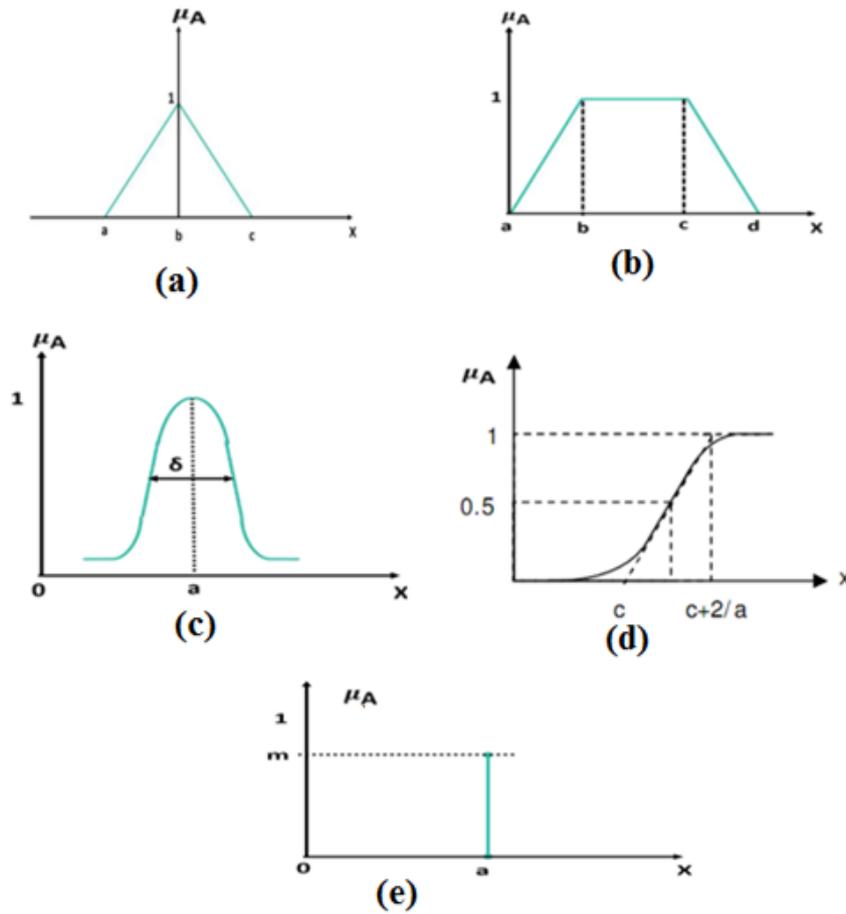


FIGURE 3.5 – Fonctions d'appartenance, (a) triangulaire, (b) trapézoïdale, (c) gaussienne, (d) sigmoïdale, (e) Singleton.

• Fonction triangulaire

(Figure 3.5(a)) est caractérisée par trois paramètres a , b , c qui définissent les coordonnées des trois sommets.

$$\mu_A(x) = \max\left(\min\left(\frac{(x-a)}{(b-a)}, \frac{(c-x)}{(c-b)}\right), 0\right) \quad (3.2)$$

• Fonction trapézoïdale

(Figure 3.5.(b)) est définie par quatre paramètres a , b , c , d

$$\mu_A(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{(x-a)}{(b-a)}, 1, \frac{(d-x)}{(d-c)}\right)\right) \quad (3.3)$$

• Fonction gaussienne

(Figure 3.5.(c)) est caractérisée par deux paramètres : écart type σ , la valeur centrale a

$$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.4)$$

- **Fonction sigmoïdale**

(Figure 3.5(d)) est définie par deux paramètres a , c

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x - c))} \quad (3.5)$$

- **Fonction Singleton**

(Figure 3.5(e)) est définie par :

$$U(x) = \begin{cases} m = 1 & \text{pour } x = a \\ m = 0 & \text{pour } x \neq a \end{cases} \quad (3.6)$$

En général, on utilise pour les fonctions d'appartenance trois formes géométriques : trapézoïdale, triangulaire et de cloche. Les deux premières formes sont les plus souvent employées en raison de leur simplicité [67].

3.4.4 Opérateurs de la logique floue

La caractérisation des ensembles flous par les fonctions d'appartenance a permis une extension de certaines opérations définies sur les ensembles classique au cas flou.

Soient A et B deux ensembles flous définis dans l'univers de discours X ayant respectivement $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ comme fonction d'appartenance.[68]

Les opérateurs habituels sont soit l'addition, la soustraction, la division et la multiplication de deux ou plusieurs ensembles flous. Cependant, ce sont les deux opérateurs d'union et d'intersection qu'on utilise le plus souvent dans la commande par la logique floue [67], [66].

- **Opérateur logique "NON"**

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble A . Dans le cas de la logique floue, cette définition est exprimée par les fonctions d'appartenances comme suit :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.7)$$

Figure 3.6 met en évidence cette relation

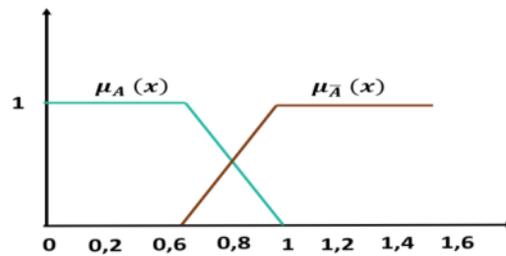


FIGURE 3.6 – Opération floue "NON"

Exemple arithmétique d'opérateur "NON" :

On a « $A = 0.6 + 1 + 0.7 + 0.2 + 0$ ».

Alors,

« $A = 0.4 + 0 + 0.3 + 0.8 + 1$ ».

• L'opérateur "ET"

L'opérateur "ET" correspond à l'intersection de deux ensembles A et B . Dans la logique floue, l'opérateur "ET" est réalisé dans la plupart des cas par la formulation du minimum, appliqué aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B, à savoir :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.8)$$

Figure 3.7 met en évidence cette relation

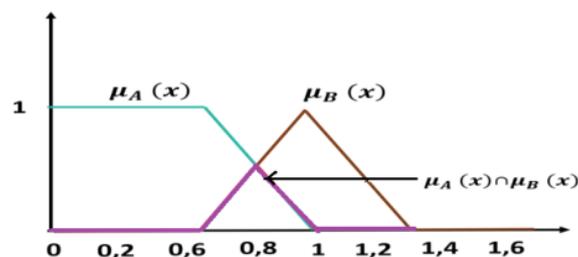


FIGURE 3.7 – Opération floue "ET"

Exemple arithmétique d'opérateur "ET" :

- On a « $A = 0.3 + 0 + 0.4 + 0.8 + 1$ » ET « $B = 0.2 + 0.3 + 0.1 + 0.2 + 0.4$ »

- Alors, « $AB = 0.2 + 0 + 0.1 + 0.2 + 0.4$ »

• Opérateur logique "OU"

L'opérateur "OU" correspond à l'union de deux ensembles A et B. La réalisation de l'opérateur "OU" au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B . On a donc l'opérateur maximum :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.9)$$

Cette opération est représentée par Figure (3.8)

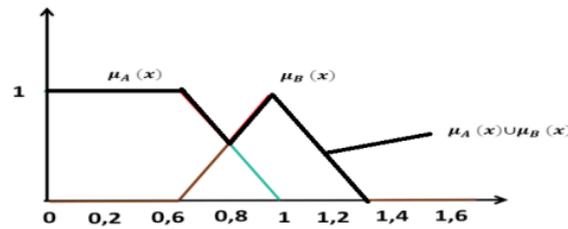


FIGURE 3.8 – Opération floue "OU"

Remarque 3.1

Les opérateurs logiques "ET" et "OU" peuvent être exécutés à l'aide des opérations arithmétiques telles que la multiplication probabiliste. Il est possible de définir l'opérateur "ET" de la manière suivante :

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.10)$$

Et définir l'opérateur "OU" par :

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.11)$$

3.4.5 Commande par logique floue FLC

La modélisation mathématique des systèmes non linéaires peut être complexe et nécessite souvent des hypothèses simplificatrices qui peuvent rendre le modèle moins fidèle à la réalité. De plus, même avec un modèle précis, les incertitudes et les variations paramétriques du système à régler rendent difficile la conception de contrôleurs robustes et efficaces.

La commande par logique floue (FLC) a été développée pour remédier à ces défis. Contrairement aux approches de contrôle conventionnelles qui reposent sur des modèles mathématiques précis du système à contrôler, la FLC se base sur des règles linguistiques et des connaissances expertes pour prendre des décisions de contrôle. Parmi les avantages, on peut citer :

Pas besoin de modèle précis

La FLC ne nécessite pas de modèle mathématique précis du système à contrôler. Au lieu de cela, elle utilise des règles linguistiques pour représenter la relation entre les entrées et les sorties du système, ce qui rend la FLC plus flexible et plus adaptable à des systèmes complexes et non linéaires.

Gestion des incertitudes

Les incertitudes et les variations dans le comportement du système peuvent être modélisées et gérées de manière efficace dans la FLC. Les règles linguistiques permettent de capturer et de prendre en compte ces incertitudes de manière intuitive, ce qui permet de concevoir des contrôleurs robustes capables de fonctionner dans des conditions variables.

Adaptabilité

La FLC est capable de s'adapter et d'apprendre à partir de l'expérience. Les règles linguistiques peuvent être ajustées et affinées en fonction des performances observées du système, ce qui permet d'améliorer progressivement la qualité du contrôle.

3.4.5.1 Structure de la commande floue

La structure d'une commande par logique floue, illustrée par Figure 3.9, comprend des étapes de fuzzification pour traiter les entrées sous forme de valeurs floues, une base de règles pour définir les actions de contrôle en fonction des conditions des variables d'entrée, une inférence pour combiner les règles et obtenir une sortie floue, une défuzzification pour convertir la sortie floue en une valeur de commande précise, et enfin, la sortie de la commande qui est utilisée pour contrôler le système.

Le contrôleur flou traite l'information à l'aide d'un ensemble d'unités spécifiées qui sont donnés par Figure 3.9 [69].

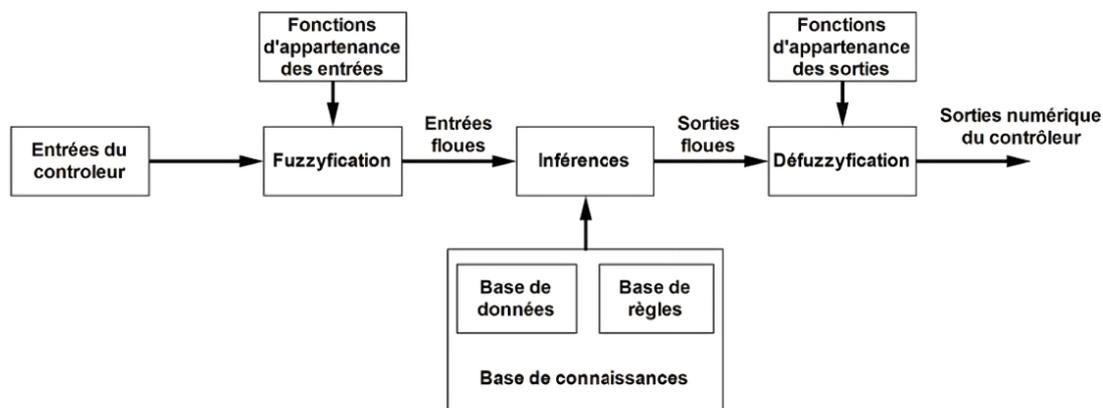


FIGURE 3.9 – Structure d'un contrôleur flou

• Variables d'entrée

Ce sont les paramètres du système ou les données sensorielles qui servent de base à la prise de décision du contrôleur flou. Par exemple, dans le cas d'un système de contrôle de température, les variables d'entrée pourraient être la température actuelle et la vitesse de changement de la température.

• Fuzzification

La fuzzification est la première étape du processus de contrôle flou. Elle consiste à convertir les valeurs des variables d'entrée en ensembles flous. Chaque variable d'entrée est associée à plusieurs ensembles flous qui représentent des catégories linguistiques. Par exemple, une variable de température peut être

associée aux ensembles "froid", "tiède" et "chaud".

Les fonctions d'appartenance décrivent la probabilité d'appartenance d'une valeur donnée à chaque ensemble flou. Ces fonctions peuvent être triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, etc.

- **Base de règles**

La base de règles contient un ensemble de règles linguistiques qui décrivent la relation entre les ensembles flous des variables d'entrée et l'ensemble flou de sortie. Chaque règle est de la forme :

"SI (conditions) ALORS (action)"

Les conditions sont des combinaisons d'ensembles flous des variables d'entrée, et l'action est un ensemble flou de sortie.

- **Inférence floue**

L'inférence floue combine les règles linguistiques pour obtenir un ensemble flou de sortie en fonction des valeurs des variables d'entrée. Il existe différentes méthodes d'inférence floue, telles que la méthode de Mamdani et la méthode de Takagi-Sugeno. Ces méthodes utilisent des opérateurs de logique floue pour combiner les ensembles flous selon les règles spécifiées.

- **Défuzzification**

La défuzzification est la dernière étape du processus de contrôle flou. Elle consiste à convertir l'ensemble flou de sortie en une valeur numérique précise qui représente la commande à appliquer au système.

Il existe différentes méthodes de défuzzification, telles que la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum, etc. Ces méthodes permettent de choisir la valeur de sortie la plus appropriée en fonction de la forme de l'ensemble flou de sortie.

- **Variable de sortie**

La variable de sortie représente la valeur de commande résultante qui est envoyée aux actionneurs du système pour effectuer les actions de contrôle nécessaires. Cette valeur de sortie est généralement déterminée par la défuzzification et représente la contribution du contrôleur flou à la commande du système.

3.4.5.2 Structures d'un contrôleur PID flou

Diverses méthodes peuvent être employées dans le cadre de la commande floue, ces méthodes se différencient en fonction des entrées et des sorties du contrôleur.

La figure (3.10) montre un régulateur flou de type PI (FLC-PI) utilisé comme une variation de commande.

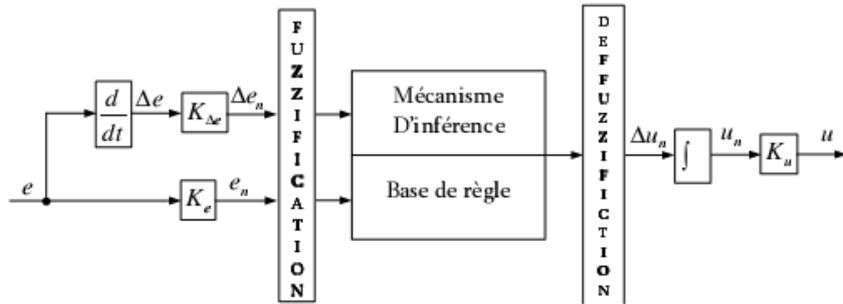


FIGURE 3.10 – Schéma de principe d'un contrôleur flou type PI

Cependant, lorsque la sortie du contrôleur est appliquée directement au processus, on parle alors d'un contrôleur flou de type PD (FLC-PD). La structure de ce régulateur est illustrée dans la figure (3.11).

