

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Automatisation et Contrôle Des Systèmes Industriels

THÈME

COMMANDE PAR MODE GLISSANT FLOU D'UN VEHICULE SOUS-MARIN AUTONOME

Préparé par : Melle. KLAAL Sabrina

M^{me}. FELLAG Hanane

Soutenue le : 20/06/2017

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
HASSAIN.S	MCA	UIK Tiaret	Président
LARBI.M	MCA	UIK Tiaret	Examineur1
KOUADRIA.S	MAA	UIK Tiaret	Examineur2
HATTAB.A	MCB	UIK Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2016 / 2017

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette fin de travail ; nous adressons nos remerciements premièrement à Dieu le tout puissant qui nous donne le courage, la patience et la force pour réaliser ce travail.

*Nous tenons à remercier particulièrement Mr : **Hattab Abd El-illah** pour leur encadrement, leur disponibilité, leurs conseils et leurs remarques pertinentes pour la pérennité de ce travail.*

Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

Enfin, nos profondes gratitude passent aussi à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin pour accomplir ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui ont éclairé mon parcours

Mes frères et mes sœurs

Ma famille paternelle et maternelle

Mon mari et sa famille

Mes chères amies

Hanane



Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui sont enlumines mon parcours

Mes frères et mes sœurs

Ma famille paternelle et maternelle

Mes chères amies

Sabrina



SOMMAIRE

Remerciement	i
Dédicace	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	2

Chapitre 1 : Présentation des véhicules sous-marins autonomes

1.1 Historique des véhicules sous-marins :	4
1.2 Les applications des véhicules sous-marins :	5
1.2.1 Le secteur industriel :	6
1.2.2 Le secteur militaire :	6
1.2.3 L'environnement :	7
1.2.4 Les applications scientifiques :	8
1.3 Classification des véhicules sous-marins :	10
1.3.1 Les véhicules habités :	10
1.3.2 Les véhicule non habités :	11
Les véhicules télé-opérés ROV:	12
Les véhicules avec lien acoustique UUV	13
Les véhicules sous-marins autonomes AUV	14
1.3.2.1 Classification des véhicules sous-marins autonomes :	15
Les AUVs grands fonds :	15
Les AUVs côtiers	16
1.3.2.2 Forme des véhicules sous-marins autonomes :	19
Forme cylindrique :	19
Forme parallélépipédique :	19
Forme ellipsoïdale	20
1.4 Les différentes stratégies de commande utilisée dans la recherche bibliographique :	21
1.4.1 Les commandes linéaires :	21
1.4.2 Les commandes non linéaires :	21

Les commandes en régime glissant :	22
1.4.3 Les commandes de techniques d'intelligence artificielle :	24
1.5 Les avantages de la commande par mode glissant flou :	24
1.6 Conclusion.....	25

Chapitre 2 : Modélisation du robot sous-marin autonome AUV

2.1 Introduction	26
2.2 Modélisation générale du robot sous-marin autonome	26
2.2.1 Conventions et hypothèses de base référentiels	26
2.2.2 Modèle Cinématique	29
Transformation des vitesses angulaires	29
2.2.3 Modèle dynamique	30
2.2.4 Les efforts hydrodynamiques	36
2.2.5 Les efforts hydrostatiques	38
2.2.6 Gouvernes du robot	41
2.2.7 Propulseur	44
2.2.8 Perturbations	45
2.2.9 Relation générale de la dynamique	46
2.3 Découplage du modèle mathématique	47
2.3.1 Modèle en immersion.....	47
2.3.2 Modèle en cap	49
2.4 Conclusion.....	51

Chapitre 3 : Commande par mode glissant du robot sous-marin autonome AUV

3.1 Introduction :	52
3.2 La commande par mode glissant.....	52
3.2.1 Principe de fonctionnement.....	52
3.2.2 Définition de régime glissant	53
3.2.3 Propriétés de la convergence en temps fin	55
3.2.4 Méthode de la commande équivalente	55
3.2.5 Commande par régime glissant du premier ordre	56

3.2.6 Phénomène de réticence ou« chattering»	57
3.2.7 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence	57
Solution de couche limitée :	57
Solution par mode glissant flou :	58
3.2 Application de la commande sur le robot sous-marin autonome :	59
La commande en mode plongée :	59
La commande en mode de cap :	61
3.4 Conclusion.....	63
 Chapitre 4 : Commande par régime glissant flou du robot Sous-marin autonome AUV	
4.1 Introduction	63
4.2 Concepts de base de la logique floue	63
4.2.1 Théorie des sous-ensembles flous :	63
4.2.2 Fonctions d'appartenance.....	64
4.2.3 Caractéristiques d'un sous- ensemble flou	64
4.2.4 Opération sur les sous-ensembles flous.....	65
4.2.5 Variables linguistiques	66
4.3 La commande floue.....	66
4.3.1 Fuzzification.....	67
4.3.2 Base de connaissance	67
4.3.3 Moteur d'inférence	68
4.3.4 La défuzzification.....	71
4.4 Structure du contrôleur flou glissant	72
4.4.1 Synthèse du contrôleur flou glissant	72
4.4.2 Contrôleur PI flou par mode glissant	74
4.5 Conclusion.....	75
 Chapitre 5: Résultats de simulation	
5.1 Introduction	76
5.2 Résultats des simulations de la commande par mode glissant du premier ordre	76
5.2.1 Simulation sans bruits	77

Cap du véhicule.....	77
Immersion du véhicule.....	78
5.2.2 Simulation avec bruits.....	79
Cap du véhicule.....	80
Immersion du véhicule.....	82
5.3 Résultats des simulations de la commande par mode glissant flou.....	83
5.3.1 Simulation sans bruits.....	83
Cap du véhicule.....	83
Immersion du véhicule.....	84
5.3.2 Simulation avec bruits.....	85
Cap du véhicule.....	85
Immersion du véhicule.....	87
5.4 Résultats des simulations de la commande par mode PI glissant flou.....	88
5.4.1 Simulation sans bruits.....	88
Cap du véhicule.....	88
Immersion du véhicule.....	89
5.4.2 Simulation avec bruits.....	89
Cap du véhicule.....	89
Immersion du véhicule.....	91
5.5 Conclusion.....	92
Conclusion générale.....	93
Perspectives.....	94
Bibliographie.....	95
Annexe A.....	99

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1 : Présentation des véhicules sous-marins autonomes

Figure 1.1	le Nautilus de Fulton	4
Figure 1.2	Le K-Ster (France) à l'approche d'une mine de fond	6
Figure 1.3	L'algue Caulerpa Taxifolia	7
Figure 1.4	Un système de captage d'eau douce © Nymphéa Water	9
Figure 1.5	La source de La Vise (a) Photo aérienne ©M.Bakalowicz, (b) Bathymétrie 3D réalisée par le H160	10
Figure 1.6	Croquis des premiers sous-marins, (a) Le sous-marin de Van Drebbel, (b) Le sous-marin de Bushnell	11
Figure 1.7	Le Nautilus, France	11
Figure 1.8	Les premiers véhicules sous-marins autonomes non habités	12
Figure 1.9	Le véhiculé sous-marin H1000 de la société Eca-Hytec	13
Figure 1.10	Le véhicule ALIVE du groupe Cybernétix	14
Figure 1.11	Résumé des véhicules non-habités	15
Figure 1.12	Photos d'AUVs grands fonds, (a) Hugin 3000, Norvège, (b) Alistar 3000, France, (c) Urashima, Japon	15
Figure 1.13	Photos d'AUVs côtiers, (a) Remus, USA, (b) H160, France, (c) Gavia, Finlande	16
Figure 1.14	Les différents planeurs sous-marins, (a) Slocum, USA, (b) Seaglider, USA, (c) Spray, USA	17
Figure 1.15	Les systèmes biomimétiques sous-marins 1.2 , (a) Le robot Anguille, USA, (b) Le robot Tuna, USA	19
Figure 1.16	AUV forme cylindrique	19
Figure 1.17	AUV forme parallélépipédique	20
Figure 1.18	AUV forme ellipsoïdale	20
Figure 1.19	Classification des engins sous-marins	20

Chapitre 2 : Modélisation du robot sous-marin autonome AUV

Figure 2.1	Repères fixe et inertiel, Variables d'état	28
-------------------	--	-----------

Figure 2.2	Schéma de la modélisation globale du robot	28
Figure 2.3	Définition des angles de rotation	30
Figure 2.4	Schéma d'un solide indéformable lié à un repère terrestre et au repère fixe lié au corps	31
Figure 2.5	Equilibre hydrostatique	40
Figure 2.6	Actionneurs du robot	41
Figure 2.7	Angle d'attaque effectif de cap	43
Figure 2.8	Angle d'attaque effectif d'immersion	43
Figure 2.9	Diagramme du propulseur d'AUV	44
Figure 2.10	Diagramme en plongée du robot sous marin autonome	48
Figure 2.11	Diagramme en cap de la torpille	49