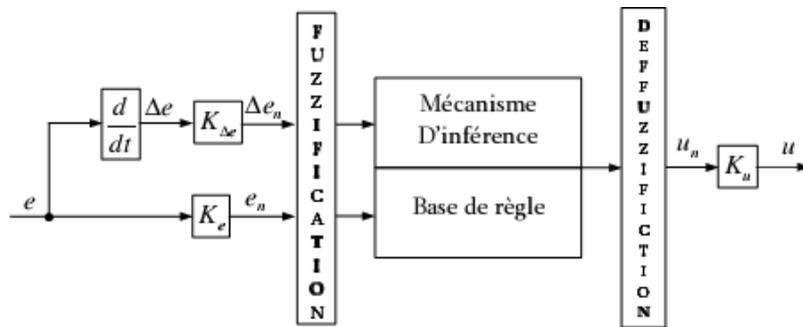


FIGURE 3.11 – Schéma de principe d'un contrôleur flou type PD.

Le contrôleur flou de type PID peut être obtenu en combinant les deux contrôleurs flous de type PI et PD comme il est indiqué dans la figure (3.12).

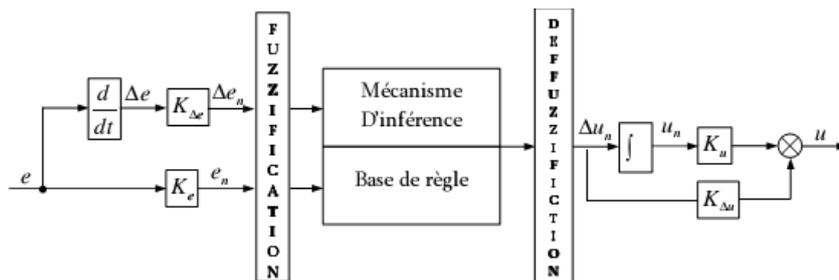


FIGURE 3.12 – Schéma de principe d'un contrôleur flou type PID.

Les coefficients K_e et $K_{\Delta e}$ sont désignés comme des facteurs d'échelle, ils permettent de convertir les valeurs physiques des entrées dans un domaine normalisé $[-1 \ 1]$. En outre, la dénormalisation ajuste la valeur normalisée du signal de commande à son domaine physique respectif en utilisant les deux coefficients d'échelle K_u et $K_{\Delta u}$. Ainsi, les entrées du contrôleur flou e_n et Δe_n sont normalisées en utilisant les expressions suivantes :

$$\begin{cases} e_n = K_e \cdot e \\ \Delta e_n = K_{\Delta e} \cdot \Delta e \end{cases} \quad (3.12)$$

De la même façon, la sortie u_n du contrôleur est dénormalisée à u en utilisant la relation suivante :

$$u = K_u \cdot u_n + K_{\Delta u} \cdot \Delta u_n \quad (3.13)$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu théorique sur les deux contrôleurs que nous allons appliquer au système multi-AUV. Ces approches sont la commande PD qui exige la connaissance du modèle du système à contrôler et la commande floue qui ne nécessite pas ce modèle. Ces contrôleurs doivent assurer une bonne navigation des robots en suivant leurs références ainsi que la stabilité de ces robots.

Les résultats de simulation de ces lois de commande appliquées aux systèmes multi-AUV seront exposés et interprétés dans le prochain chapitre.

Chapitre 4

Simulations et interprétation des résultats

4.1 Introduction

Nous allons présenter à travers ce chapitre les résultats de simulations de différentes lois de commande (PD et FLC) dont nous avons présenté dans le chapitre précédent et qu'elles sont appliquées aux trois sous-marins autonomes composant le système multi-AUV adopté afin qu'il puisse accomplir sa tâche d'exploration avec succès.

L'objectif principale des ces test de simulation est de faire une étude comparative entre les performances des deux commandes en évaluant leur performance par rapport aux variations paramétriques (Inerties et masses de l'eau ajoutées) ainsi que les forces de Gravité et Flottabilité considérées comme perturbations.

Nous allons simuler aussi la navigation du système multi-AUV en 3D en utilisant une technique de guidage par points de passage appelée LOS (Line-Of-Sight en anglais) associé à un des régulateurs PD ou FLC afin d'assurer la poursuite des AUV à leur référence lors de la réalisation de la mission souhaitée.

Les simulations des différentes lois de commandes appliquées au multi-AUV sont effectuées sous l'environnement Matlab en utilisant les valeurs numériques nécessaires données dans l'Annexe.

4.2 Résultats des simulations

4.2.1 Système multi-AUV adopté

Dans notre travail, nous avons opté pour un système multi-AUV à structure homogène avec un schéma en chaîne comme le montre Figure 4.1.

Le contrôle de la formation du système multi-AUV envisagé et basé sur la structure leader suiveurs (AUV 1 est le leader et AUV2 et AUV3 sont les suiveurs) dont le déplacement et le mouvement de ces AUV sont régulés soit par une commande proportionnelle dérivée (PD), soit par une commande basée sur logique floue afin de réaliser la mission souhaitée correctement.

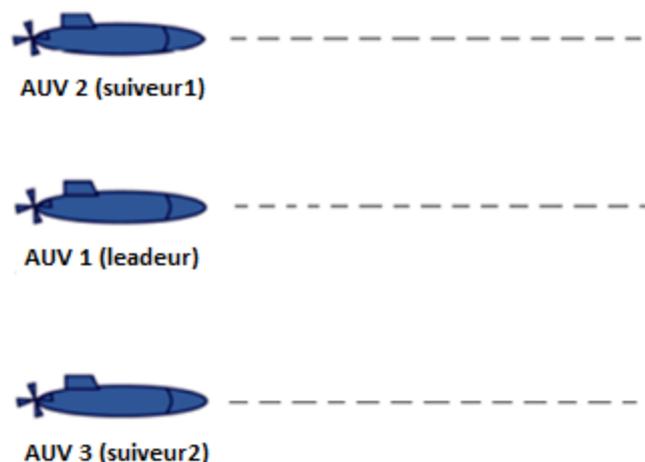


FIGURE 4.1 – Topologie du système multi-AUV adopté

Les trois AUV constituant le sous-marin multiple sont identiques. Ils sont donc de même forme cylindrique (Figure 4.2) et chaque AUV est équipé :

- D'un gouvernail de direction situé à l'arrière de chaque engin produisant un couple noté $(\tau_5(t))$ et permettant le contrôle de tangage du robot.
- D'un gouvernail de profondeur, situées à l'arrière du robot, qui délivre un couple noté $(\tau_6(t))$ permettant de contrôler le lacet du robot.
- D'un propulseur, placé à l'arrière de l'engin qui génère une force de propulsion, noté $(\tau_1(t))$. Permettant le contrôle de déplacement du sous-marin dans l'eau selon l'axe x .



FIGURE 4.2 – Sous-marin autonome adopté

Le modèle cinématique de chaque AUV est donnée par Équation (2.24) et le modèle dynamique correspondant est donné par Équation (2.28) dont les paramètres de ces modèles sont donnés en Annexe. Les modèles obtenus sont à cinq degré de liberté car on a négligé le mouvement de roulis afin de simplifier les calculs.

4.2.2 Perturbations et incertitudes

Les perturbations et les incertitudes prises en compte lors de l'application des commandes PD et la commande par logique floue sont les suivantes :

- Les forces et les moments engendrés par l'inertie et la masse de l'eau ajoutées $(\tau_a(t))$ données par Équation (2.11). Cette incertitude due au déplacement de l'AUV dans l'eau qui est un fluide visqueux et incompressible et qui provoque le mouvement des particules de fluide contraignant le mouvement de l'engin.
- Les forces d'amortissement hydrodynamique engendrées par les frottements visqueux du fluide sur le corps de l'AUV noté $(\tau_b(t))$ et représentées par Équation (2.15). Ces perturbations sont : la force de frottement et la force de friction. Nous avons négligé les effets du vent, des vagues et des courants marin pour obtenir un modèle simplifié et plus facilement utilisable.

Nous avons pris en compte tous ces éléments lors de la modélisation de la dynamique du sous-marin. Ces perturbations ont un impact indicatif sur les performances des AUV, notamment sur leur stabilité, leur manœuvrabilité et leur réponse dynamique. Ces variations peuvent nécessiter des ajustements dans la conception des contrôleurs ou des stratégies de régulation afin de maintenir les performances du système dans des limites acceptables.

4.2.3 Les simulations du multi-AUV sans correction

Nous avons simulé le système multi-AUV en boucle ouverte (sans commande) afin d'observer le comportement du système en absence de toute action correctrice externe.

Cette simulation est réalisée en utilisant le modèle dynamique qui gouverne l'évolution des variables d'état du système au cours du temps, en tenant compte uniquement des conditions initiales et des paramètres du système.

Les valeurs désirées, des angles d'orientation (lacet et tangage) des trois AUV, considérées dans les simulations sont :

Angles de tangage désirés sont : $\theta_d = 1.05$ rad

Angles de lacet désirés sont : $\psi_d = 1.05$ rad

Les résultats de simulation ainsi obtenus sont représentés par les figures (4.3) et (4.4).

• Synthèse 1

D'après les figures (4.3, a) et (4.3, b) représentant respectivement l'évolution des angles de tangage (θ) des trois AUV et l'évolution des angles de lacet (ψ) des ces engins, nous remarquons que les trajectoires de ces positions angulaires s'éloignent considérablement de leurs références souhaitées. Nous pouvons confirmer ce résultat à partir des figures (4.4, a) et (4.4, b) représentant respectivement les erreurs de poursuite de tangage et celles de lacet qui ne s'annulent pas.

Les résultats acquis reviennent au manque des contrôleurs associés aux trois AUV dont le rôle est d'assurer le bon suivi des positions angulaires à leurs consignes d'où la nécessité d'appliquer une commande au système sous-marins

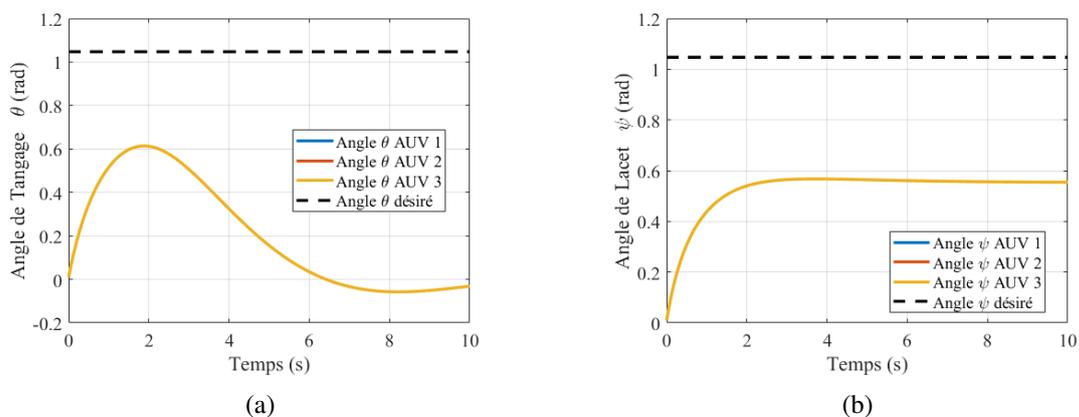


FIGURE 4.3 – Évolution des positions angulaires du multi-AUV sans correcteur, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet

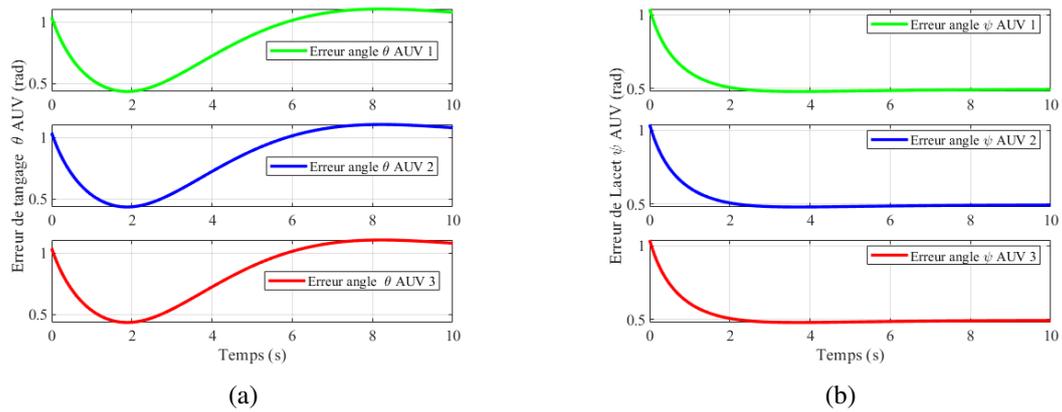


FIGURE 4.4 – Erreurs de poursuite du Multi-AUV sans correcteur, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet

4.2.4 Les simulations de la commande PD du multi-AUV

Nous avons appliqué ensuite au système multi-AUV la commande Proportionnelle Dérivée (PD) en tenant en considérations les perturbations et incertitudes citées ci-dessus dont l'objectif principale est d'améliorer les performances des AUV afin qu'ils accomplissent leur mission avec succès.

• Schéma bloc de la commande PD

Le schéma fonctionnel de la commande PD du sous-marin multiple est illustré par Figure 4.5. Ce schéma montre que la commande PD sert à corriger l'évolution des angles de lacet ainsi que les angles de tangage des trois AUV. Tandis que la commande proportionnelle P sert à régler la vitesse linéaire $u(t)$ de déplacement des AUV selon l'axe (Ox).