Chapitre 3 : Commande par mode glissant du robot sous-marin autonome AUV

Figure 3.1	Convergence du système glissant	52
Figure 3.2	Schéma blocs de la commande par mode glissant du premier ordre	55
Figure 3.3	Phénomène de la réticence	56
Figure 3.4	Fonction de saturation sat	57
Figure 3.5	Fonction tangente hyperbolique \tanh	57

Chapitre 4 : Commande par régime glissant flou du robot Sous-marin autonome AUV

Figure 4.1	Exemples de fonction d'appartenance	64
Figure 4.2	Représentation de variable linguistique	66
Figure 4.3	Schéma générale de la commande floue	67
Figure 4.4	Exemple d'inférence MAX-Min	70
Figure 4.5	Structure du régulateur flou-glissant	72
Figure 4.6	Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement	73
Figure 4.7	Les fonctions d'appartenances d'entrée s	74
Figure 4.8	Les fonctions d'appartenances de sortie u	74
Figure 4.9	Structure du régulateur flou-glissant	75

Chapitre 5: Résultats de simulation

Figure 5.1	Schéma blocs de la commande par mode glissant du premier ordre	77
Figure 5.2	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan horizontal	78
Figure 5.3	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan vertical	79
Figure 5.4	Schéma bloc de la commande en présence de perturbation sur l'entrée du système	80
Figure 5.5	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal	80
Figure 5.6	Schéma global de la commande en présence de bruits issue des capteurs	81
Figure 5.7	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec un bruit des capteurs dans le plan horizontal	81
Figure 5.8	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec bruits sur l'entrée dans le plan vertical	82
Figure 5.9	Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical	83
Figure 5.10	Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou dans le plan horizontal	84
Figure 5.11	Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou dans le plan vertical	85
Figure 5.12	Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal	86
Figure 5.13	Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou avec bruit sur les capteurs dans le plan horizontal	86
Figure 5.14	Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan vertical	87
Figure 5.15	Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical	87

Figure 5.16	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant flou dans le plan horizontal	88
Figure 5.17	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant flou dans le plan vertical	89
Figure 5.18	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal	90
Figure 5.19	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan horizontal	90
Figure 5.20	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan vertical	91
Figure 5.21	Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical	91

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre 1 : Présentation des véhicules sous-marins autonomes

Tableau 1.1	Caractéristiques et performances des AUVs grands fonds	16
Tableau 1.2	Caractéristiques et performances des AUVs petits fonds	17
Tableau 1.3	Caractéristiques et performances des planeurs sous-marins	18

CHAPITRE 2 : Modélisation du robot sous-marin autonome AUV

Tableau 2.1	Coefficients de poussée et de couple	45
--------------------	--------------------------------------	-----------

CHAPITRE 4 : Commande par régime glissant flou du robot sous-marin autonome AUV

Tableau 4.1	Exemple de matrice des règles	69
--------------------	-------------------------------	-----------

Introduction générale

Introduction générale

Si aujourd'hui traverser les océans peut s'effectuer sans peine, il n'en pas de même pour l'exploration des fonds marins qui n'a été que très récemment abordée. La découverte de ce milieu n'est pas aisée du fait que la moitié des fonds océaniques dépasse 3000 m de profondeur. La fosse sous-marine la plus profonde actuellement connue est la fosse des Mariannes, située dans la partie nord-ouest de l'océan Pacifique non loin du Japon, le point le plus bas de cette fosse se situe au environs de -11000 mètres. Face à ce milieu hostile et dangereux, mais potentiellement riche tant sur le plan biologique que sur le plan d'éventuelles ressources exploitables, l'homme a besoin d'assistance dans sa découverte des profondeurs abyssales : l'intervention des robots sous-marins est vraisemblablement une solution.

Aujourd'hui, nous disposons d'une grande gamme d'engins sous-marins permettant de réaliser différentes tâches. Nous pouvons citer deux grandes familles ; véhicules sous-marins habités (MUV : Manned Underwater Vehicle) et les drones sous-marins (UUV : Unmanned Underwater Vehicle). Les véhicules télécommandés (ROV : Remotely Operated Vehicle) et les véhicules sous-marins autonomes (AUV : Autonomous Underwater Vehicle) entrent dans la catégorie des drones sous-marins. Le champ d'application de ces robots sous-marins est potentiellement très vaste et ne cesse de croître. Il comprend l'archéologie sous-marine, la recherche géophysique et bio-marine en passant par les applications dans les domaines de la recherche de l'exploitation des ressources énergétiques. Les communications sous-marines via des câbles ou le transport d'hydrocarbure (gaz, pétrole, ...) par des pipelines, mais aussi l'inspection de structures sous-marines. Ces robots sont également utilisés pour réaliser l'inspection de réacteurs nucléaires et des mesures de pollution. Il est nécessaire de citer également les applications dans le secteur militaire qui vont de la détection à la destruction de mines, ou encore la surveillance des ports dans le domaine de la sécurité civile.

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

acoustique, ainsi que le recalage par système GPS sont des verrous technologiques se heurtant à la difficulté de communiquer sous l'eau. Enfin la problématique de la navigation. En ce qui concerne la navigation, nous pouvons distinguer trois aspects : la planification de trajectoires, l'évitement d'obstacles et la commande du véhicule.

Les objectifs principaux poursuivis par ce projet sont : la modélisation et la commande du robot sous-marin autonome. La technique que nous proposons pour la commande du robot et l'approche par régime glissant du premier ordre, cette loi est très employée pour la commande des systèmes sous-marins, au vue de ses propriétés de robustesse sur les incertitudes paramétriques, et les perturbation. Son principal inconvénient est le phénomène de broutement (des vibrations de haute fréquence sur les actionneurs). Ce phénomène indésirable peut endommager les gouvernes et augmenter la consommation énergétique. Notre but principal de ce travail est de supprimer la réticence et d'améliorer les propriétés de robustesse de ce type de commande. Afin d'atteindre ce dernier but, on combine une nouvelle technique de commande intelligente à la commande par mode glissant d'ordre un, il s'agit de la technique par logique floue.

Nous structurons notre travail comme suite :

- le premier chapitre, nous présentons les véhicules sous-marins autonomes et leurs applications, nous donnons une classification de ces robots, ainsi nous parlons sur les robots sous-marins autonome AUV's qu'ils présentent l'objectif de notre étude. Finalement nous présentons un état de l'art de ces robots.
- Le deuxième chapitre permet à nous de définir une équation générale du mouvement du robot sous marin. pour simplifier le modèle du robot, nous découplons le mode d'immersion du mode de cap ; afin d'obtenir une modélisation dans chaque plan.
- Le troisième chapitre, nous développons une stratégie de commande par mode glissant et l'application de la commande sur le modèle mathématique du robot sous-marin autonome.
- Le quatrième chapitre fait une présentation la théorie et les concepts de base de la logique floue. la description de cette commande permettent au lecteur d'avoir une idée sur la richesse et la diversité des solutions qui peuvent être ajoutées grâce à cette commande.
- Dans le cinquième chapitre, nous présentons les différents résultats de simulations de notre robot sous-marin autonome dans les deux plans vertical et horizontal.

Chapitre 01:

Présentation des véhicules sous-marins autonomes

1.1 Historique des véhicules sous-marins :

En 1620, le scientifique hollandais Cornelis Drebbel, teste avec succès un sous-marin dans la Tamise, pour une commande du roi Jacques 1er d'Angleterre. En 1641, Jean Barrié lance à Saint- Malo le XVII, sur des plans du père Mersenne. Vaisseau métallique à rames, il pouvait accueillir jusqu'à quatre personnes et était muni d'un sac en cuir afin de faciliter son but premier : la chasse aux épaves. En 1775, l'Américain David Bushnell met au point sa Tortue construite entièrement en bois. Pour avancer, le pilote, seul à bord, faisait tourner une manivelle actionnant une hélice. Pour plonger, il ouvrait des ballasts. Pour remonter, il évacuait l'eau à l'aide d'une pompe. C'est en 1797 que l'ingénieur américain Robert Fulton construit le Nautilus en acier recouvert de cuivre. Long de 6,50 m, il était propulsé par une hélice actionnée à la main par les trois membres d'équipage. Il était équipé d'une charge explosive qu'il devait fixer sous les navires ennemis et déclencher à distance (difficile dans la pratique). Fulton proposa son invention à la France puis à la Grande-Bretagne qui la refusèrent tour à tour.

Le 28 juin 1856, en Espagne, Narcisse Monturiol plonge dans le port de Barcelone pour effectuer les premiers essais de l'Ictineo, engin qu'il a conçu et fabriqué. En France, le commandant Bourgois et l'ingénieur Brun mettent au point en 1863 le Plongeur, premier sous-marin propulsé par un moteur (à air comprimé). Long de 42,50 m, il déplace 420 tonnes et embarque sept membres d'équipage. Son autonomie et sa vitesse restent limitées.

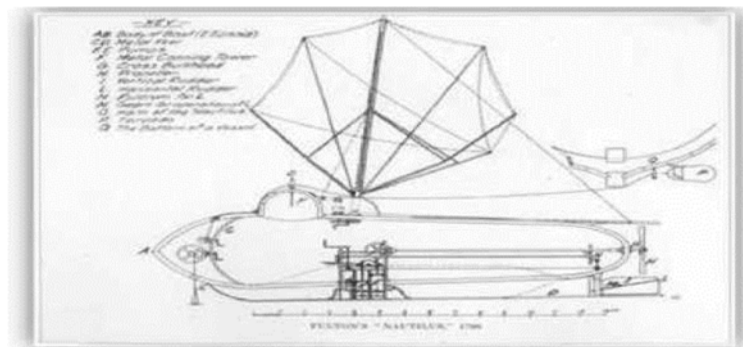


Figure 1.1 : le Nautilus de Fulton

Le 17 février 1864, pendant la guerre de Sécession, le CSS H.L. Hunley, un sous-marin confédéré, devient le premier sous-marin à couler un navire ennemi en l'éperonnant pour y fixer une charge explosive déclenchée par un filin à distance de sécurité, le USS Housatonic,

au large de Charleston ; il disparaît, ensuite, pour des raisons restées inconnues.

Le premier sous-marin réellement opérationnel est le Gymnote de 1887, construit par les Français Henri Dupuy de Lôme et Gustave Zédé. Long de 17 m, il est propulsé par un moteur de 50 chevaux, il atteint 8 nœuds en surface et 4 en plongée, manœuvré par un équipage de cinq hommes. En 1904, l'ingénieur français Maxime Laubuf construit le Narval, un sous-marin équipé d'un périscope et de ballasts externes qui a la faveur de la marine de l'époque. Il est le premier sous-marin équipé d'une propulsion mixte : machine à vapeur en surface, moteur électrique en plongée. Sous-marin de poche français (d'origine allemande) de type Seehund exposé au Musée national de la Marine à Brest.

De 1914 à 1918, les sous-marins fonctionnant grâce à une propulsion Diesel-électrique peuvent être engagés en grand nombre durant la guerre. Une batterie d'accumulateurs alimente un moteur électrique de propulsion. Les batteries sont rechargées par une génératrice entraînée par un moteur diesel, utilisé en surface ; en 1944, les Allemands améliorent le schnorchel (invention hollandaise), tube d'air qui permet aux U-Boots d'utiliser leur moteur diesel à faible immersion, et d'éviter de venir en surface où ils sont très vulnérables.

A partir des années 1950, la propulsion nucléaire apparaît à bord des sous-marins, à la suite de l'USS Nautilus (SSN-571) de 1954. L'énergie nucléaire, totalement indépendante de l'atmosphère, permet aux sous-marins de devenir de véritables sous-marins.

1.2 Les applications des véhicules sous-marins :

Les applications des véhicules sous-marins sont potentiellement très vastes. Elles touchent en particulier quatre principaux secteurs qui sont :

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

Nous allons développer, dans les paragraphes suivants, les besoins de ces différentes activités. Nous allons également montrer que les robots sous-marins sont devenus des outils indispensables pour l'homme surtout lorsque ce dernier doit intervenir dans un milieu dangereux voire hostile.

1.2.1 Le secteur industriel :

Les compagnies pétrolières, gazières et de télécommunications ont très vite été intéressées par les potentialités des véhicules sous-marins. Leurs besoins s'expriment en termes de cartographie des fonds marins, d'aide à la pose de pipelines ou de câbles et l'inspection de ces structures [1],

Les industries minières qui exploitent entre autres l'étain, le manganèse ou encore les diamants utilisent les services de robots sous-marins afin de détecter, et parfois même exploiter, les différents gisements présents dans les océans.

Le secteur énergétique profite également des atouts des ROVs qui réalisent l'inspection de réacteurs nucléaires et de barrages hydro-électriques [2].

1.2.2 Le secteur militaire :

La marine, qui a fortement incité les recherches sur les robots sous-marins autonomes, encourage l'utilisation de ceux-ci pour des applications dangereuses pour l'homme.

Une des applications militaires les plus étudiées concerne la détection et la destruction de mines sous-marines. La destruction de ces objets est une tâche dangereuse et spécifique, ou des engins robotisés peuvent permettre de localiser et de neutraliser ces bombes à la place de l'homme. La société Eca, par exemple, a conçu le K-Ster (figure 1.2), qui le désigne comme la nouvelle arme contre les mines. Il est très efficace pour nettoyer les champs de mines grâce à sa tête pivotante explosive. Il peut atteindre avec précision et efficacité des mines à orins, de fond ou encore enfouies.

Une autre activité en pleine émergence est la surveillance des ports. Pour éviter l'intrusion de plongeurs ou encore de véhicules sous-marins ennemis dans les ports, des robots autonomes peuvent effectuer un quadrillage dans une zone proche de l'entrée du port. Dans ce contexte, l'engin remplace l'homme pour réaliser cette tâche fastidieuse et dangereuse.



Figure 1.2 : Le K-Ster (France) à l'approche d'une mine de fond

1.2.3 L'environnement :

Depuis très peu de temps, l'homme se préoccupe activement de la pollution de l'environnement. Le milieu maritime n'est en effet pas épargné par la pollution. Nous avons tous à l'esprit les nombreux pétroliers qui se sont échoués en pleine mer et qui ont déversé des quantités astronomiques de pétrole dans les océans. Une solution envisageable en amont de ces catastrophes serait de réaliser l'inspection de la coque des navires par des robots sous-marins. Ces robots pourraient également contribuer à identifier les pollutions intentionnelles (dégazages). Les véhicules sous-marins équipés de capteurs biochimiques sont capables d'analyser les polluants et peuvent ainsi permettre l'identification des responsables par comparaison chimique des cuves des navires amarrés au port.

La surveillance de l'Arctique est considérée comme un problème de grande importance. L'évolution des régions polaires est un indicateur très sensible des éléments précurseurs des changements climatiques. Le robot peut remplacer une fois de plus l'homme pour une surveillance autonome sous les banquises sans risquer la vie de celui-ci. L'engin peut également prélever des échantillons de glace à différentes profondeurs pour étudier l'historique du climat. Cette application demande au véhicule un positionnement relatif très précis, mais aussi des capacités à rester positionner en un point fixe en présence de perturbations fortes [3].

La protection de la biodiversité demande une surveillance régulière de zones connues et protégées. L'acquisition d'images vidéo avec des AUVs peut permettre une estimation de l'état de santé de zones naturelles préservées. Par exemple, les biologistes surveillent en particulier l'invasion d'une algue en mer Méditerranée. Cette algue est connue sous le nom de "Caulerpa Taxifolia" (figure 1.3), elle se propage dans le bassin méditerranéen depuis les années 80.



Figure 1.3 : L'algue *Caulerpa Taxifolia*

L'institut australien des Sciences Marines réalise des inspections sur la Grande Barrière de Corail à l'aide de ROVs. Ces surveillances procurent aux scientifiques des données quantitatives sur le long terme sur les coraux, les algues ou tout simplement la vie sous-marine. Ces données donnent suite à des études sur l'abondance et les changements de population de certains organismes sur une large échelle géographique.

1.2.4 Les applications scientifiques :

Cartographie et archéologie sous-marine Comme on a pu le constater dans les paragraphes précédents, la cartographie sous-marine est une application essentielle.

Que ce soit dans le domaine industriel ou pour la préservation de l'environnement, les véhicules sous-marins équipés des capteurs nécessaires peuvent réaliser une cartographie des fonds marins de bonne qualité.

Les archéologues profitent des caractéristiques des engins sous-marins pour explorer les épaves et les trésors cachés sous les eaux des océans. Là où les capacités d'un plongeur sont limitées en termes d'autonomie et de profondeur d'immersion, les robots sous-marins repoussent les frontières de l'humain pour améliorer et étendre ses recherches.

Bio mimétisme Les scientifiques essaient également de copier la nature avec des systèmes inspirés de la biologie (Projet ROBEA4). Les chercheurs sont motivés par le fait que les solutions provenant de la nature ont souvent de bien meilleures performances que les systèmes conçus par des ingénieurs. Comparées à nos réalisations technologiques, les performances des poissons laissent rêveur. On peut citer, par exemple, parmi les nombreuses espèces de poissons existantes : leurs prodigieuses capacités d'accélération pouvant atteindre jusqu'à 20 fois la gravité, leur vitesse excédant les 70 km/h ainsi que leur extraordinaire manœuvrabilité.

Les sources d'eau douce sous-marines D'après la littérature, le débit d'une source d'eau douce sous-marine peut varier de quelques litres par seconde jusqu'à quelques mètres cube par seconde. Le débit est estimé soit par observation directe, soit par analyse d'images vidéo.

Les grandes quantités d'eau douce, ou au moins d'eau faiblement salée, jaillissant dans la mer représentent une ressource alternative d'eau potable pour les régions côtières en pénurie d'eau. Un exemple de système de captage d'eau douce a été développé par la société Nymphéa Water en 2003 pour la source de La Mortola (figure 1.4). Cette source est située à 36 m de profondeur et se situe à 2 km de la côte entre les villes de Menton (France) et Ventimiglia (Italie).