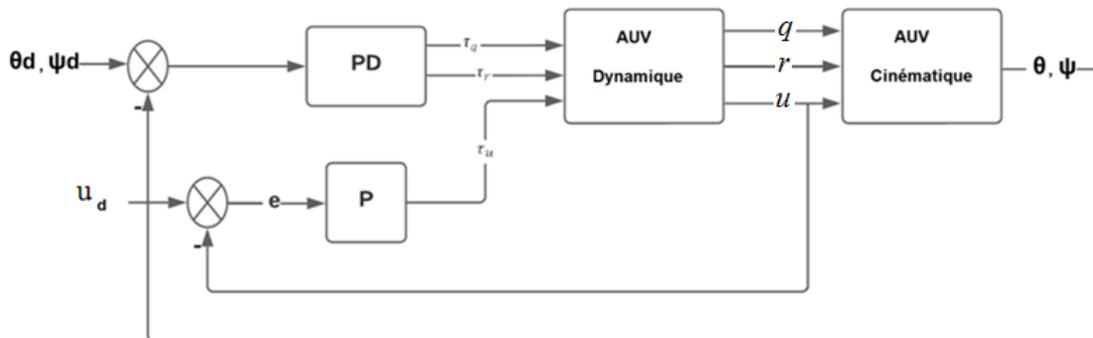


FIGURE 4.5 – Schéma fonctionnel de la commande PD du multi-AUV.

• Lois de commande PD pour les angles de tangages

Les lois de commande PD appliquées aux trois AUV (leader et deux suiveurs) pour régler leurs positions angulaires de tangage(θ) sont les suivant :

$$\tau_q = \tau_5 = K_p \tilde{\theta} + K_D \frac{d\tilde{\theta}}{dt} \quad (4.1)$$

Avec :

$\theta(t)$: Angle de tangage mesuré.

$\theta_d(t)$: Angle de tangage désiré.

$\tilde{\theta}(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$: Erreur de tangage.

La valeur souhaitée de l'angle de tangage choisie pour la simulation est $\theta_d(t) = 0.523$ rad .

• Lois de commande PD pour les angles de lacet

Les lois de commande PD appliquées aux trois AUV (leader et deux suiveurs) pour réguler leurs positions angulaires de lacet (ψ) sont les suivant :

$$\tau_r = \tau_6 = K_p \tilde{\psi} + K_D \frac{d\tilde{\psi}}{dt} \quad (4.2)$$

Avec :

$\psi(t)$: Angle de lacet mesuré .

$\psi_d(t)$: Angle de lacet désiré .

$\tilde{\psi}(t) = \psi_d(t) - \psi(t)$: Erreur de lacet.

La valeur souhaitée de l'angle de lacet choisie pour la simulation est $\psi_d(t) = 1.57$ rad .

• Lois de commande P pour la vitesse linéaire selon x

Les lois de commande P appliquées aux trois AUV (leader et deux suiveurs) pour régler leurs vitesses linéaires de déplacement selon l'axe (Ox) sont les suivant :

$$\tau_u = \tau_1 = K_p \tilde{u} \quad (4.3)$$

Avec :

$u(t)$: Vitesse linéaire mesuré selon x .

$u_d(t)$ Vitesse linéaire désiré selon x .

$\tilde{u}(t) = u_d(t) - u(t)$: Erreur de la vitesse linéaire selon x.

La valeur désirée de la vitesse linéaire de déplacement selon (Ox) choisie pour la simulation est $u_d(t) = 3$ m/s ;

• Résultats des simulations

Les gains (k_p et k_d) des différentes lois de commande PD et P sont choisis convenablement afin de garantir la stabilité du système ainsi que la précision de la commande appliquée. Ces paramètres sont déterminés par la méthode d'essai-erreur.

Les résultats de simulation obtenus sont représentés par les figures (4.6), (4.7) et (4.8).

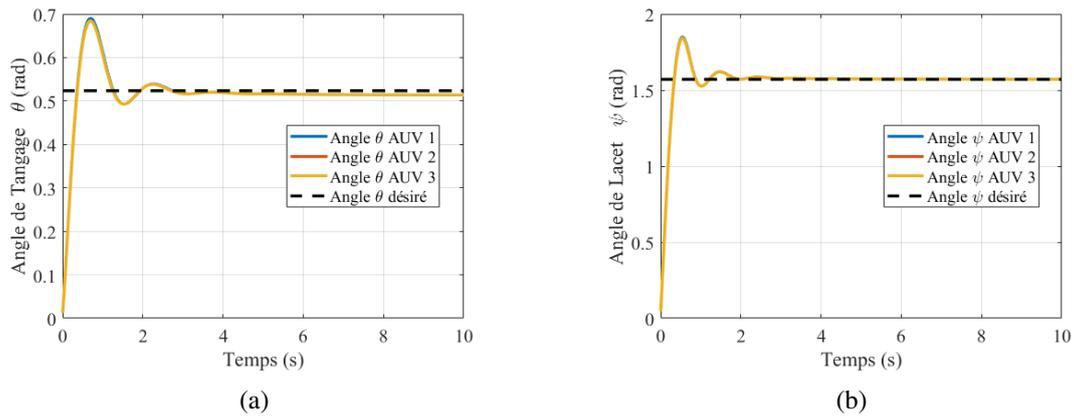


FIGURE 4.6 – Évolution des positions angulaires du multi-AUV avec correcteur PD, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet

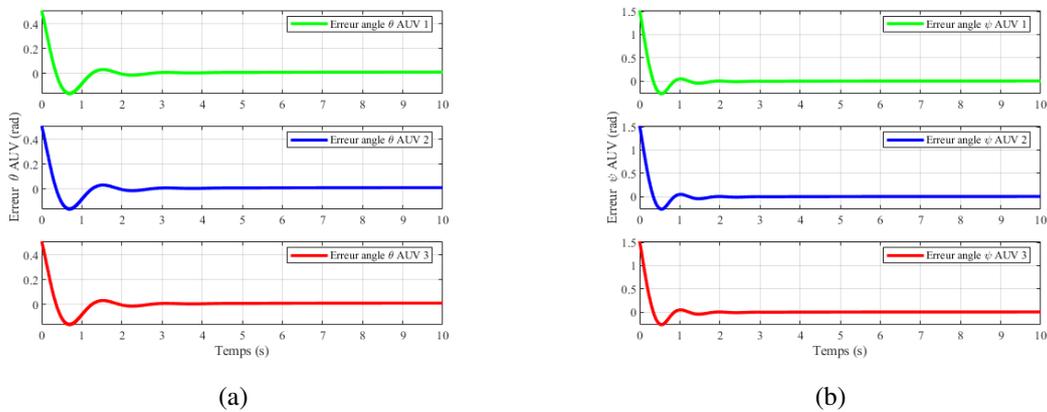


FIGURE 4.7 – Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec correcteur PD, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet

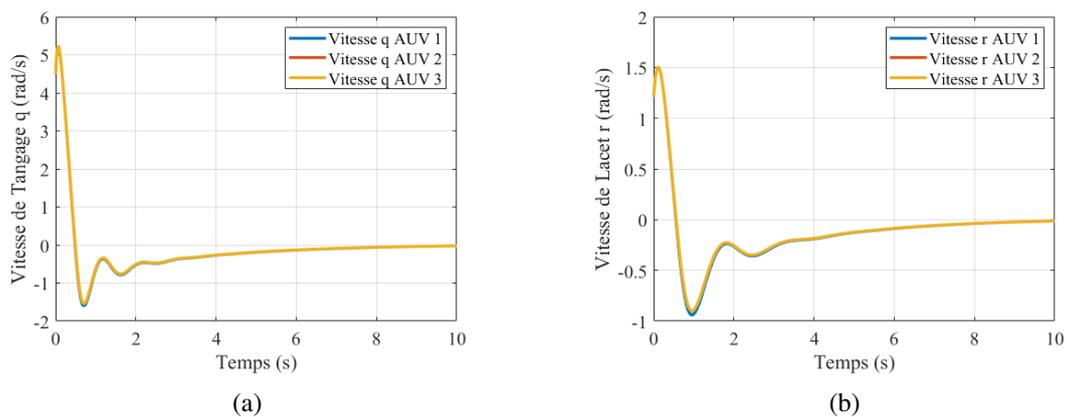


FIGURE 4.8 – Évolution des vitesses angulaires du multi-AUV avec correcteur PD, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet

• Synthèse 2

En examinant les figures (4.6, a) et (4.6, b) représentant respectivement l'évolution des angles de tangage (θ) des trois AUV et l'évolution des angles de lacet (ψ) des ces engins, nous pouvons

constater que des positions angulaires des AUV de tangage ainsi que de lacet tendent vers leurs références au régime permanent. Nous pouvons confirmer ce résultat à partir des figures (4.7, a) et (4.7, b) représentant les erreurs de la régulation PD du sous-marin multiple qui tendent vers zéro au régime établi.

Les figures (4.8, a) et (4.8, b) qui correspondent respectivement aux vitesses angulaires de tangage et aux vitesses angulaires de lacet montrent qu'après leurs variations au régime transitoire, ces vitesses s'annulent lorsque les positions angulaires de lacet et celles de tangage prennent des valeurs constantes.

A partir de ces résultats de simulation obtenus, nous pouvons conclure que les contrôleurs classiques P et PD ont montrés leur efficacité lors de la prise en compte des perturbations et des incertitudes paramétriques.

4.2.5 Les simulations de la commande FLC du multi-AUV

Nous avons appliqué maintenant au système multi-AUV la commande basée sur la logique floue en prenant en compte les perturbations et les incertitudes citées ci-dessus dont le but est d'améliorer les performances des AUV afin qu'ils réalisent leur tâche avec précision.

• Schéma bloc de la commande floue

Le schéma fonctionnel de la commande FLC du sous-marin multiple est donné par Figure (4.9). Dans cette boucle de régulation, nous avons utilisé deux commandes floues, la premier FLC 1 pour corriger l'évolution des angles de tangage et le deuxième FLC 2 pour contrôler les angles de lacet des trois AUV. Tandis que la commande proportionnelle P (décrite ci-dessus) sert à régler la vitesse linéaire $u(t)$ de déplacement des AUV selon l'axe (Ox).

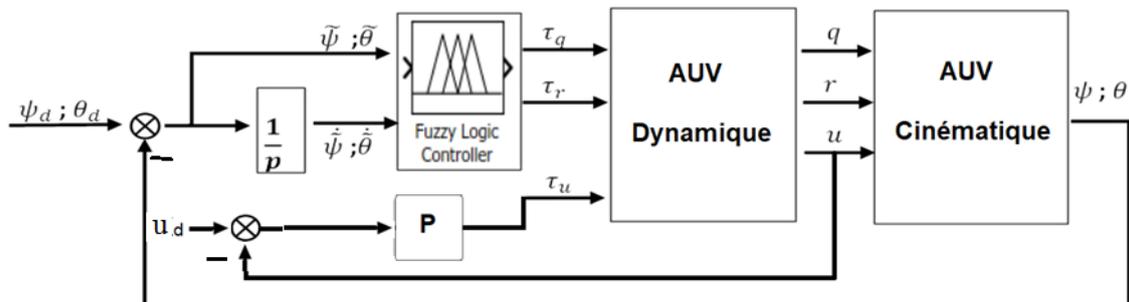


FIGURE 4.9 – Schéma fonctionnel de la commande FLC du multi-AUV

• Conception de la commande floue

Nous avons utilisé deux contrôleurs FLC (Figure 4.10) de type Takagi- Sugeno d'ordre 0 dont le premier FLC sert à commander le tangage et le deuxième FLC sert à contrôler le Lacet.

Les paramètres choisis pour le fonctionnement des contrôleurs flous sont :

Les variables linguistiques

L'erreur de tangage : $\tilde{\theta}(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$;

L'erreur de lacet : $\tilde{\psi}(t) = \psi_d(t) - \psi(t)$;

La dérivée de l'erreur de tangage : $\dot{\tilde{\theta}}(t)$;

La dérivée de l'erreur de lacet : $\dot{\tilde{\psi}}(t)$.

Univers de discours

De l'erreur de tangage et de lacet ($\tilde{\theta}(t), \tilde{\psi}(t)$)

$\tilde{\theta} \in [-180, 180]$;

$\tilde{\psi} \in [-180, 180]$;

De la dérivée de l'erreur de tangage et de lacet ($\dot{\tilde{\theta}}(t), \dot{\tilde{\psi}}(t)$)

$\dot{\tilde{\theta}} \in [-3, 3]$;

$\dot{\tilde{\psi}} \in [-3, 3]$;

Les commandes (τ_q, τ_r)

$\tau_q \in [-200, 200]$

$\tau_r \in [-200, 200]$

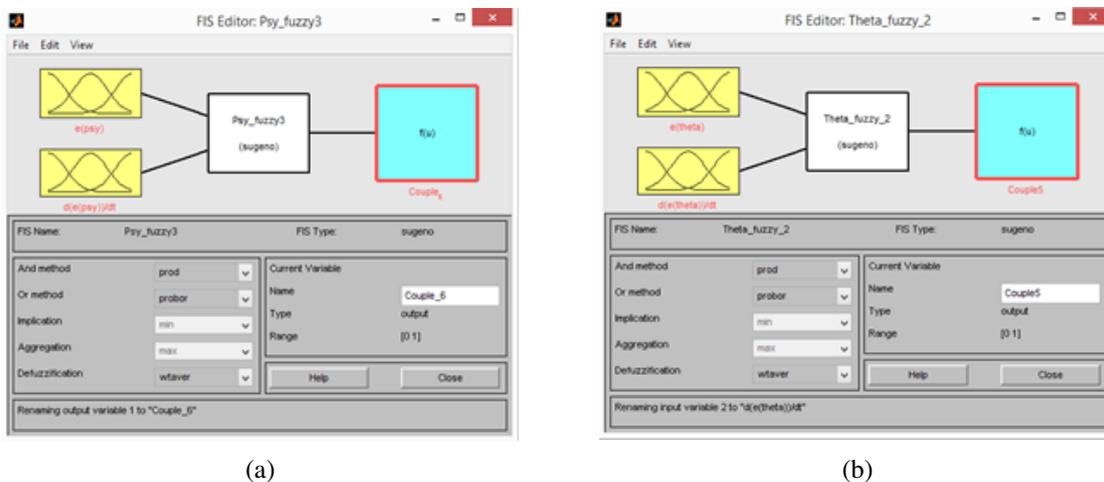


FIGURE 4.10 – Structure globale des FLC (entrée, sortie), (a) FLC de lacet, (b) FLC de tangage.

Classes et fonction d'appartenance de chaque FLC utilisées

Nous avons opté pour une forme triangulaire et trapézoïdale aux limites pour les entrées et la forme singleton pour les sorties du contrôleur flou.

Pour les variables d'entrées du FLC ($\tilde{\theta}, \tilde{\psi}, \dot{\tilde{\theta}}, \dot{\tilde{\psi}}$) on a utilisé cinq classes :

NB (Négatif Grand), NS (Négatif Petit), Z (Zéros), PS (Positif Petit) et PB (Positif Grand).

Pour les variables de sortie (τ_q, τ_r) du FLC on a utilisé sept classes singletons :

NVB (Négatif très Grand), NB (Négatif Grand), NS (Négatif Petit), Z (Zéros), PS (Positif Petit), PB (Positif Grand) et PVB (Positif très Grand).

Fonction d'appartenance de $\tilde{\theta}$

Ces fonctions sont données par Figure (4.11) et les paramètres des fonctions d'appartenance d'entrée de $\tilde{\theta}$ sont résumés dans Tableau 4.1.

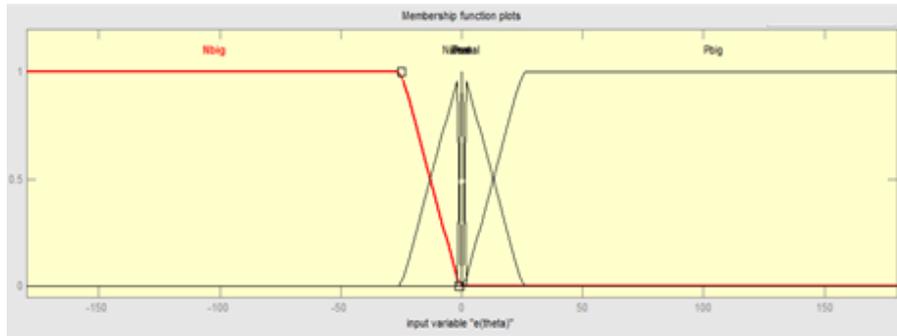


FIGURE 4.11 – Fonctions d'appartenances de la variable floue (erreur de tangage $\tilde{\theta}$)

$\tilde{\theta}$	Type de fonction d'appartenance	Paramètre de la fonction d'appartenance			
NB	Trapézoïdale	-316	-201	-25	-1
NS	Triangulaire	-25	-1	0	/
Z	Triangulaire	-1	0	1	/
PS	Triangulaire	0	1	25	/
PB	Trapézoïdale	1	25	238	526

TABLEAU 4.1 – Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de ($\tilde{\theta}$)

Fonctions d'appartenances de $\tilde{\psi}$

Ces fonctions sont illustrées par Figure (4.12) et les paramètres des fonctions d'appartenance d'entrée de $\tilde{\psi}$, sont donnés par Tableau 4.2.

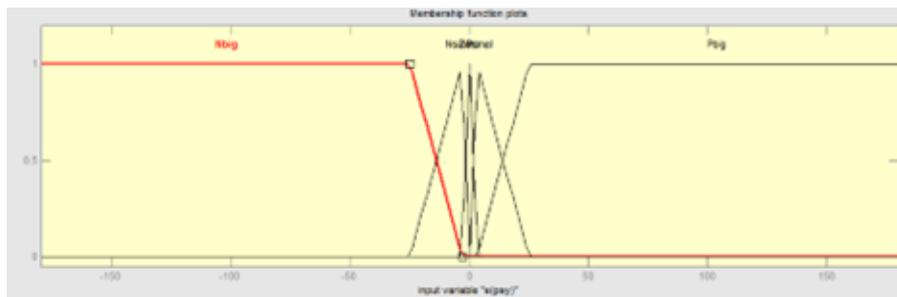


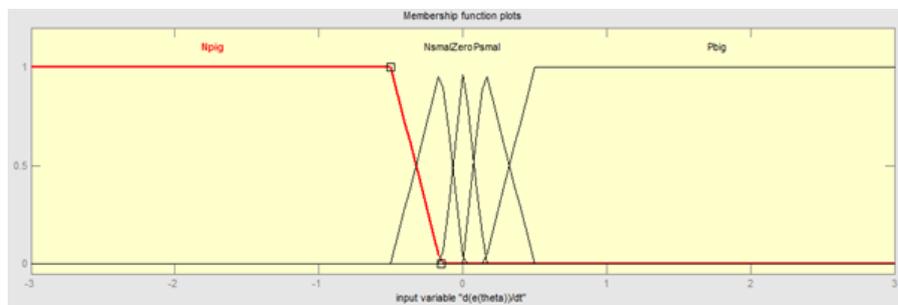
FIGURE 4.12 – Fonctions d'appartenances de la variable floue (erreur de lacet $\tilde{\psi}$)

$\tilde{\psi}$	Type de fonction d'appartenance	Paramètre de la fonction d'appartenance			
NB	Trapézoïdale	-315.9	-200.7	-25	-3
NS	Triangulaire	-25	-3	0	/
Z	Triangulaire	-3	0	3	/
PS	Triangulaire	0	3	25	/
PB	Trapézoïdale	3	25	238	526

 TABLEAU 4.2 – Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de($\tilde{\psi}$)

Fonctions d'appartenances de $\tilde{\theta}$

Ces fonctions sont illustrées par Figure (4.13) et les paramètres des fonctions d'appartenance d'entrée de $\tilde{\theta}$, sont donnés par Tableau 4.3.


 FIGURE 4.13 – Fonctions d'appartenances de la variable floue (dérivée de l'erreur de tangage $\tilde{\theta}$)

$\tilde{\theta}$	Type de fonction d'appartenance	Paramètre de la fonction d'appartenance			
NB	Trapézoïdale	-5.61	-3.69	-0.5	-0.15
NS	Triangulaire	-0.5	-0.15	0.00617	/
Z	Triangulaire	-0.1438	0.006	0.1562	/
PS	Triangulaire	0	0.15	0.5	/
PB	Trapézoïdale	0.15	0.5	3.61	8.41

 TABLEAU 4.3 – Paramètres des Fonction d'appartenance d'entrée de($\tilde{\theta}$)

Fonctions d'appartenances de $\tilde{\psi}$

Ces fonctions sont illustrées par Figure (4.14) et les paramètres des fonctions d'appartenance d'entrée de $\tilde{\psi}$, sont donnés par Tableau 4.4.

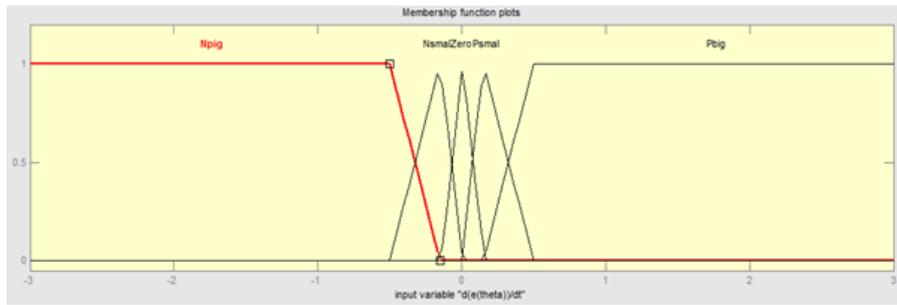


FIGURE 4.14 – Fonctions d’appartenances de la variable floue (dérivée de l’erreur de lacet $\dot{\psi}$)

$\dot{\psi}$	Type de fonction d’appartenance	Paramètre de la fonction d’appartenance			
NB	Trapézoïdale	-5.61	-3.69	-0.5	-0.15
NS	Triangulaire	-0.5	-0.15	0.00617	/
Z	Triangulaire	-0.15	0.00617	0.15	/
PS	Triangulaire	0	0.15	0.5	/
PB	Trapézoïdale	0.15	0.5	3.61	8.41

TABLEAU 4.4 – Paramètres des Fonction d’appartenance d’entrée de($\dot{\psi}$)

Règles d’inférences

Les 25 règles d’inférence de système takagi-suegeno du FLC sont enregistrées à l’aide du formulaire illustré par Figure (4.15). Ces règles sont illustrées dans Tableau 4.5.

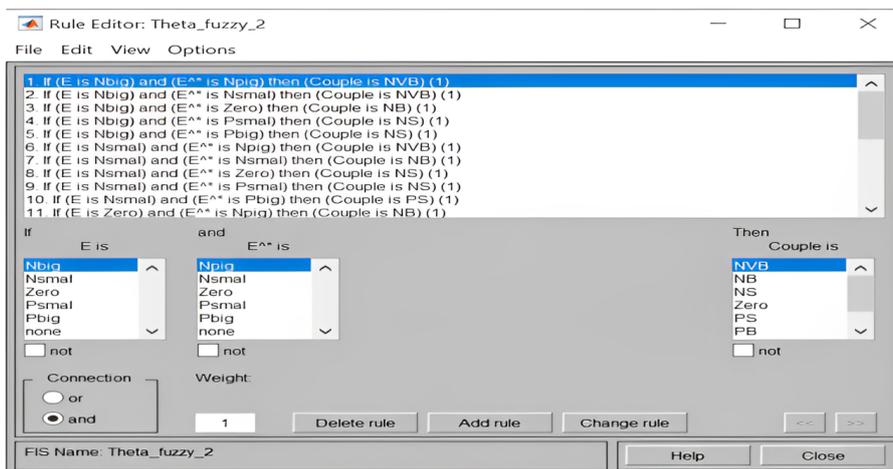


FIGURE 4.15 – Représentation des règles d’inférence de système takagi-suegeno.

$\tilde{\psi}/\tilde{\theta}$	$\tilde{\psi}/\tilde{\theta}$					
		NB	NS	Z	PS	PB
NB		NVB	NVB	NB	NS	PS
NS		NVB	NB	NS	PS	PS
Z		NB	NS	Z	PS	PB
PS		NS	NS	PS	PB	PVB
PB		NS	PS	PB	PVB	PVB

TABLEAU 4.5 – Règles d'inférence.

Règles d'inférences et fonctions d'appartenances des sortie (τ_q et τ_r)

La méthode utilisée pour déterminer les règles d'inférences dans la sortie est : Takagi-suegeno. Les deux fonctions de sorties τ_q et τ_r des FLC correspondant sont calculés de la manière suivante :

$$\tau_q = FLC(err\theta(t), err\dot{\theta}(t)) = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \mu_A(k_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_A(k_i)} \quad (4.4)$$

Avec :

$\mu_A(k_i)$: Le degré d'appartenance de la variable floue τ_q .

$i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

k_i : variable floue τ_q .

$k_i \in \{-200, -175, -100, 0, 100, 175, 200\}$.

Les sept classes utilisées dans la sortie τ_q du système de FLC 1 sont : NVB, NB, NS, Z, PS, PB, PVB.(voir Figure (4.16))

$$\tau_r = FLC(err\psi(t), err\dot{\psi}(t)) = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \mu_A(k_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_A(k_i)} \quad (4.5)$$

Avec :

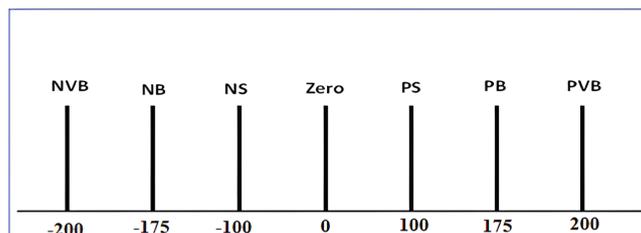
$\mu_A(k_i)$: Le degré d'appartenance de la variable floue τ_r .

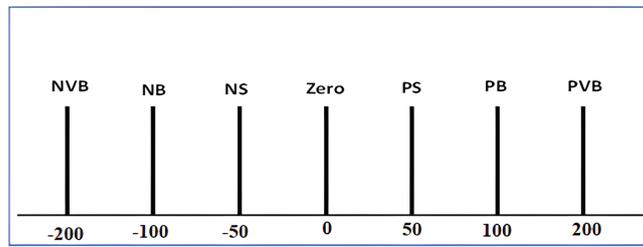
$i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

k_i : variable floue τ_r .

$k_i \in \{-200, -100, -50, 0, 50, 100, 200\}$.

Les sept classes utilisées dans la sortie τ_r du système de FLC 2 sont : NVB, NB, NS, Z, PS, PB, PVB. (voir Figure 4.17)


 FIGURE 4.16 – Fonctions d'appartenances de la sortie de la variable floue (τ_q)


 FIGURE 4.17 – Fonctions d'appartenance de la sortie de la variable floue (τ_r)

• Résultats des simulations

Les résultats de simulation obtenus sont représentés par les figures (4.18), (4.19) et (4.20).

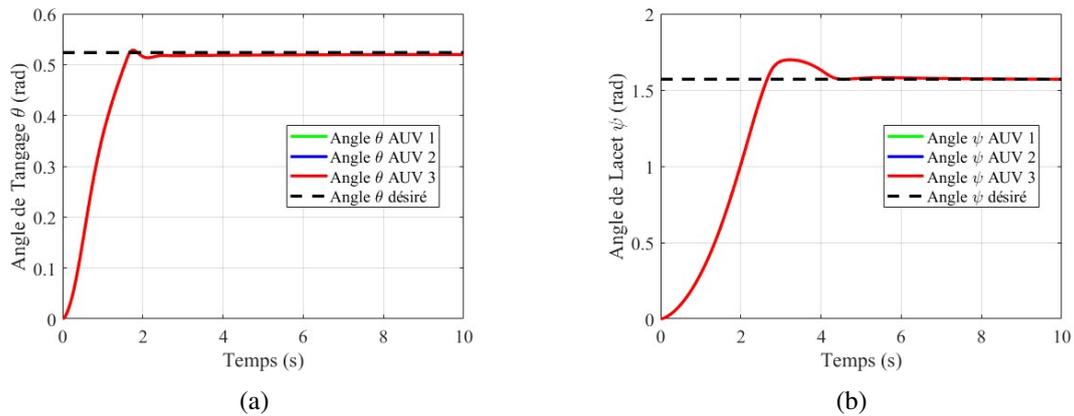


FIGURE 4.18 – Évolution des positions angulaires du multi-AUV avec correcteur flou, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet.

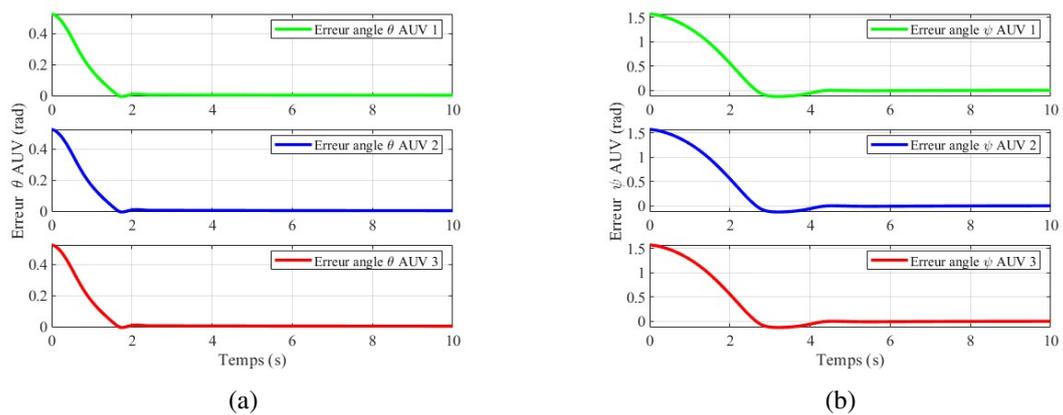


FIGURE 4.19 – Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec correcteur flou, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet.