Figure 1.4 : Un système de captage d'eau douce © Nymphéa Water

La connaissance du débit et de la salinité des sources sous-marines, et de leur variation dans le temps est importante. Ceci permet aux hydrologues d'estimer la quantité d'eau se déversant dans la mer, et d'évaluer s'il est possible d'utiliser cette eau. Cependant, ces sources présentent des variations saisonnières. Il est donc nécessaire de connaître avec précision les données suivantes:

- l'amplitude du débit,
- l'ordre de grandeur des variations de ce débit,
- de réaliser une surveillance permanente du débit, de la température et ainsi que de la salinité.

La surveillance permanente est recommandée pour voir les effets possibles des exploitations proches du rivage et les intrusions d'eau de mer dans la source.

Les anciennes techniques pour mesurer le débit, la température et la conductivité, selon, sont les suivantes :

- Le débit peut être mesuré de deux façons :
- Une façon indirecte consistant à comparer le panache d'eau douce dans la mer à un modèle obtenu par des données physiques,
- Une façon directe en récoltant l'eau douce dans un tuyau à la sortie de la source et de mesurer le débit. Ces méthodes fournissent en général des estimations surestimées des débits.
- Les mesures de température et de conductivité sont généralement faites à chaque intersection d'un quadrillage allant de 5 x 5 m jusqu'à 10 x 10 m à différentes profondeurs à partir d'un bateau à l'aide d'un capteur CTD (Conductivity, Température and Depth). Ces manipulations demandent de longues journées d'expérimentations durant lesquelles le débit doit être constant, ainsi que les conditions climatiques (pas de vent et pas de changement du niveau de la mer).

D'après ces descriptions, nous comprenons aisément qu'un engin sous-marin semble être

idéalement approprié à l'exploration des sources d'eau douce. Certains AUVs ont déjà été utilisés dans différentes applications pour relever des données physico-chimiques. L'exutoire portugais SJacintoqui déverse des eaux usées industrielles en mer, a été contrôlé par le véhicule ISURUS afin d'en caractériser le panache. Le REMUS, d'après [4], a été déployé à San Clemente (CA, USA) et Duck (NC, USA) pour valider et améliorer les modèles théoriques de panaches. L'étude des sources d'eau douces sous-marines a été présentée dans [5], où le MARIDAN M600 a effectué des relevés CTD dans la baie d'Eckemfôrde en mer baltique. Les mêmes tests ont été réalisés dans les fjords à Trondheim par le robot MARIDANM150. Une des applications du véhicule sous-marin H160 est la caractérisation du panache de sources d'eau douce à l'aide de son capteur CTD. Le but de ces expérimentations est d'identifier et d'évaluer le panache d'eau douce provenant de sources sous-marines. En particulier pour la source de La Vise dans l'étang de Thau (figure 1.5), qui est située entre Montpellier et Sète en bordure de mer Méditerranée. Pour cela, le robot H160 a réalisé une série de trajectoires de type "râteau" au-dessus de la source à différentes profondeurs.

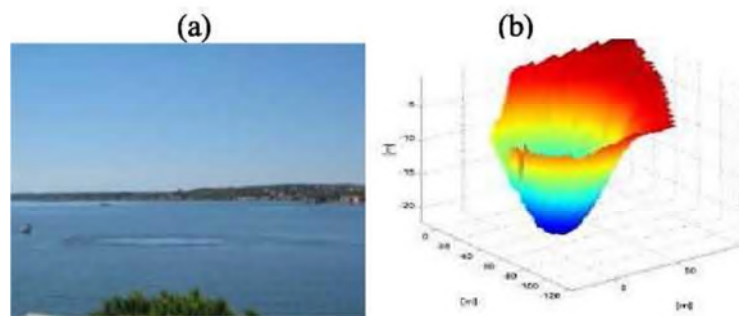


Figure 1.5 : La source de La Vise(a) Photo aérienne ©M.Bakalowicz,
(b) Bathymétrie 3D réalisée par le H160

1.3 Classification des véhicules sous-marins :

1.3.1 Les véhicules habités :

Nous pouvons distinguer deux catégories de véhicules sous-marins habités [6]:

- Les sous-marins, qui désignent les véhicules de grandes dimensions, manœuvrés par un équipage qui peut y résider durant des périodes plus ou moins longues. Cette catégorie comprend les sous-marins militaires.

- Les submersibles, qui sont de petite taille et destinés à l'exploration des grandes profondeurs.



Figure 1.6 : Croquis des premiers sous-marins, (a) Le sous-marin de Van Drebbel, (b) Le sous-marin de Bushnell

L'équipage de ce type d'engin est réduit (2 à 3 personnes) et la quantité en oxygène y est limitée. Par exemple, le Nautilus a été conçu par l'Ifremer en 1984 (figure 1.7) et peut plonger jusqu'à 6000 mètres avec 3 passagers. Ses principales missions ont été la recherche de sources hydrothermales dans l'océan Pacifique, les interventions sur les épaves du Titanic et du Prestige.



Figure 1.7: Le Nautilus, France

1.3.2 Les véhicules non habités :

La marine a été la première à montrer un intérêt dans le développement de systèmes sous-marins non habités [7], En 1866, la marine autrichienne demanda à Robert Whitehead de développer une nouvelle arme pour les navires de guerre. Il démontra l'efficacité d'un système flottant propulsé à une vitesse de 3 m/s sur une distance de 700 m transportant une charge explosive : la torpille était née. Cependant, cet engin n'avait aucun système de contrôle

et de navigation. En réalité, les premiers véhicules sous-marins autonomes ont été développés au cours des années 60-70 avec :

- Le SPURV (Self-Propelled Underwater Research Vehicle, USA, 1977) : il pesait 480 kg et pouvait opérer à une vitesse de 2.2 m/s pendant 5 heures jusqu'à une profondeur de 3000 m. Le véhicule était contrôlé acoustiquement de la surface.

Les chercheurs l'utilisaient pour faire des mesures de conductivité et de température pour parfaire la modélisation théorique des vagues (figure 1.8(a)).

- L'épaulard (France, 1976) : il pesait 3 tonnes et pouvait opérer à une profondeur de 6000 m pendant 7 heures à une vitesse de 1 nœud. Il était également relié à la surface d'un point de vue acoustique (figure 1.8(b)).

Ces systèmes ont été les précurseurs des quelques 2400 véhicules sous-marins non habités en activités régulières dans le monde entier, dont nous allons faire un rapide état des lieux. Pour cette classe de véhicules sous-marins, c'est le type de liaison avec la surface qui va définir le degré d'autonomie du robot (figure 1.8). Nous pouvons distinguer trois catégories d'engins sous-marins : les véhicules reliés par un câble à la surface, ceux reliés par un lien acoustique et enfin les véhicules complètement autonomes.

(a) Le SPURV, US

(b) L'épaulard, France



Figure 1.8: Les premiers véhicules sous-marins autonomes non habités,

- **Les véhicules télé-opérés ROV:**

Les véhicules ROVs (Remotely Operated Vehicles) sont généralement munis de bras manipulateurs et de caméras leur conférant des aptitudes à l'intervention. Ainsi ils peuvent effectuer des opérations complexes comme l'ouverture ou la fermeture de vannes, le changement de pièces défectueuses sur des structures sous-marines, ou encore la récupération d'échantillons ou d'objets immergés.

Les caractéristiques des ROVs [4] sont les suivantes :

- Ils sont sur-actionnés pour le rendant omnidirectionnels,
- Ils sont capables de stationner en un point fixe,
- L'ombilical relie physiquement l'engin à la surface. Ceci permet de télé opérer le robot et également de lui fournir de l'énergie. La présence de ce câble assure une récupération plus aisée du véhicule. Cependant, l'ombilical induit des perturbations importantes sur le véhicule.

Nous pouvons citer, parmi les nombreux ROVs existants, le H1000 de la société Eca-Hytec (figure 1.9). Ce véhicule a été conçu pour réaliser des inspections jusqu'à une profondeur de 1000 m. Il peut également être muni de 2 bras manipulateurs. Sa vitesse de déplacement peut atteindre les 3 nœuds. La marine française utilise ce robot pour des interventions sur des épaves de bateaux ou d'avions gisant sur le fond marin.



Figure 1.9 : Le véhiculé sous-marmteleopere H1000 de la société Eca-Hytec

- **Les véhicules avec lien acoustique UUV:**

Les véhicules UUVs (Untethered Underwater Vehicles) sont conçus pour effectuer des opérations similaires à celles d'un ROV, avec un lien acoustique entre la surface et l'engin permettant la vérification et l'échange des données. La conséquence est que l'engin transporte sa propre énergie et la manipulation est une tâche complexe qui demande un degré important d'autonomie. Ceci impose de garder l'opérateur dans la boucle de décision et de commande par l'intermédiaire acoustique.

Les caractéristiques de ces engins sont [1] les suivantes :

- Ils sont en général sur-actionnés,
- Ils ont une gestion fine de leur consommation d'énergie,
- Les délais de transmission dus au canal acoustique obligent le bateau de surface à se positionner au dessus du véhicule sous-marin.