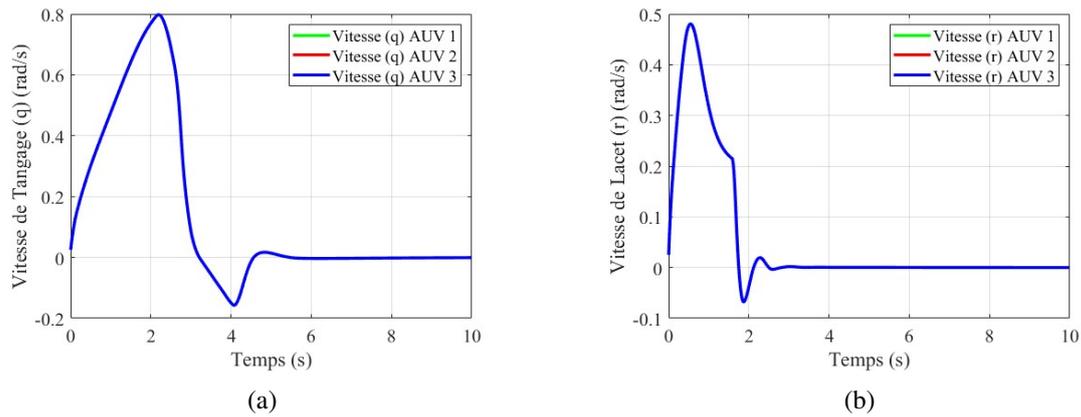


FIGURE 4.20 – Évolution des vitesses angulaires du multi-AUV avec correcteur flou, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet.

• Synthèse 3

En observant les figures (4.18, a) et (4.18, b), qui illustrent respectivement l'évolution des angles de tangage (θ) des trois AUV et des angles de lacet (ψ) de ces sous-marins, nous remarquons que les positions angulaires de tangage et de lacet des AUV convergent vers leurs valeurs désirées en régime permanent. Les figures (4.19, a) et (4.19, b) réaffirment ce résultat en montrant que les erreurs de régulation floue des sous-marins multiples tendent vers zéro en fin de tâche.

Les figures (4.20, a) et (4.20, b), illustrant respectivement les vitesses angulaires de tangage et celles de lacet, indiquent qu'après des variations observées en régime transitoire, ces vitesses deviennent nulles lorsque les positions angulaires de tangage et de lacet se stabilisent à des valeurs constantes.

Les résultats de simulation obtenus nous permettent de conclure que les contrôleurs P et FLC ont prouvé leur performance face aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

4.2.6 Comparaison entre PD et FLC

Nous avons utilisé les régulateurs PD et FLC afin de contrôler le lacet et le tangage du système multi-AUV. Les résultats obtenus de simulation ainsi obtenus vont nous servir pour faire une étude comparative entre les performances des deux lois de commande dont l'objectif principal est d'identifier le régulateur le plus approprié pour éliminer l'erreur statique, diminuer le dépassement et le temps de réponse, et obtenir une réponse satisfaisante du processus et de la régulation. Divers critères peuvent être utilisés pour évaluer l'efficacité d'un régulateur. Dans notre analyse, nous avons opté pour les critères suivants :

• Erreur quadratique moyenne (EQM)

C'est un indicateur statistique qui mesure la précision d'une méthode (commande PD ou FLC) en calculant la moyenne des carrés des erreurs de tangage ($\frac{1}{N} \sum_1^N \tilde{\theta}^2$) ou de lacet ($\frac{1}{N} \sum_1^N \tilde{\psi}^2$) avec N représente le nombre des itérations du programme Matlab.

• Précision

L'évaluation de la précision d'un système asservis revient à calculer les erreurs entre les valeurs désirées et celles mesurées une fois que le système asservis est stabilisé au régime permanent.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}$$

• Rapidité

La rapidité d'un système est définie par sa capacité à atteindre rapidement une valeur stable en sortie. Cette capacité est évaluée à travers le temps de réponse (t_{r_ψ}, t_{r_θ}), qui mesure le temps nécessaire pour que la sortie du système atteigne sa valeur finale à 5% de sa variation. Un régulateur est considéré comme plus rapide lorsque son temps de réponse est plus court.

• Taux de dépassement

Le taux de dépassement (D_ψ, D_θ) représente l'amplitude maximale des oscillations de la sortie par rapport à sa valeur finale en régime permanent.

Nous avons examiné les figures (4.6), (4.7), (4.18) et (4.19) pour calculer les différents paramètres du Tableau 4.6 qui représente une étude comparative entre les performances des contrôleurs PD et FLC en se basant sur les critères de comparaison cités ci-dessus.

	$\frac{1}{N} \sum_1^N \tilde{\psi}^2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}$	D_ψ	t_{r_ψ}	$\frac{1}{N} \sum_1^N \tilde{\theta}^2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}$	D_θ	t_{r_θ}
PD	0.026103	-2.9774×10^{-4}	0.277	0.78	0.0043554	9.9195×10^{-3}	0.195	1.72
FLC	0.00726	3.0409×10^{-4}	0.127	3.87	0.0032166	3.8691×10^{-3}	0.0047	1.54

TABLEAU 4.6 – Étude comparative entre les contrôleurs FLC et PD.

En analysant les résultats présentées dans le tableau 4.6, on peut constater que les performances acquises des deux régulateurs PD et FLC sont satisfaisants et assez similaire en régime permanent. Cependant, le régulateur flou présente quelques avantages par rapport au régulateur PD, tels que : une erreur quadratique moyenne plus petite ; une meilleure précision et un dépassement plus faible. En revanche, le FLC a un temps de réponse supérieur à celui obtenu en utilisant le régulateur PD.

4.2.7 Navigation de système multi-AUV en 3D

Nous allons étudier et simuler la navigation tridimensionnelle du système multi-AUV en utilisant une méthode de guidage par points de passage connue sous le nom de LOS (Line-Of-Sight en anglais), combinée à l'un des régulateurs PD ou FLC. Cette approche vise à garantir que les AUV poursuivent leur référence tout en accomplissant la mission désirée.

• Stratégie de guidage LOS pour le suivi de trajectoire en 3D

La stratégie de guidage LOS est la plus largement utilisée en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre [70].

La Figure 4.21 illustre le schéma de principe de la commande de suivi de trajet 3-D. L'ensemble des

points de passage désirés $P_d=(x_d, y_d, z_d)$ est la valeur d'entrée pour la structure de Contrôle. Les angles de Cap(lacet) et d'Assiette(tangage) souhaité sont obtenus à partir de la loi de guidage 3-D LOS (Line-Of-Sight : ligne de visée). Ensuite, le contrôleur FLC calcule les couples requis pour atteindre ces points de passage[71].

La stratégie de guidage LOS est basée sur un concept simple, qui consiste à aligner le véhicule avec une ligne imaginaire reliant sa position actuelle à la cible souhaitée. Si l'on suppose que l'AUV se déplace à une vitesse constante $u(t)$ l'angle de lacet désiré ψ_d pour la LOS bidimensionnelle peut être défini comme suit [71] :

$$\psi_d = \tan^{-1} \left(\frac{y_d(k) - y}{x_d(k) - x} \right) \quad (4.6)$$

L'idée pour le développement du système de guidage 3D est d'ajuster la profondeur souhaitée proportionnellement à la distance horizontale entre l'AUV et la cible. On suppose que l'AUV veut se déplacer de la position (x,y,z) à la position (x_d, y_d, z_d) . L'angle désiré entre la ligne de jonction et le plan horizontal (θ_d) peut être calculé comme suit (voir Figure 4.21)[71]

$$\theta_d = \tan^{-1} \left(\frac{z_d(k) - z}{\sqrt{(y_d(k) - y)^2 + (x_d(k) - x)^2}} \right) \quad (4.7)$$

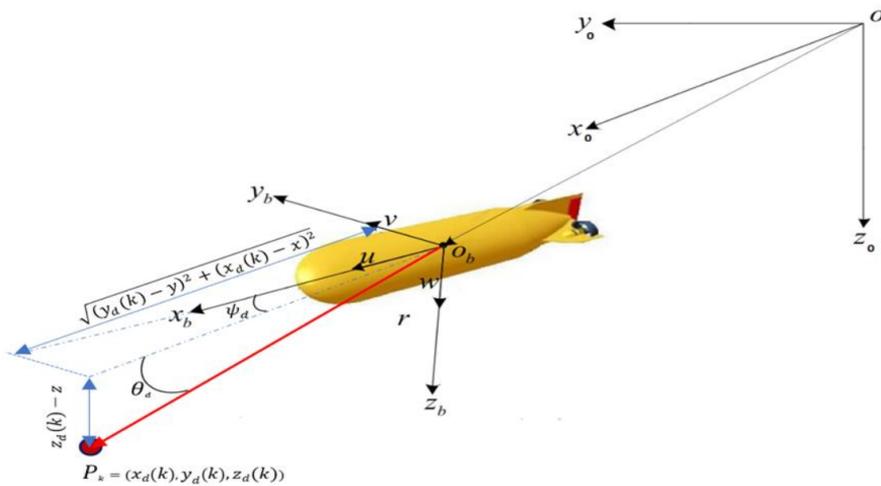


FIGURE 4.21 – Système de principe de la méthode de guidage LOS.[71]

Où $x_d(k), y_d(k), z_d(k); k = 1, 2, 3, \dots, N$ sont les coordonnées des N waypoints dans le plan XY , et $[x,y,z]$ est la position planaire de l'AUV au temps t .

Ensuite, la loi de guidage 3D LOS peut être définie en utilisant cet angle désiré (θ_d) et l'angle de cap désiré (ψ_d) calculé à partir de la LOS bidimensionnelle[71].

• Application de la stratégie LOS pour le suivi de trajectoire 3D

Afin d'évaluer les performances du système de guidage tridimensionnel proposé, un modèle de simulation a été développé. Dans cette simulation, la position de chaque véhicule à un instant t est calculé à partir des équations dynamiques décrites dans le chapitre 2. Les résultats numériques sont obtenus en utilisant les valeurs des paramètres données dans Annexe. La vitesse de déplacement de

chaque AUV est supposée constante, $u=U$.

- Les points de passage des trajectoires du multi-AUV

AUV leader :

$$P_d(k) = \{(25, 10, 0); (75, 20, -10); (100, -30, -10); (50, -50, -7.5); (0, 0, -1)\}$$

AUV suiveur :

$$P1_d(k) = \{(25, 10, 10); (75, 20, 0); (100, -30, 0); (50, -50, 2.5); (0, 0, 9)\}$$

$$P2_d(k) = \{(25, 10, -10); (75, 20, -20); (100, -30, -20); (50, -50, -17.5); (0, 0, -11)\}$$

-Les conditions initiales

$$\text{leader} : P_d(0) = [0, 0, -1]; \theta = 0; \psi = 0; u = 0; v = 0; w = 0; q = 0; r = 0;$$

$$\text{suiveur1} : P1_d(0) = [0, 0, 9]; \theta = 0; \psi = 0; u = 0; v = 0; w = 0; q = 0; r = 0;$$

$$\text{suiveur2} : P2_d(0) = [0, 0, -11]; \theta = 0; \psi = 0; u = 0; v = 0; w = 0; q = 0; r = 0;$$

• Navigation autonome d'un AUV

Le fonctionnement général de la navigation de chaque AUV en utilisant la méthode de guidage LOS et un des contrôleurs FLC ou PD est illustré par l'organigramme donné par Figure (4.22) .

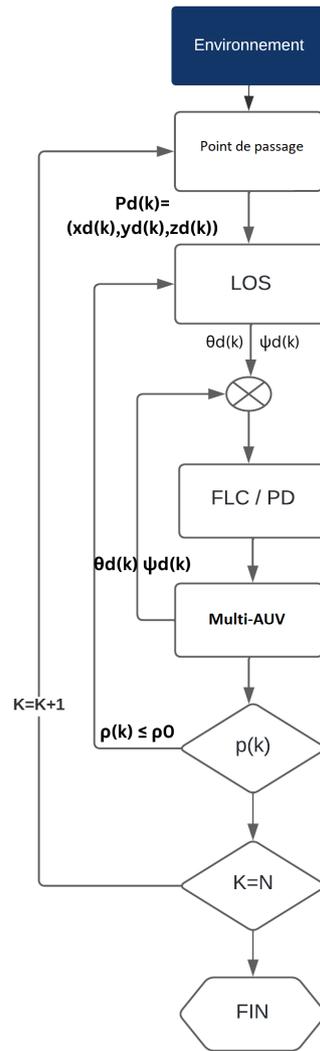


FIGURE 4.22 – Organigramme de la planification de trajectoire.

4.2.8 Navigation en 3D du multi-AUV en utilisant LOS basé sur FLC

Nous avons simulé la navigation du système multi-AUV en 3 D en utilisant la méthode de guidage LOS associé à la commande par logique floue. La technique LOS permet de planifier les trajectoires de références de chaque AUV en passant par des points de passages prédéfinis et de déterminer les valeurs désirées des angles de tangage et des angles de lacet. La distance entre les trajectoires de références de chaque AUV selon l'axe (OZ) est égale à 10 mètres. La commande FLC est utilisée ensuite pour assurer la poursuite des sous-marins à leurs références.

Les résultats de simulation ainsi obtenus sont illustrés par les Figures (4.23), (4.24), (4.25), (4.26), (4.27) et (4.28).