Alive est un exemple de véhicule avec lien acoustique (figure 1.10). Il mesure 4m de long

pour une largeur de 2.2m et une hauteur de 1.6m pour un poids de 3500kg. Son autonomie est d'environ 7 heures. Il dispose de 2 bras manipulateurs.



Figure 1.10: Le véhicule ALIVE du groupe Cybernétix

- **Les véhicules sous-marins autonomes AUV :**

Les AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) peuvent être défini comme un engin connaissant sa position et naviguant vers un objectif. On établit une liste des opérations à réaliser et on les programme préalablement. Les opérateurs n'interviennent pas en fonctionnement nominal, l'engin est totalement autonome.

Ces véhicules peuvent être répertoriés en 2 classes dépendant de la profondeur d'immersion. Nous parlerons alors d'AUVs côtiers et d'AUVs grands fonds [2]. A partir de quelques centaines de mètres de profondeur, la structure, les dimensions, les caractéristiques des AUVs changent. Cette limite de profondeur va séparer les véhicules grands fonds des véhicules côtiers.

Résumé des véhicules non-habités :

Tous les systèmes présentés précédemment ont des avantages et des limitations, il faut dire qu'ils sont différents et on doit choisir l'un d'entre eux en fonction de l'application que l'on veut réaliser. L'illustration suivante permet une visualisation de ces véhicules par niveau d'autonomie croissante, Tow Fish ;ROV, UUV et AUV (Figure 1.11)[8][9].

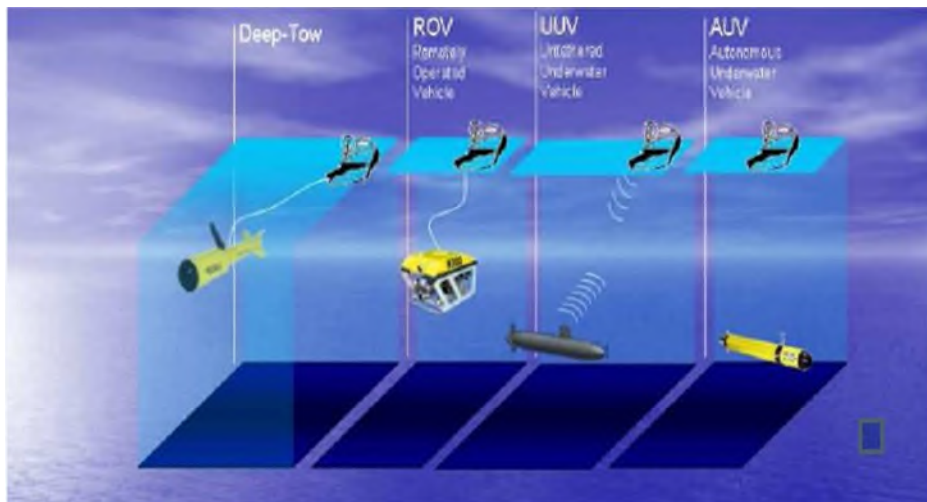


Figure 1.11 : résumé des véhicules non-habités

1.3.2.1 Classification des véhicules sous-marins autonomes :

Ces véhicules peuvent être répertoriés en 2 classes dépendant de la profondeur d’immersion. Nous parlerons alors d’AUVs côtiers et d’AUVs grands fonds. A partir de quelques centaines de mètres de profondeur, la structure, les dimensions, les caractéristiques des AUVs changent. Cette limite de profondeur va séparer les véhicules grands fonds des véhicules côtiers.

- **Les AUVs grands fonds :**

Ces engins conçus pour explorer les profondeurs des océans ont, en général, une grande autonomie énergétique, un poids et des dimensions importantes qui nécessitent une logistique assez lourde. Par exemple, le tableau 1.1 compare le Hugin 3000 de KongsbergSimrad (Norvège), l’Alistar 3000 d’Eca (France) et le véhicule Urashima de Jamstec (Japon) (Figure 1.12).

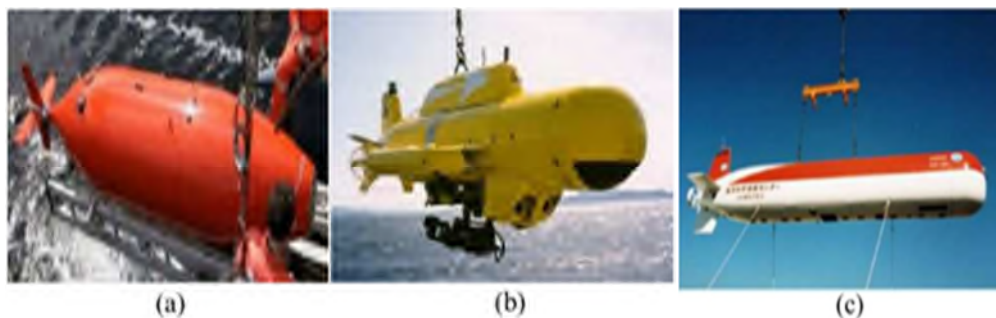


Figure 1.12: Photos d’AUVs grands fonds, (a) Hugin 3000, Norvège, (b) Alistar 3000, France, (c) Urashima, Japon

	Hugin	Alistar	Urashima
Longueur (m)	5,3	7,0	10,0
Poids (kg)	1200	3670	9000
Profondeur (m)	3000	3000	3500
Autonomie(h)	60	50	60
Vitesse (noeuds)	4	4	4

Tableau 1.1 : Caractéristiques et performances des AUVs grands fonds

• **Les AUVs côtiers :**

Ces véhicules sont réalisés avec l’objectif de réduire leur dimension, et par conséquent, la logistique nécessaire à leur mise en œuvre. Seules deux personnes suffisent pour mettre le robot à l’eau. Ils sont également modulaires du point de vue capteurs. Ces véhicules, totalement autonomes, sont capables de déterminer leur position absolue et de naviguer vers un objectif spécifié. Ils sont l’outil indispensable pour les missions en eaux peu profondes. Le Remus (USA) d’Hydroïde, le Gavia (Finlande) d’Hyfmind et le H160 issu d’une collaboration entre le Lirimm et la société Eca-Hytec (France) (Figure 1.13) sont donnés à titre d’exemple dans le tableau 1.2

Les caractéristiques des AUVs côtiers sont les suivantes :

- ✓ Ils sont sous-actionnés. Ces véhicules possèdent moins d’actionneurs que de degrés de liberté.
- ✓ Ils ont une gestion fine de leur consommation d’énergie et sont totalement autonomes du point de vue opérateur.
- ✓ Ils ont un axe de déplacement privilégié, selon la direction de leur propulseur.

Pour compléter notre état de l’art sur les véhicules sous-marins, nous pouvons citer encore deux autres types d’engins sous-marins autonomes : les planeurs sous-marins et les systèmes biomimétiques.

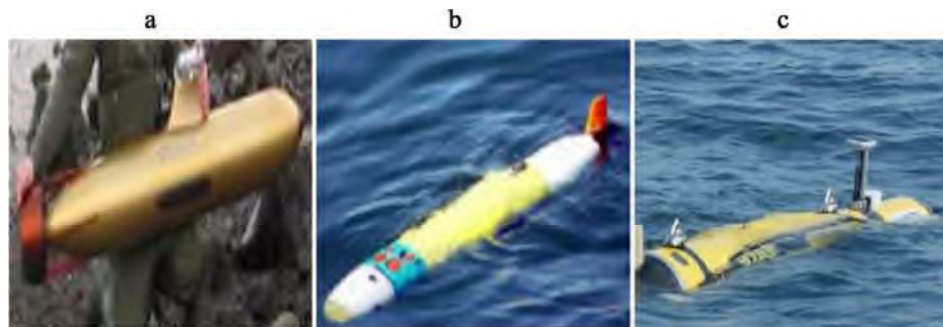


Figure 1.13: Photos d’AUVs côtiers, (a) Remus, USA, (b) H160, France, (c) Gavia, Finlande

	Remus	Gavia	H160
Longueur (m)	1,60	1,70	1,80
Poids (kg)	37	44	57
Profondeur (m)	100	200	160
Diamètre (m)	0,19	0,20	0,20
Vitesse (noeuds)	3	5	3

Tableau 1.2 Caractéristiques et performances des AUVs petits fonds

Il est en général muni de capteurs physico-chimiques et d'une antenne GPS/Iridium. Il peut ainsi déterminer sa position via le système GPS, envoyer les données de missions et récupérer par satellite les paramètres d'une nouvelle mission. Il est beaucoup moins rapide que les AUVs mais plus performant en terme de durée et de distance parcourue en mission.

Il existe trois principaux planeurs (figure 1.14) : Slocum (Webb Research), Seaglider (University of Washington) et Spray (Scripps Institute of Oceanography) [7], Ces engins ont les mêmes principes de base que les AUVs mais sont différents dans leurs caractéristiques et leurs missions. Le tableau 1.3 résume les principales caractéristiques de ces engins. Ces engins, assez légers, sont faciles à mettre en œuvre par deux personnes. Du fait de leur faible vitesse et de leur faible consommation d'énergie, ils peuvent couvrir durant leur mission des milliers de kilomètres. Leur principale application est l'acquisition de données physico-chimiques.