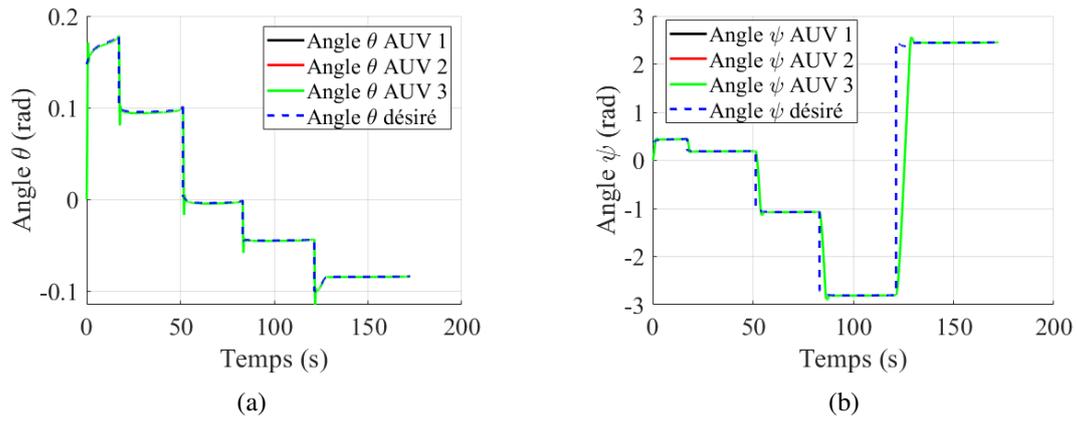


FIGURE 4.23 – Poursuite des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur flou, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet

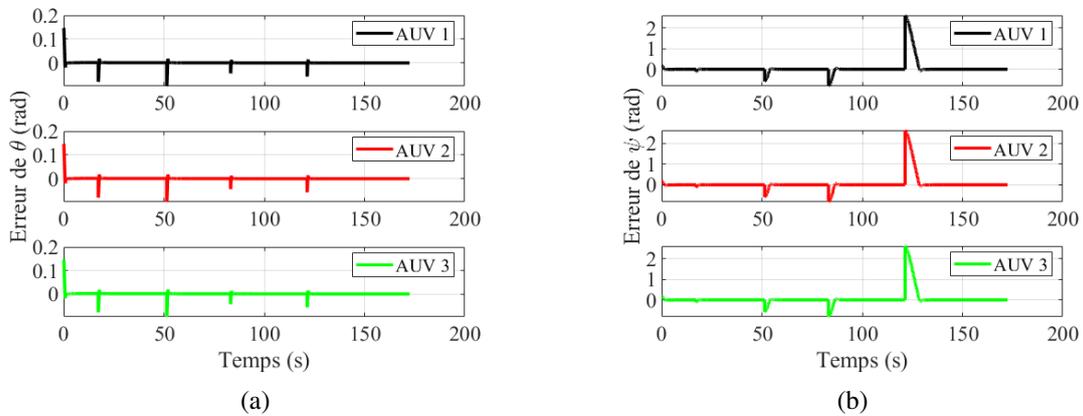


FIGURE 4.24 – Erreurs de poursuite du Multi-AUV avec contrôleur flou, (a) : Erreurs de tangage, (b) : Erreurs de Lacet

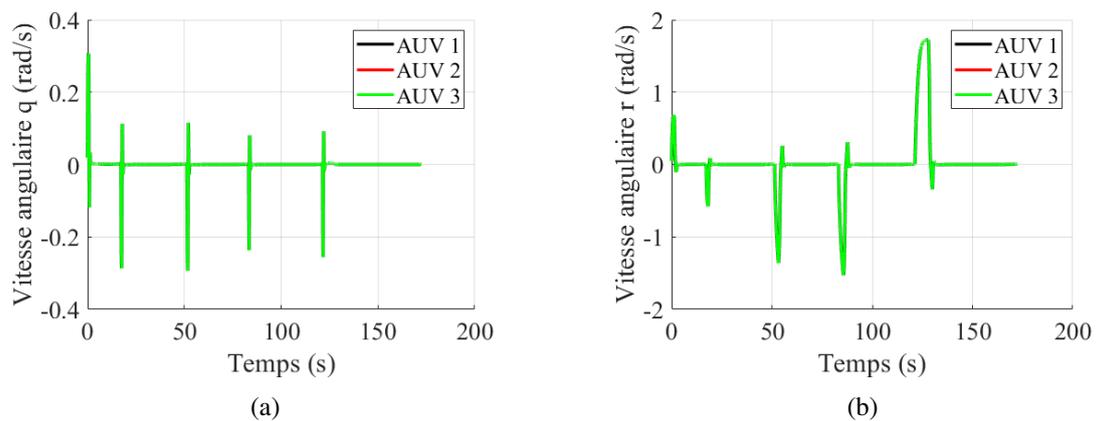


FIGURE 4.25 – Poursuite des vitesses angulaires du multi-AUV avec contrôleur flou, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet

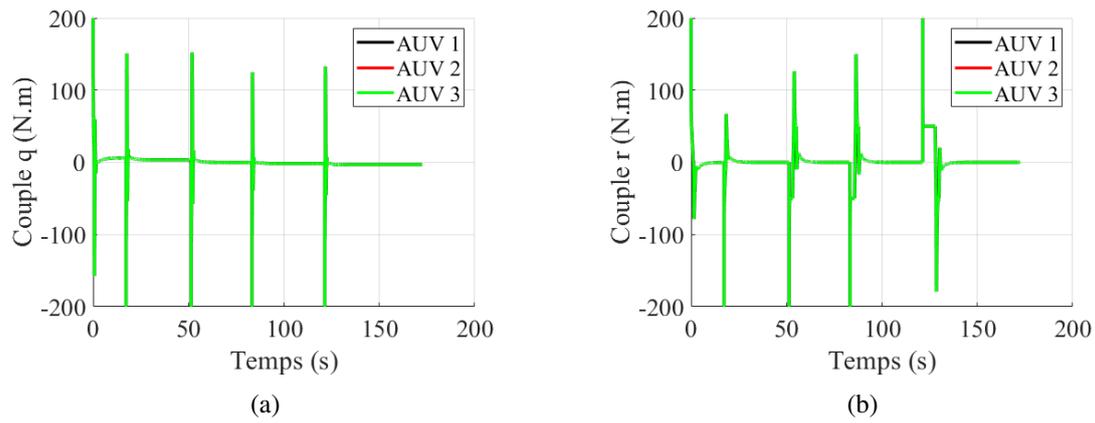


FIGURE 4.26 – Couple de la commande floue, (a) couple de tangage, (b) couple de lacet.

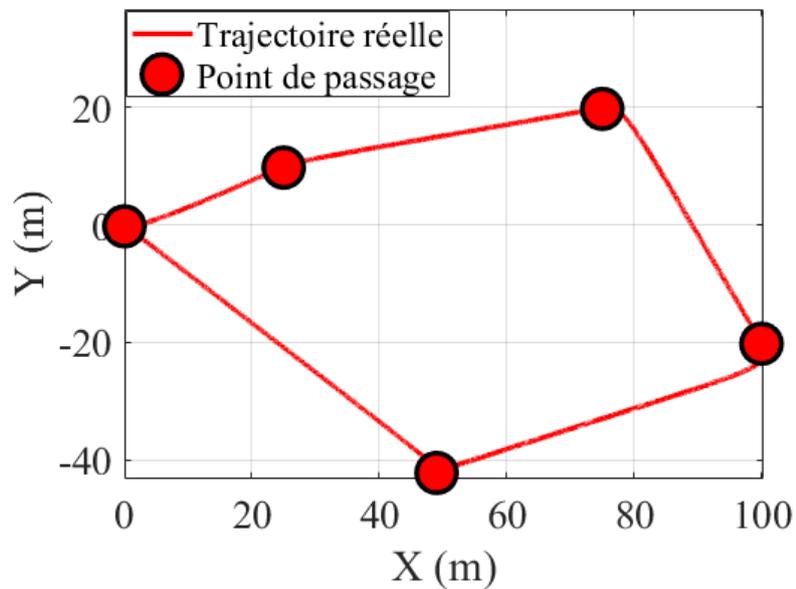


FIGURE 4.27 – Navigation du multi-AUV en 2D avec contrôleur floue et LOS

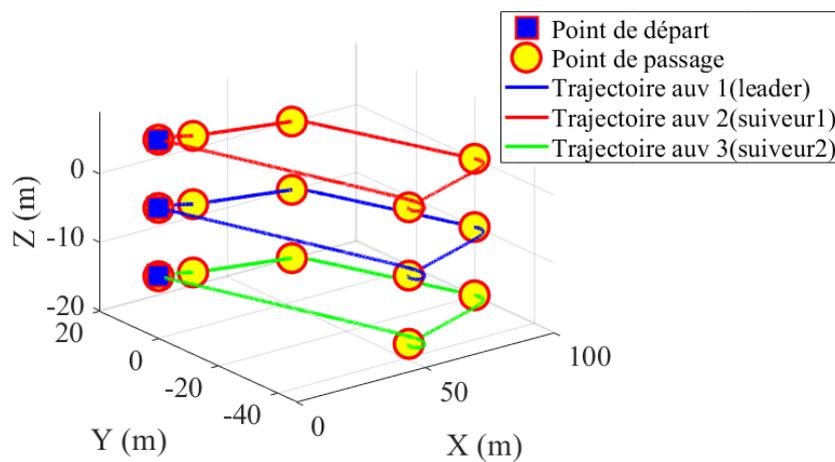


FIGURE 4.28 – Navigation du multi-AUV en 3D avec contrôleur floue et LOS

• Synthèse 4

En examinant les figures (4.23, a) et (4.23, b), qui illustrent respectivement la poursuite des angles de tangage (θ) des trois AUV et des angles de lacet (ψ) de ces sous-marins, nous remarquons une bonne poursuite des positions angulaires à leurs références sauf à $t=130s$ qui correspond au 4ème point de passage, les angles ψ ont mis du temps ($t= 5s$) pour rejoindre leurs références. Les figure (4.24, a) et (4.24, b), confirment les résultats obtenus et à partir de figure (4.24, b) on constate une augmentation des erreurs de poursuite de lacet autour de $t=130s$ et elles atteignent 2.5 rad. Cet instant correspond à un changement important de l'angle de lacet.

Les figures (4.25, a) et (4.25, b), montrant respectivement les vitesses angulaires de tangage et celles de lacet indiquent que les valeurs de ces vitesses augmentent lorsque les AUV passent par les points de passages. On remarque aussi à partir de Figure (4.25, b) qu'à $t=130s$, la vitesse de lacet atteint son maximum 1.7 rad/s.

Les figures (4.26, a) et (4.26. b) montrent que les couples moteurs de tangage et de lacet respectent leurs limites physiques entre (-200N.m) et (200N.m).

La figure (4.27) montre la navigation d'un AUV en 2D en passant par les points de passages. On remarque que l'AUV suit parfaitement son trajet désiré.

La figure (4.28) montre la navigation du système multi-AUV en 3D en utilisant les méthodes de guidage LOS pour planifier les trajectoires désirées et la commande floue pour corriger la poursuite de ces engins à leurs références.

Nous pouvons conclure que le système multi-AUV a pu réaliser sa mission avec succès grâce au régulateur flou. Néanmoins, ce dernier perd sa robustesse vis-à-vis la poursuite de lacet lorsque qu'il y a un changement d'orientation de lacet avec un angle important de -2.9 rad à 2.9 rad.

4.2.9 Navigation en 3D du multi-AUV en utilisant LOS basé sur PD

Nous avons simulé ensuite la navigation du système multi-AUV en 3D en utilisant la méthode de guidage LOS et la commande PD. La méthode LOS planifie les trajectoires de chaque AUV à travers des points de passage choisis et détermine les positions angulaires souhaitées de tangage et celles de lacet, avec une distance de 10 mètres entre les trajectoires sur l'axe (OZ). La commande PD garantit ensuite que les sous-marins suivent ces trajectoires de référence et réalise sa mission correctement.

Les résultats de simulation ainsi obtenus sont illustrés par les Figures (4.29), (4.30), (4.31), (4.32), (4.33) et (4.34).

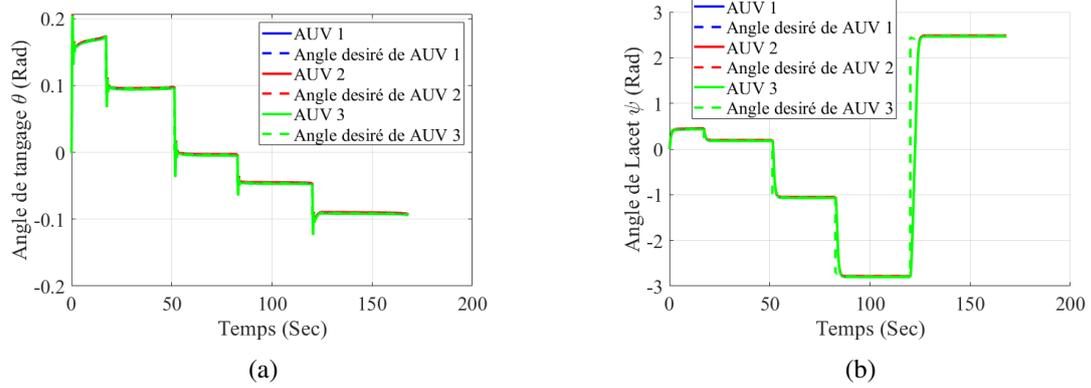


FIGURE 4.29 – Poursuites des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Angles de tangage, (b) Angles de lacet

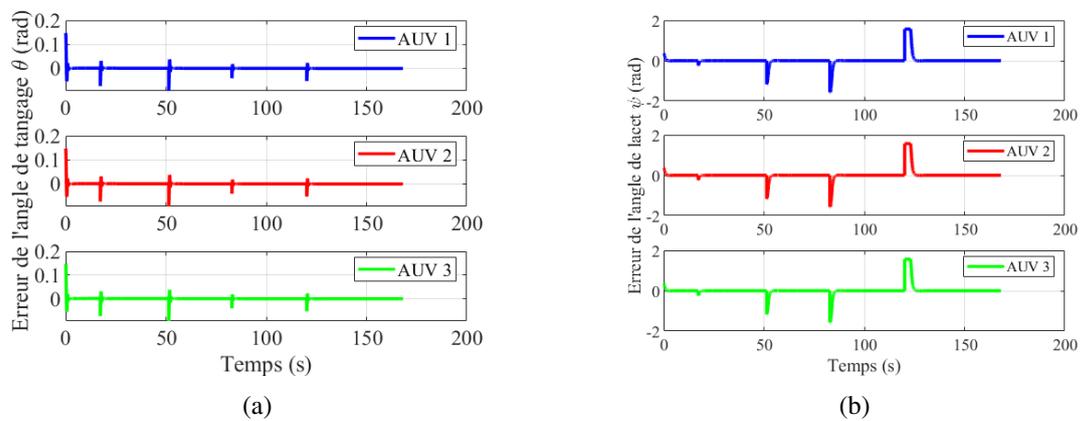


FIGURE 4.30 – Erreurs de poursuite des positions angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Erreurs de tangage, (b) Erreurs de lacet