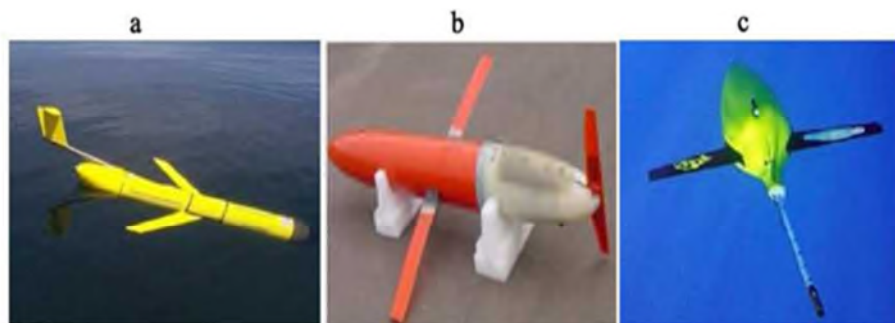


Figure 1.14 : Les différents planeurs sous-marins, (a) Slocum, USA, (b) Seaglider, USA, (c) Spray, USA

	Slocum	Spray	Seaglider
Longueur (m)		2,00	1,80
Diamètre (m)	0,21	0,20	0,30
Poids (kg)	52	51	52
Profondeur (m)	200	1500	1000
Vitesse (cm/s)	35	27	27
Distance (km)	500	7000	4600
Durée (jours)	20	330	200

Tableau 1.3: Caractéristiques et performances des planeurs sous-marins

Les trois types de planeurs se différencient aussi par leur manière de récupérer leur position GPS et les données satellites :

- ✓ Le Seaglider plonge du nez afin de permettre à son antenne, positionnée sur la partie arrière, de sortir de l'eau,
- ✓ Le Spray pivote sur le côté de 90° pour permettre à son antenne, qui est fixée à l'extrémité de son aile, de sortir de l'eau,
- ✓ Le Slocum dispose dans sa partie arrière d'une antenne GPS/Iridium et d'un gouvernail.

On trouve aussi les AUVs des systèmes biomimétiques pour l'objectif de tirer des enseignements sur l'étude des systèmes vivants et de tenter d'en copier les principes pour faire émerger des technologies nouvelles. De nombreuses recherches ont vu le jour ces dernières années essentiellement en Amérique et au Japon. Parmi celles-ci, un bon nombre s'est attaché à reproduire la nage des poissons. Dans ce contexte deux modes de locomotion ont principalement attiré l'attention des chercheurs :

- La locomotion carangui-forme propre aux poissons de type carangue ou thon basée sur des oscillations du corps,
- La locomotion anguilliforme de type serpent, anguille, lamproie, etc..., basée sur des ondulations du corps.

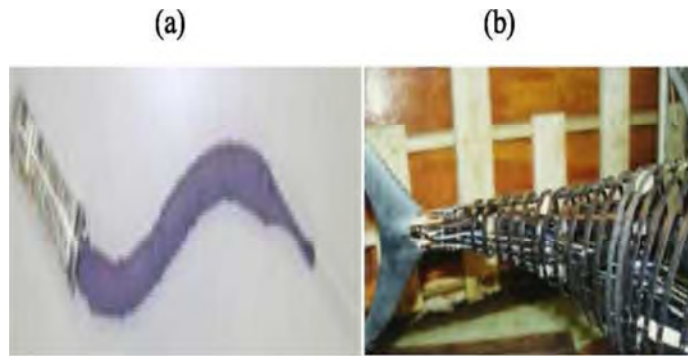


Figure 1.15 Les systèmes biomimétiques sous-marins **1.2**, (a) Le robot Anguille, USA,
(b) Le robot Tuna, USA

1.3.2.2 Forme des véhicules sous-marins autonomes :

Prenant en compte les caractéristiques de la forme, on peut souligner trois configurations principales [10].

- **Forme cylindrique :**

Ils sont pourvus d'un unique propulseur arrière, d'un gouvernail et de deux paires de barres de plongée horizontale situées à l'arrière, ou à l'arrière et à l'avant. (Figure 1.16)

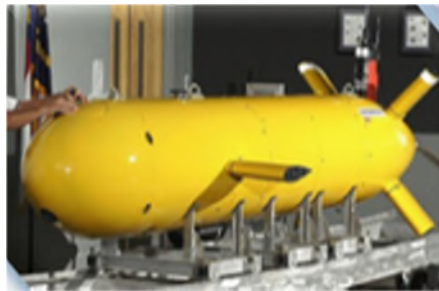


Figure 1.16 AUV forme cylindrique.

- **Forme parallélépipédique :**

Ils possèdent deux propulseurs à l'arrière, et deux paires de surfaces mobiles situées à l'arrière et l'avant, pour contrôler la plongée. Pour le changement dans le plan horizontal (cap), il existe deux possibilités. (Figure 1.17)

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



Figure1.17 AUV forme parallélépipédique.

- **Forme ellipsoïdale**

Ils sont équipés d'un propulseur arrière et de quatre surfaces mobiles situées à l'arrière, deux pour le changement de la plongée et deux pour le contrôle de cap.(Figure1.18)



Figure1.18 AUV forme ellipsoïdale.

Résumé des engins sous-marins :

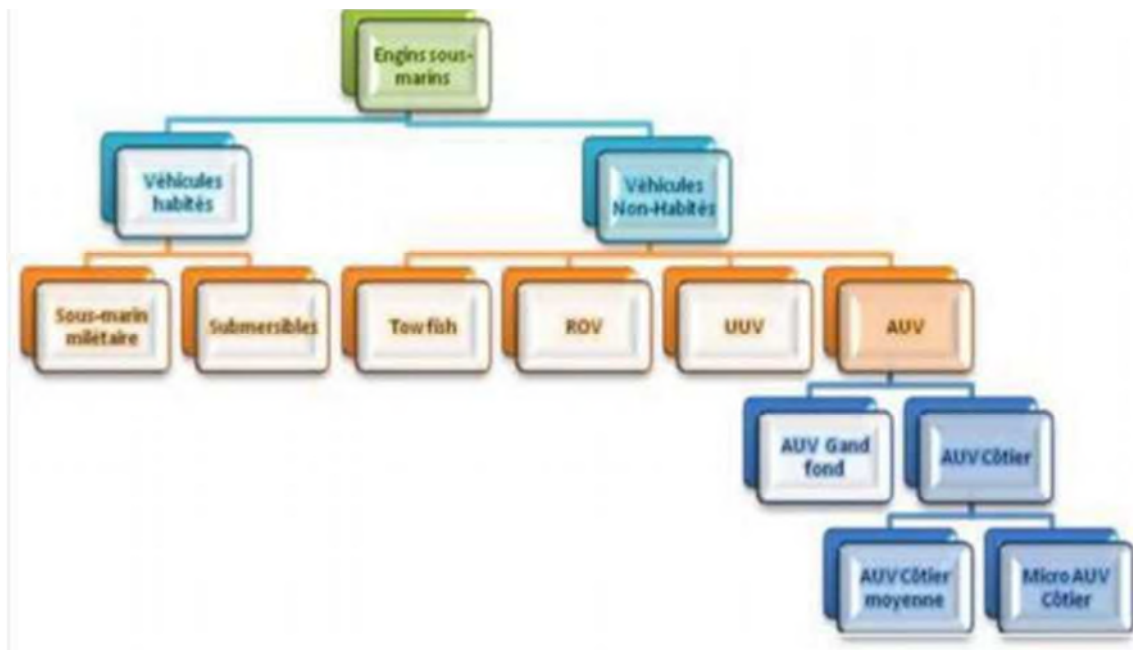


Figure 1.19 Classification des engins sous-marins

1.4 Les différentes stratégies de commande utilisées dans la recherche bibliographique :

Le thème De la commande d'un véhicule sous-marin reste encore aujourd'hui un problème avec certaines difficultés. L'existence de fortes non linéarités dans la modélisation, les incertitudes sur les paramètres du modèle, les couplages importants, le véhicule est sous actionné, la difficulté pour mesurer les perturbations (courants marins, effets des vagues). La commande d'un AUV doit être suffisamment robuste vis-à-vis des perturbations.

Les solutions proposées pour commander un tel engin sont nombreuses. En peut citer principalement :

1.4.1 Les commandes linéaires :

Les lois de commande linéaire ont l'avantage d'être simple à mettre en œuvre. Leur principe de fonctionnement consiste à exprimer la commande du système en fonction des erreurs des états que l'on souhaite commander. Une combinaison des correcteurs proportionnel(P), Dérivé(D) et Intégral(I) est recommandée pour obtenir de meilleures performances. Néanmoins, le principal inconvénient de ces commandes est qu'elles sont conçues en utilisant le modèle linéaire autour d'un point de fonctionnement. Si on s'éloigne de ce point, le modèle n'est plus valable, ainsi que les conditions de stabilité.

(*Jalving, 1994*) [10] : propose des stratégies de commande PID afin de contrôler le robot NDRE (Norwegian Defence Research Establishment). Le contrôleur linéaire est implanté en trois parties distinctes : une pour le plan vertical, une pour le plan horizontal et une pour le contrôle de la vitesse suivant l'axe longitudinal du véhicule. Les résultats expérimentaux montrent un comportement acceptable de l'engin.

(*prestero, 2001*) [11] : a développé un modèle dynamique non linéaire du REMUS au cours de ses travaux au WHOI " Woods Hole Oceanographic Institution " (USA).

A partir d'un modèle linéaire pour l'immersion du véhicule, il fait l'implantation d'une commande PID par retour d'état pour contrôler la profondeur et le tangage du robot. Les résultats de simulation obtenus montrent des performances satisfaisantes.

1.4.2 Les commandes non linéaires :

Les lois de commande non linéaire prennent en considération les couplages et les non linéarités du système. L'inconvénient est que ces lois sont, en générale, complexe et

couteuses en temps de calcul. De plus, l'efficacité de ce type de loi est directement liée à la validité du modèle de l'engin.

(*Santos, 1995*) [12] : dans son travail de thèse, a fait l'étude d'une loi de commande référencée capteur pour permettre à un AUV de faire du suivi de fond. Pour ses simulations, il utilise un modèle du robot dans le plan de plongée tenant compte des non linéarité des gouvernes. Il a opté pour une loi de commande de type LQG /LTR (Linéaire Quadratique Gaussienne / Loop Transfer Recovery), l'observateur est basé sur un filtre de Kalman étendu. Les résultats obtenus semblent satisfaisants.

(*Martins- Encarnacao,2002*) [13] : a proposé des lois de commande basés sur les techniques de Lyapunov et Backstepping. Il utilise un modèle non linéaire du robot portugais Infante " titre des enfants puinés des rois de rois de Portugal ". Seuls des résultats de simulation sont présentés dans ses travaux.

(*Lapierre and Soetanto, 2007*) [14] : propose une loi de commande non linéaire dans le plan horizontal appliquée au suivi de chemin d'un AUV. Ce contrôle de véhicules sous-marins est basé sur un guidage non singulier inspiré des principes de Lyapunov.

➤ **Les commandes en régime glissant :**

La commande en régime glissant est une technique répandue pour la commande des robots sous-marins. Elle garantit une robustesse vis-à-vis des perturbations, son inconvénient majeur étant la réticence. Le phénomène de réticence est indésirable est nuisible pour les actionneurs, caractérisé par des commutations à très haut fréquence.

(*Cristi et all, 1990*) [15] : ont apporté une solution au problème de la commande dans le plan vertical pour le véhicule NPS (Naval Postgraduate School). Ils utilisent un modèle linéarisé dans le plan de plongée pour la conception d'une loi de commande en régime glissant adaptative. La partie linéaire adaptative du contrôleur est déterminée à chaque Période d'échantillonnage. La loi a été testée dans un simulateur. Son comportement est satisfaisant devant les incertitudes paramétriques, les perturbations et les dynamiques non modélisées.

(*Rodrigues et all, 1996*) [16] : ont proposé d'implanter une loi en mode glissant d'ordre un pour l'AUV " Infante ". Ils utilisent deux modèles linéaires simplifiés découplés, un pour le plan de plongée et un pour le plan horizontal. Ces lois de commande sont testées en simulation avec le modèle linéaire du véhicule. Elles montrent un comportement acceptable devant des variations des paramètres hydrodynamiques de l'ordre de 30 pourcent.

(*Salgado- Jimenez, 2004*) [17] : dans ses travaux de thèse, a présenté des résultats de simulation du véhicule sous-marin Taipan " Torpedo for Active Inspection, Piloting and Autonomous Navigation " . Il a étudié les régimes glissants d'ordre un en utilisant un modèle linéarisé en immersion de l'engin. Pour contrer l'effet de réticence, il a pour suivi ses recherches sur les régimes glissants d'ordre deux. Il y expose des résultats de simulation de plusieurs lois de commande d'ordre supérieur.

(*Jean-Mathis Spiewak, 2007*) [18] : dans ces travaux de thèse, a présenter des résultats d'expérimentations en mer de véhicule sous-marine autonome de type torpille. Il a étudié les régimes glissants d'ordre un en utilisant un modèle linéarisé en plant vertical et plant horizontal de l'engin. Pour contrer l'effet de réticence, il a poursuivi ses recherches sur les régimes glissant d'ordre deux dans le plant vertical. Il a terminé leurs travaux par une étude de coordination multi-robot sous-marin autonome.

(*Halil Akcakaya, 2009*) [19] : dans ses travaux, il a étudié les régimes glissants d'ordre un en utilisant un modèle linéarisé en plan horizontal du robot. Pour contrer l'effet de réticence, il a changé la fonction de saturation 'signe' dans la partie glissante de la commande par une fonction de saturation plus douce. il y expose des résultats de simulation de plusieurs essais.

(*Marzbanrad, A. R, 2011*) [20] : il a étudié les régimes glissants d'ordre un en utilisant un modèle linéarité du robot sous-marin télé-opéré. Pour contrer l'effet de réticence, il a poursuivi ses recherches sur les lois de commande par logique floue. Il y expose des résultats de simulation de plusieurs essais.

(*He-ming, 2012*) [21] : dans ses travaux. Il a étudié la commande barckstepping un en utilisant un modèle en immersion du robot sous-marin autonome. Il y expose des résultats de simulation de plusieurs essais.

(*Simon. A, 2014*) [22] : dans ses travaux il a fait une étude comparative entre une commande classique basé sur un régulateur PID et la commande robuste par régime glissant d'ordre un ,pour commander un micro robot sous-marin autonome, il a utilisé un modèle linéaire du robot dans le but de contrôler la profondeur de l'engin, les résultats des simulations et d'expérimentations a montrés la différence entre les deux commande dans la convergences vers les états désirés .

(*Zool H, 2015*) [23] : il a développé une technique de commande par mode glissant de deuxième ordre, dans le but de commander le drone sous-marin de forme sphérique on garantissant les performances des systèmes devant les perturbations externes et les

incertitudes du modèle. Il y expose des résultats de simulation de plusieurs essais pour montrer l'efficacité de cette technique de commande.

1.4.3 Les commandes de techniques d'intelligence artificielle :

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels. Elle peut généraliser des modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prise en charge par les humains. En effet, la logique floue a été introduite pour rapprocher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans la capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

(Anirban N and all, 2013) [24] : dans ses travaux, il a fait une étude comparative entre une commande classique basé sur les régulateurs PID et la commande floue, pour commander un robot sous-marin autonome, il a utiliser un modèle linéaire du robot dans le but de contrôler le profondeur de l'engin, les résultats de simulation a montré la différence entre les deux commandes dans la convergence vers les états désirés.

(Kailei L and all, 2013) [25]: il a proposé dans ses travaux un contrôleur neural floue (appelée NFLC) accordé automatiquement par des algorithmes génétiques (GA) pour commander un véhicule sous-marins autonome dans le plan horizontal. Les techniques neuro-flous qui combinent la capacité d'apprentissage du réseau neuronal avec l'avantage de la structure basée sur des règles de la logique floue. Algorithme génétique est un algorithme de recherche robuste basé la survie darwinienne des plus aptes dans l'évolution naturelle. Il a été prouvé être un mécanisme d'optimisation efficace dans des espaces de recherche complexes. Il y expose des résultats de simulations pour une étude comparatif entre la commande floue et la commande neuro-floue avec optimisation par algorithme génétique (GANFLC).

1.5 Les avantages de la commande par mode glissant flou :

Le mode glissant présente les caractéristiques suivantes :

- La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations.
- Il suffit de connaître une borne pour ν , ce qui simplifie le réglage.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de ν . [37]

Évidemment, le réglage par logique floue réunit un certain nombre d'avantages lesquelles :

- Le non nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- La matrice de système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- La disponibilité de système de développement efficace, soit pour microprocesseur ou PC (solution logicielle), soit pour circuit intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processors).

1.6 Conclusion :

Dans cette présentation nous avons parlé à l'historique des véhicules sous-marins autonome, leurs applications, et leurs classifications suivant la forme, la taille Ainsi, nous avons citée les différentes stratégies de commande utilisée, et les avantages de la commande qu'on a proposée pour notre véhicule.

Pour effectuer les lois de cette commande nous avons besoin de modéliser ce véhicule mathématiquement.

Chapitre 02:

Modélisation du robot sous-marin autonome

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une modélisation mathématique d'un véhicule sous-marin autonome, les équations du modèle décrivent le comportement du robot sous-marin dans l'espace (6 degrés de liberté). Ces équations modélisent ainsi deux aspects principales distincts: cinématique et dynamique.