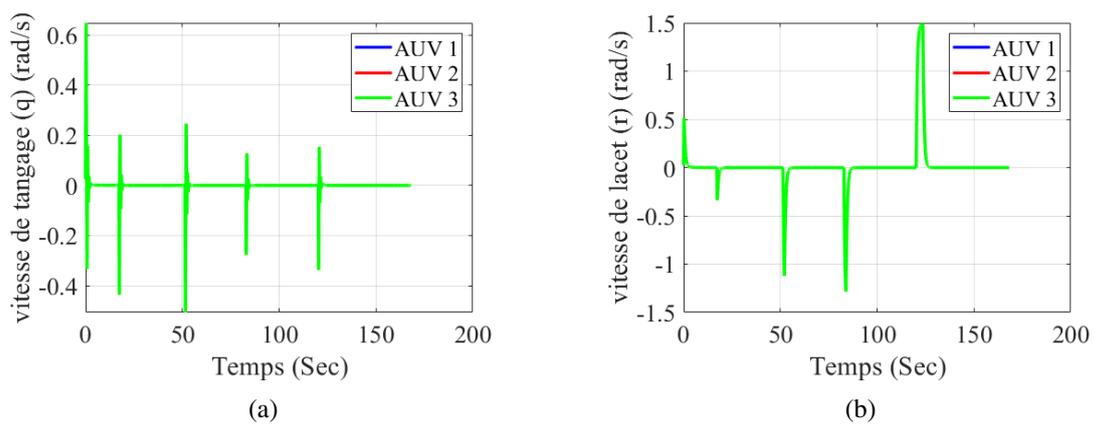


FIGURE 4.31 – Poursuites des vitesses angulaires du multi-AUV avec contrôleur PD, (a) Vitesses Angulaires de tangage, (b) Vitesses Angulaires de lacet

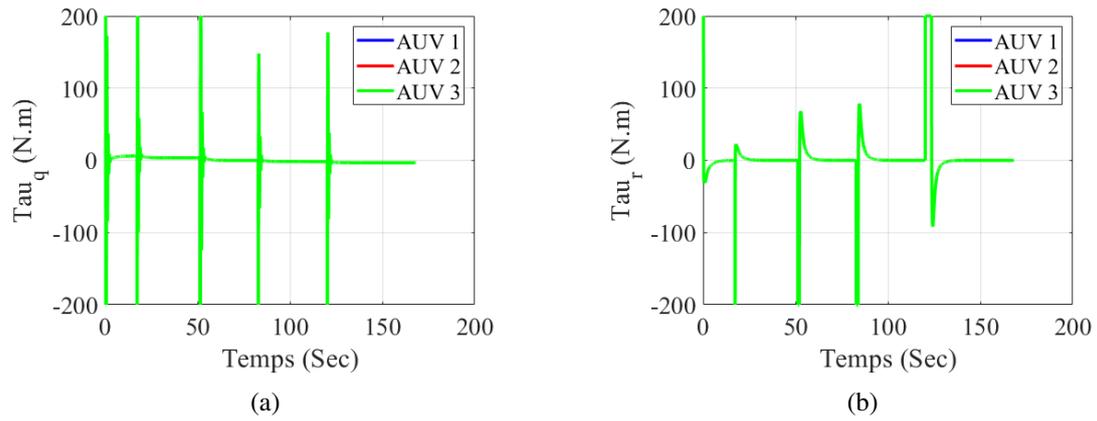


FIGURE 4.32 – Couple de la commande PD, (a) couple de tangage, (b) couple de lacet.

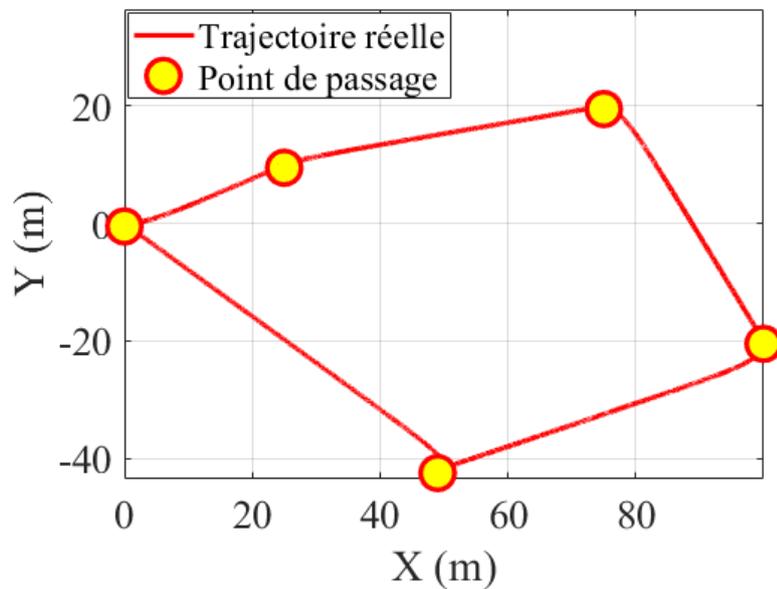


FIGURE 4.33 – Navigation du multi-AUV en 2D avec PD et LOS

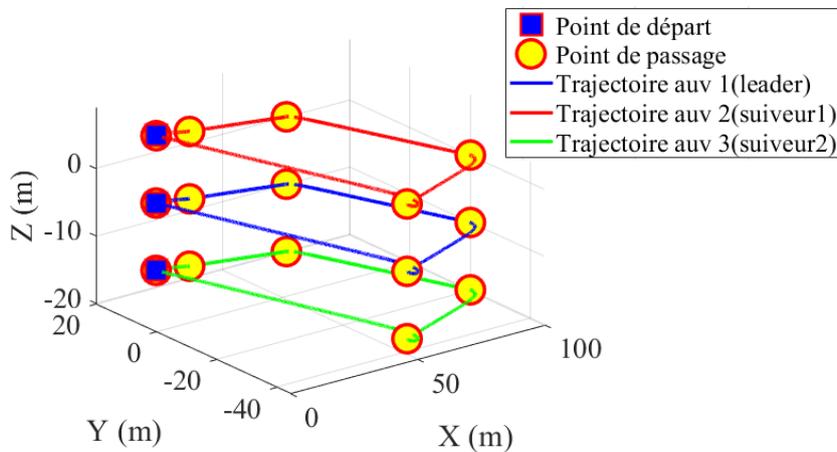


FIGURE 4.34 – Navigation du multi-AUV en 3D avec PD et LOS

• Synthèse 5

D'après les résultats de simulation obtenus dans ce cas, nous pouvons relever les mêmes constatations, données au Synthèse 4, lors de l'application de la commande floue. Cependant, nous remarquons une amélioration remarquable par rapport à la poursuite des positions et des vitesses des angles de lacet et de tangage (voir Figures (4. 29, a), (4.29.b), (4.31, a) et (4,31, b)) où les erreurs de poursuite correspondantes donnée par les figures (4.30, a) et (4.30,b) sont diminuées surtout à $t=130$ s .

Les figures (4, 32, a) et (4.32,b) montrent que les couples de tangage et de la cet des AUV ne dépassent pas leurs valeurs nominales.

Les figure (4,33) et (4,34) montrent une bonne navigation du multi-AUV en 2D et en 3D.

4.3 Conclusion

Les schémas de commandes FLC et PD développés dans le chapitre précédent ont été exploité dans ce présent chapitre. Ces contrôleurs ont été appliqué au premier lieu au système multi-AUV en présence des incertitudes et des perturbations et cela dans le but de régler les positions et les vitesses angulaires de tangage et de Lacet de chaque AUV. Une étude comparatives a eu lieu ensuite afin de comparer les performances de chaque contrôleur.

Nous avons démontré ensuite l'efficacité du contrôleur flou ou PD dans la résolution du défi de la navigation du sous-marin multiple en 3D en passant pas plusieurs points de passage en utilisant la méthode de guidage LOS dont le principe est de générer automatique les points de passage reliant la position initiale à la position finale et d'aligner le véhicule le plus près possible sur une droite imaginaire reliant la position de véhicule et les autres points de passage.

Les résultats de simulation confirment également l'efficacité de notre méthode.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire, nous avons évoqué les problèmes de la modélisation, la commande et la navigation d'un système multi-AUV. Ce dernier doit accomplir sa mission avec plus de précision.

Dans le premier chapitre, des généralités sur les robots sous-marins ont été exposées, allant de leur historique à leurs classifications et leurs domaines d'application. Nous avons fait, ensuite, un tour d'horizon sur les véhicules sous-marins autonomes (AUV) en attirant l'attention sur les robots multi-AUV qui font l'objet de ce manuscrit.

Dans le deuxième chapitre, nous avons établi différentes équations mathématique afin de déterminer les modèles cinématique et dynamique compatible gouvernant le mouvement de l'AUV. Le modèle dynamique obtenu est nonlinéaire, fortement couplé et sous-actionné.

Dans le troisième chapitre, la théorie des lois de commandes a été donnée en se limitant aux contrôleurs Proportionnel Dérivé et la commande par logique floue dont le premier contrôleur PD nécessite la connaissance du modèle à régler, tandis que la commande FLC n'exige pas de modèle et qui est une technique permettant une représentation précise et très proche du modèle de raisonnement de l'humain. La flexibilité et la simplicité de la logique floue ont fait un domaine de recherche très actif pour de nombreux chercheurs au cours des dernières décennies.

Dans le quatrième chapitre, nous avons validé les lois de commande PD et FLC en les appliquant à un système multi-AUV. Nous avons fait ensuite une étude comparative entre les performances acquises de chaque régulateur. Des tests de simulations ont été faits en tenant compte des incertitudes paramétriques et des perturbations qui affectent le système. Nous avons démontré ensuite la faisabilité d'utiliser un contrôleur flou ou PD pour la navigation des sous-marins multiples en 3D à l'aide de la méthode de guidage LOS, qui génère automatiquement des points de passage entre la position initiale et la position finale. Les résultats de simulation confirment l'efficacité des schémas de commande adoptés.

Bien entendu, ce travail est loin d'être terminé et plusieurs points restent à examiner. En voici quelques-uns :

- La validation des commandes utilisées en les appliquant sur un prototype réel.
- L'utilisation d'une méthode d'optimisation simple et efficace afin de déterminer les gains des commandes adoptées dans ce mémoire.
- L'introduction de l'aspect adaptatif aux commandes appliquées au système multi-AUV dans ce travail afin d'assurer la robustesse .
- La planification de trajectoire en temps réel qui est un défi majeur dans les environnements sous-marins, qui sont dynamiques et imprévisibles.
- L'intégration de l'apprentissage automatique pour améliorer la performance des AUVs dans des environnements inconnus en leur permettant d'apprendre à partir de leurs expériences passées.
- la gestion de l'énergie en utilisant des algorithmes pour optimiser la consommation d'énergie tout en accomplissant la mission.
- La détection d'obstacles avancée en utilisant des capteurs avancés tels que les caméras et les capteurs de pression pour la prise en compte des incertitudes liées à la perception de l'environnement.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Y.Huang, Y. Li, J.C.Yu, S.Li, and X.S.Feng. "State of the Art and Development Trends of AUV Intelligence".*Robot.* N 42(2), pp :215–231, 2020.
- [2] G.Pararas. "Turtle : a Revolutionary Submarine".*Sea Frontiers.* N 22(4), pp :234–242, 1976.
- [3] S.Lake. "The Submarine in War and Peace : Its Developments and Possibilities". 1918.
- [4] G. W.Garrett. "The Resurge : The First Practical Steam-Powered Submarine".*The Engineering Journal.* N 12(4), pp :210–215, 1879.
- [5] C.Blair. "Silent Victory ".*The Naval Institute Press, Vol.1.* 2001.
- [6] F. Hover. "Autonomous Underwater Vehicles (AUV's)".*Technical Report, Draft of Maneuvering Committee, 23rd Int. Towing Tank Conference, Venice, Italy.* 2002.
- [7] D.W. French. "Analysis of Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Architectures and an Assessment of UUV Integration into Undersea Applications". *Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California,* 2010.
- [8] L. Fournet. "Positionnement d'engins autonomes grands fonds : État de l'art et perspectives".*Rapport technique, Conservatoire national des arts et métiers, École supérieur des géomètres et topographes.* 2002.
- [9] S. A.Santos. "Contribution a la conception des sous-marins autonomes : Architecture des actionneurs, architecture des capteurs d'altitude, et commandes références capteurs".*PhD thèse,Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.* 1995.
- [10] T.Curtin, J. Bellingham, J.Catipovic, and D.Webb. "Autonomous Oceanographic Sampling Networks".*Oceanography.* N 6(6), 1993.
- [11] G. Griffiths. "Ocean Science Applications for Autonomous Underwater Vehicles - the work plan for autosub-1 for 1997-2000 and beyond".*Unmanned Underwater Vehicle Showcase.* N 9, pp :24–25, 1997.
- [12] J.Heidemann, M.Stojanovic, and M.Zorzi. "Underwater Sensor Networks : Applications, Advances and Challenges".*Philosophical Transactions.* N 37, pp :1–20, 2012.
- [13] W. W.Au, P. E.Nachtigall, and J. L.Pawloski. "Acoustic Effects of the Atoc Signal (75 hz, 195 db) on Dolphins and Whales".*Journal of the Acoustical Society of America.* N 101(1), pp :2973–2977, 1997.
- [14] X.Che, I.Wells, G.Dickers, and al. "Reevaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks".*Communications Magazine IEEE.* N 48(12), pp :143–151, 2010.
- [15] J. H. Smart. "Underwater Optical Communication Systems Part 2 : Basic Design Considerations".*In Proc. IEEE MILCOM,*pp :1700-1705. 2005.
- [16] W.Nailong, L.Guijie, X. Meng, and L. Sile. "Arrangement and Simulation Study on AUV Thruster".*Periodical of Ocean University of China.* 2012.
- [17] A.Naddi and A.Mazlan. "A Fully Actuated Tail Propulsion System for a Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle". *Master's thesis, School of Aerospace Sciences, University of Glasgow,* 2015.

- [18] "Ecomapper autonomous underwater vehicle". <http://www.ysisystems.com/productsdetail.php?EcoMapper/Underwater-Vehicle-9>, 2009.
- [19] "Aster-x". <http://flotte.ifremer.fr/Presentation-de-la-flotte/Systemes-sous-marins/AUV->, 2009.
- [20] T. I. Fossen. "Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles". PhD thesis, Norwegian Institute of Technology. 1994.
- [21] D. M. Fratantoni and S. H. D. Haddock. "Introduction to the Autonomous Ocean Sampling Network Program (AOSN-II)". *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*. N 56(3-5), pp :61–61, 2009.
- [22] T. L. Killeen. "Ocean Observatories Initiative (OOI) : Advanced Research Tools For the Ocean Sciences". *Marine Technology Society Journal*. N 44(6), pp :15–17, 2010.
- [23] M. Royo and al. "Impossible Metals de Monstrates its Supercareful Seabed Mining Robot". *New Atlas*, 2022.
- [24] B. Jalving. "The Andrea AUV Height Control System". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. N 19(4), 1994.
- [25] T. Prestero. "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation model for the Remus autonomous underwater vehicle". Master's thesis, Massachusetts Institute Of Technology, 2001.
- [26] L. Lapierre and D. Soetanto. "Nonlinear Path Following Control Of an AUV". *Ocean Engineering*. N 34(11), pp :1734–1744, 2007.
- [27] A. Safaei and M. Nasiruddin. "Application of the Optimal Adaptive Model Free Control Algorithm on an Autonomous Underwater Vehicle". In *International Conference on Automation, Robotics, Computing, Control and Compressed Sensing*, pp :346-350. 2018.
- [28] J. M. Spiewak. "Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes". PhD thesis, Université de Montpellier II . 2007.
- [29] R. Cristi, A. Papoulis-Fotis, and J. Healey. "Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicles in The Dive Plane". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. N 15(3), 1990.
- [30] H. Akcakaya and al. "Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicle". In *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. 2009.
- [31] A. R. Marzbanrad, M. Eghtesal, and R. Kaurali. "A Robust Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Trajectory Tracking of ROV's". In *Decision and Control and European Control Conference*. IEEE, 2011.
- [32] A. Simon. "Depth Control of Micro Autonomous Underwater Vehicles (AUV) : Simulation and Experimentation". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014.
- [33] H. Ismail and W. Vina. "Second Order Sliding Mode Control Scheme for an Autonomous Underwater Vehicle with Dynamic Region Concept". *Mathematical Problems in Engineering*. 2015.
- [34] J. González-García and al. "Experimental Validation of a Model-Free High-Order Sliding Mode Controller with Finite-Time Convergence for Trajectory Tracking of Autonomous Underwater Vehicles". *Sensors*. N 22(488), 2022.
- [35] A. Nay, S. Singh Patel, and S. A. Akbar. "Fuzzy Logic Based Depth Control of an Autonomous Underwater Vehicle". In *International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing*, pp :7-123. 2013.
- [36] K. Liu, Y. Zhao, and X. Liang. "Tuning Neuro-Fuzzy Controller by Real Code Genetic Algorithm with Application to an Autonomous Underwater Vehicle Control System". In *Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*, pp :728-731. 2013.
- [37] H. Schmidt, W. L. Fox, A. Maguer, and al. "Generic Oceanographic Array Technologies Static Seabed Scattering Measurements Using Autonomous Underwater Vehicles". *GOATS'98*. 1998.
- [38] J. Kalwa. "The GrexProject : Coordination and Control of Cooperating Heterogeneous Unmanned Systems in Uncertain Environments". In *Oceans*, pp :1-9. 2009.

- [39] Y.Liao. "Japanese Arena Plan".Ship Boat. N 4, pp :20–25, 2005.
- [40] E.Fiorelli, N. E.Leonard, P.Bhatta, D. A.Paley, R. Bachmayer, and D. M.Fratantoni. "Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey bay".IEEE Journal of Oceanic Engineering. N 31(4), pp :935–948, 2006.
- [41] S.Yu and J. C.Barca. "Autonomous Formation Selection for Ground Moving Multi-Robot Systems".IEEE International Conference,In Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp :54–59. 2015.
- [42] T.Balch and R. C.Arkin. "Behavior Based Formation Control for Multi-Robot Teams".IEEE Transactions on Robotics Automation. N 14(6), pp :926–939, 1998.
- [43] D. M.Lyons and al. "Performance Verification for Behavior Based Robot Missions".IEEE Transactions on Robotics. N 31(3), pp :619–636, 2017.
- [44] M. A.Lewis and K. H.Tan. "High precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures".Autonomous Robots. N 4(4), pp :387–403, 1997.
- [45] W.Ren and R. W.Beard. "Formation Feedback Control for Multiple Spacecraft Via Virtual Structures".Control Theory and Applications, IEEE Proceedings. N 151(3), pp :357–368, 2004.
- [46] G. P.Min, J. H.Jeon, and C. L.Min. "Obstacle Avoidance for Mobile Robots Using Artificial Potential Field Approach With Simulated Annealing".In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE,Vol. 3, pp :1530-1535 . 2001.
- [47] C. L.Min and G. P.Min. "Artificial Potential Field Based Path Planning For Mobile Robots Using a Virtual Obstacle Concept".In IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp :735-740. 2003.
- [48] O.Khatib. "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots".In Autonomous Robot Vehicles, pp :500-505. Springer New York, 1986.
- [49] L.Consolini, F.Morbidi, D. Prattichizzo, and al. "Leader-Follower Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Input Constraints".Automatica. N 44(5), pp :1343–1349, 2008.
- [50] F. Morbidi, G. L.Mariottini, and D.Prattichizzo. "Observer Design Via Immersion and Invariance for Vision Based Leader-Follower Formation Control".Pergamon Press, Inc. 2010.
- [51] J.Chen, D.Sun, J. Yang, and al. "Leader-Follower Formation Control of Multiple Non Holonomic Mobile Robots Incorporating a Receding Horizon Scheme".International Journal of Robotics Research. N 29(6), pp :727–747, 2010.
- [52] D.Edwards, T.Bean, D. Odell, and M.Anderson. "A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations".IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, pp :40-46. 2004.
- [53] X.Cao and L.Guo. "A Leader-Follower Formation Control Approach for Target Hunting by Multiple Autonomous Underwater Vehicles in Three Dimensional Underwater Environments".International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019.
- [54] T.I.Fossen. "Guidance and Control of Ocean Vehicles",Vol. 199,Wiley New York. 1994.
- [55] J.Yang, J. Wu, and Y.Ming. "Backstepping Method and its Applications to Nonlinear Robust Control".Control and Decision. N 17, pp :641–653, 2002.
- [56] F.H.Imlay. "The Complete Expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid".Technical Report. 1961.
- [57] T.I.Fossen. "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control".JohnWiley & Sons, Ltd,Chichester, UK. 2011.
- [58] W.Khalil and E.Dombre. "Modélisation Identification et Commande des Robots".Hermes Science,2éme Edition. 1999.
- [59] T. I.Fossen. "Nonlinear modeling and control of Underwater Vehicles".PhD thesis,Norwegian Institute of Technology. 1994.
- [60] D. Humphreys and K.Watkinson. "Prediction of Acceleration Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles from Geometric Parameters".Technical Report. 1978.

- [61] H.Yu, C.Guo, and Z.Yan. "Globally Finite-Time Stable Three-Dimensional Trajectory-Tracking Control of Underactuated UUVs".*Ocean Engineering*. N 189, 2019.
- [62] X.Liang, X.Qu, Y.Hou, and Q.Ma. "Three-Dimensional Trajectory Tracking control of an Underactuated Autonomous Underwater Vehicle Based on Ocean Current Observer".*International Journal of Advanced Robotic Systems*. N 15(5), 2018.
- [63] S.Emrani, A.Dirafzoon, H.A.Talebi, S.K. Yadavar Nikravesh, and M.B. Menhaj. "An Adaptive Leader-Follower Formation Controller for Multiple AUVs in Spatial Motions".*Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*. 2013.
- [64] LUDO. "Définition d'une régulation PID". <http://www.radiateur-electrique.org>, 2024.
- [65] L. Baghli. "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de logique floue, réseaux de neurones et les algorithmes génétiques".*Phd thesis, Université de Nancy*. 2003.
- [66] Ying Bai and Dali Ang. "Fundamentals of Fuzzy Logic Control Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications".In *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, pp :17-36,*Springer*. 2006.
- [67] O. Maamri and I. Khalil. "Développement d'une commande vectorielle d'une machine asynchrone par la logique floue".*Mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état en électronique Master, Université Kasdi Merbah Ouargla*. 2007.
- [68] B. Kosko. "Neural Networks and Fuzzy Systems : A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence".*Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J*. 1991.
- [69] S.Gentil. "Intelligence Artificielle Appliquée à l'Automatique".*Techniques de l'ingénieur, Traité Mesures et Contrôle*. 1996.
- [70] W. Naeem, R. Sutton, S. M. Ahmad, and R. S. Burns. "A Review of Guidance Laws Applicable to Unmanned Underwater Vehicles".*Journal of Navigation*. N 56(1), pp :15–29, 2003.
- [71] M. Chergui. "Planification de Trajectoire et Contrôle d'un Véhicule Sous-Marin Autonome (AUV) pour l'évitement des obstacles stationnaires".*Memoire de Master, Ecole Supérieure des Transmissions, Ministère de la Défense Nationale*. 2023.

ANNEXE

ANNEXE A

A Paramètres du Robot sous-marin autonome de forme cylindrique

A.1 Paramètres inertiels

Paramètre	Valeurs	Unités
x_G	0	m
y_G	0	m
z_G	0.01	m

TABLEAU A.1 – Centre de gravité

Paramètre	Valeurs	Unités
I_{xx}	0.1770	Nms^2
I_{xy}	0.0000	Nms^2
I_{xz}	0.0000	Nms^2
I_{yx}	0.0000	Nms^2
I_{yy}	3.4500	Nms^2
I_{yz}	0.0000	Nms^2
I_{zx}	0.0000	Nms^2
I_{zy}	0.0000	Nms^2
I_{zz}	3.4500	Nms^2

TABLEAU A.2 – Paramètres inertiels

Paramètre	Valeurs	Unités
m_{11}	215	kg
m_{22}	265	kg
m_{33}	265	kg
m_{55}	80	kg
m_{66}	80	kg

TABLEAU A.3 – Les termes des masses

A.2 Les paramètres hydrodynamiques

Paramètre	Valeurs	Unités
X_u	70	kg/s
Y_v	100	kg/s
Z_w	100	kg.m ² /s
M_q	50	kg.m ² /s
N_r	50	kg.m ² /s

TABLEAU A.4 – Les termes de coefficient hydrodynamique de trainée linéaire

Paramètre	Valeurs	Unités
X_{uu}	100	kg/m
Y_{vv}	200	kg/m
Z_{ww}	200	kg/m
M_{qq}	100	kg/m
N_{rr}	100	kg/m

TABLEAU A.5 – Les termes de coefficient hydrodynamique de trainée quadratique

A.3 Autre paramètres

Paramètre	Valeur	Unité	Description
m	185	kg	Masse de l'AUV
W	1813	N	poids de l'AUV
B	1813	N	Flottabilité de l'AUV
z_G	0.01	m	Position du centre de gravité selon l'axe z
z_B	-0.01	m	Position du centre de flottabilité selon l'axe z

TABLEAU A.6 – Autre paramètres

Résumé

Ces dernières années, les systèmes multi-AUV ont connu un intérêt croissant dans l'exploration des océans grâce à leurs nombreux avantages, notamment leur efficacité, leur faible coût et leur haute tolérance aux capteurs économiques. Le contrôle de formation est devenu un axe important dans la communication sous-marine, contrairement aux systèmes multi-agents terrestres ou aériens. Ce mémoire se concentre sur la conception d'un système multi-AUV composé de trois véhicules : un leader et deux suiveurs, qui doivent suivre une trajectoire de référence identique tout en maintenant une certaine distance entre eux. Notre contribution commence par l'attribution à chaque AUV un modèle cinématique et dynamique compatible. Deux stratégies de commande sont ensuite proposées, à savoir : la commande proportionnelle dérivée (PD) et la commande basée sur la logique floue (FLC), qui ne nécessite pas la connaissance du modèle du système. La navigation en 3D du système multi-AUV est enfin abordée en utilisant une commande floue ou PD avec une méthode de guidage en ligne (LOS), permettant la planification de trajectoires en passant par des points de passage dans un environnement connu. Les simulations réalisées sous Matlab ont permis de vérifier la faisabilité, la stabilité et les performances des stratégies proposées.

Mots clés : Système multi-AUV, contrôle de formation, commande floue, méthode de guidage LOS, Navigation 3D.

Abstract

In recent years, multi-AUV systems have attracted increasing interest in ocean exploration due to their several advantages, including efficiency, low cost, and high tolerance to economical sensors. Formation control has become a key research focus. Unlike terrestrial or aerial multiagent systems, underwater communications pose major challenges. This paper focuses on the design of a multi-AUV system consisting of three vehicles: one leader and two followers, which must follow a common reference trajectory while maintaining a certain distance between them. Our contribution begins with assigning each AUV a compatible kinematic and dynamic model. Two control strategies are then proposed, namely: proportional derivative (PD) control and fuzzy logic-based control (FLC), which does not require knowledge of the system model. Finally, 3D navigation of the multi-AUV system is addressed using either fuzzy or PD control with a line-of-sight (LOS) guidance method, allowing trajectory planning with waypoints in a known static environment. Simulations carried out in Matlab have verified the feasibility, stability, and performance of the proposed strategies.

Keywords: Multi-AUV system, formation control, fuzzy control, LOS guidance method, 3D navigation.

المخلص

في السنوات الأخيرة، شهدت المركبات البحرية الذاتية المتعددة (Multi-AUV) اهتماماً متزايداً في استكشاف المحيطات بفضل مزاياها العديدة، بما في ذلك كفاءتها، تكلفتها المنخفضة وقدرتها العالية على تحمل أجهزة الاستشعار الاقتصادية. أصبح التحكم في التشكيل بين الغواصات محورياً هاماً جانباً في الاتصالات تحت الماء، على عكس الأنظمة متعددة الوكلاء البرية أو الجوية. يركز هذا البحث على نمذجة و التحكم في المركبات الذاتية المتعددة التي تتكون من ثلاث مركبات : قائد واثنين من الأتباع، يجب أن يتبعوا مساراً مرجعياً واحداً مع الحفاظ على مسافة معينة بينهم. تبدأ مساهمتنا بإعطاء كل مركبة نموذجاً حركياً و ديناميكياً متوافقاً بعد ذلك، يتم اقتراح استراتيجيتين للتحكم، وهما: التحكم التفاضلي (PD) والتحكم بواسطة المنطق الضبابي (FLC)، الذي لا يتطلب معرفة نموذج الغواصة. يتم تناول الملاحة ثلاثية الأبعاد للمركبات البحرية الذاتية باستخدام التحكم التفاضلي (PD) أو التناسبي الضبابي (FLC) مع طريقة التوجيه (LOS)، التي تسمح بتخطيط مسارات مرجعية من خلال نقاط مرور في بيئة معروفة. أظهرت المحاكاة التي أجريت باستخدام برنامج (Matlab) إمكانية التنفيذ، الاستقرار و الأداء للاستراتيجيات المقترحة.

الكلمات المفتاحية: المركبات البحرية الذاتية المتعددة (Multi-AUV)، التحكم في التشكيل بين الغواصات، التحكم التفاضلي (PD)، التحكم بواسطة المنطق التناسبي الضبابي (FLC)، طريقة التوجيه (LOS)، الملاحة ثلاثية الأبعاد (3D).