2.2 Modélisation générale du robot sous-marin autonome

2.2.1 Conventions et hypothèses de base référentiels :

La modélisation nécessite l'étape de définir des référentiels par rapport aux quels on décrira l'évolution de l'engin, comme le montre la figure 2.1. On définit d'abord le repère absolu $R_0 = (0, x_0, y_0, z_0)$, 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 essentielle de ce repère est qu'il est fixe par rapport à la terre ce qui lui confère les propriétés d'un repère galiléen, ou inertiel. L'effet de rotation du globe terrestre est considéré comme négligeable au niveau de l'engin et de son voisinage. Un second repère le repère du véhicule $R_v = (C, x_v, y_v, z_v)$ lié au véhicule permet d'exprimer les vitesses de l'engin.

Les principaux axes d'inertie du véhicule coïncident avec les axes du repère :

- 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.

Le choix du point d'origine C de ce repère est stratégique. La SNAME [Society of Naval Architectes and Marine Engineers] propose une méthode pour choisir son emplacement en fonction des caractéristiques géométriques de l'engin[27][28].

Dénomination des variables

On définit dans le repère terrestre la position du véhicule $\eta = [\eta_1, \eta_2]^T$, avec :

- $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$: Les trois composantes de position.

- $\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$: Les trois composantes d'orientation.

Et η_2 est défini par :

- ϕ : L'angle de Roulis
- θ : L'angle de Tangage
- ψ : L'angle 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

Ou v_1 est défini par ;

- u : vitesse d'avancement
- v : Vitesse d'glissement
- w : Vitesse de descente

Et v_2 est défini par :

- $p = \dot{\phi}$: Vitesse de Roulis
- $q = \dot{\theta}$: Vitesses de Tangage
- $r = \dot{\psi}$: Vitesses de Lacet

Finalement nous allons définir un vecteur des forces et moments $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2]^T$ appliqués au repère du véhicule :

- $\Gamma_1 = [X \ Y \ Z]^T$: Les forces.
- $\Gamma_2 = [K \ M \ N]^T$: Les moments

La modélisation de robot est décrite en deux parties : le modèle cinématique, qui traite des aspects géométriques du mouvement. Et le modèle dynamique, qui analyse l'effet des forces et des moments qui génèrent le mouvement.

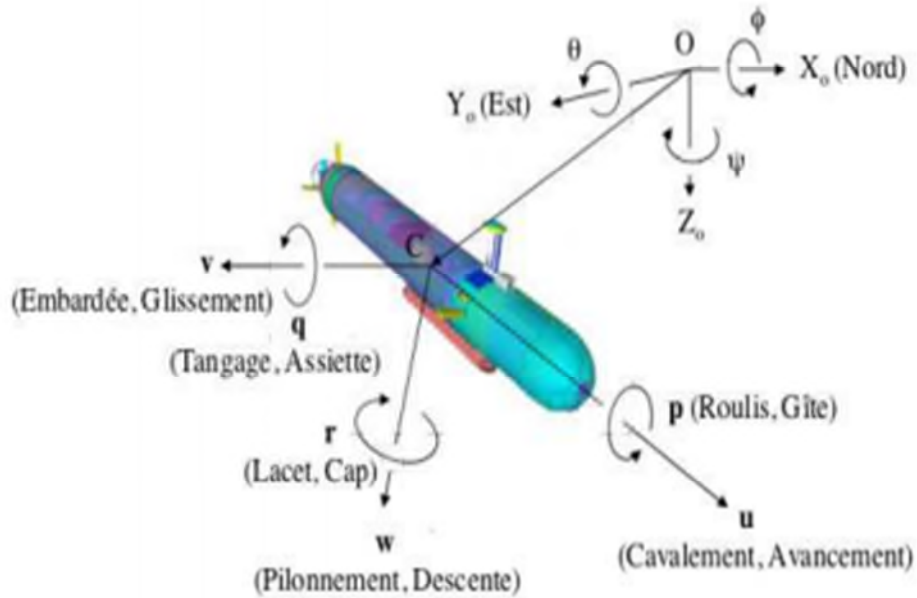


Figure 2.1 : Repères fixe et inertiel, Variables d'état

La modélisation du robot est décrite en deux parties : le modèle cinématique, qui traite des aspects géométrique du mouvement. Et le modèle dynamique, qui analyse l'effet des forces et des moments qui génèrent le mouvement

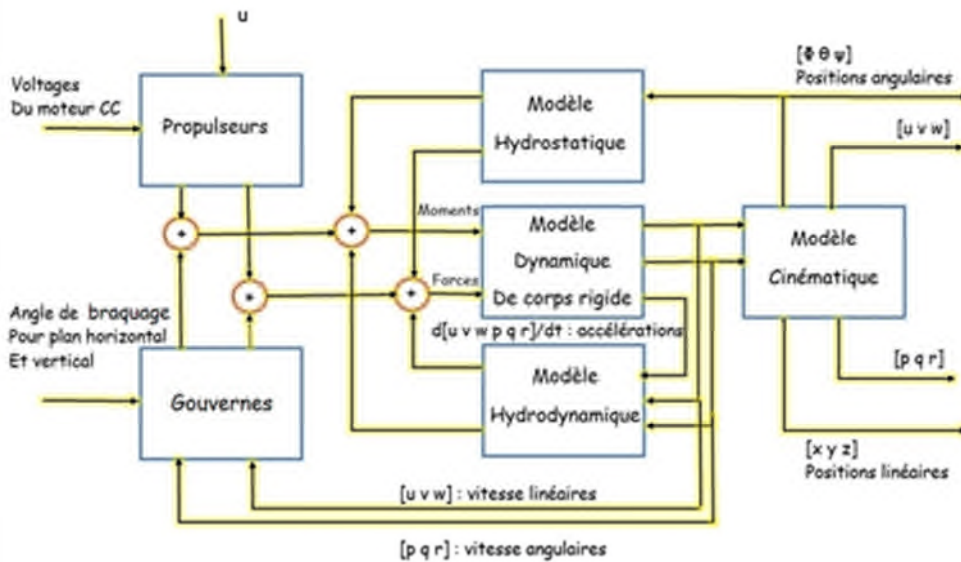


Figure 2.2 : Schéma de la modélisation globale du robot

2.2.2 Modèle Cinématique :

L'orientation est décrite par le vecteur $\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$, Les angles sont définis comme suit ; les trièdres $R_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 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 0_{z_3} , angle de lacet (cap), figure 2.2(a)
- Rotation θ autour de 0_{y_2} , angle de tangage (assiette), figure 2.2(b)
- Rotation ϕ autour de 0_{x_1} , angle de roulis (gite), figure 2.2(c)

Transformation des vitesses linéaires :

La trajectoire du véhicule dans le référentiel inertiel lié à la terre est donnée par la relation cinématique suivante :

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1$$

Où $J_1(\eta_2)$ 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.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\theta \cdot \cos\psi & \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi - \sin\psi \cdot \cos\phi & \sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\psi + \sin\psi \cdot \sin\phi \\ \cos\theta \cdot \sin\psi & \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi + \cos\phi \cdot \cos\psi & \sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \sin\psi - \cos\psi \cdot \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \cdot \sin\phi & \cos\theta \cdot \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Transformation des vitesses angulaires :

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

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2$$

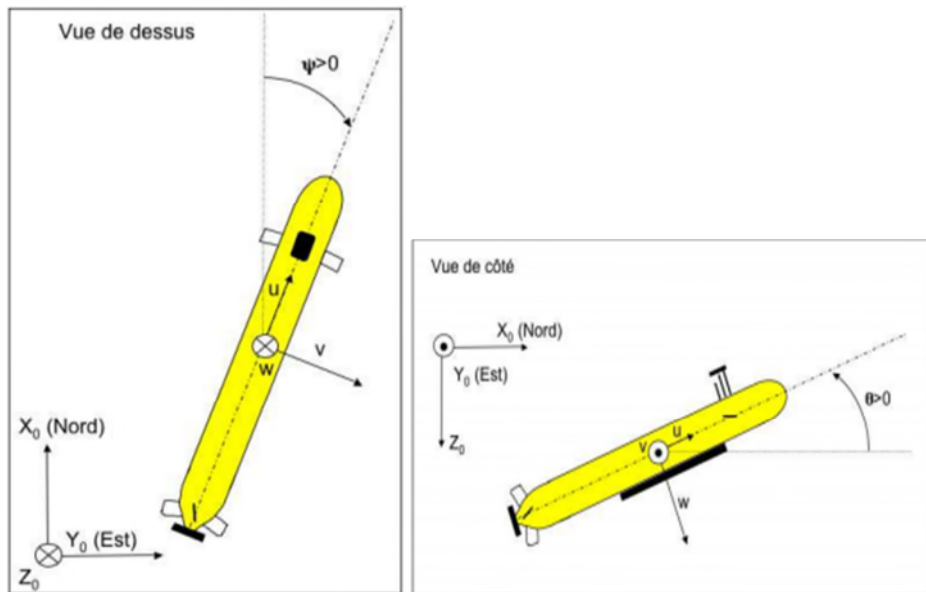
Où $J_2(\eta_2)$ est la matrice :

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\theta \cdot \tan\theta & \cos\phi \cdot \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix}, \theta \neq \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (2.2)$$

En résumé, la relation cinématique avec les transformations (2.1) et (2.2) s'écrit :

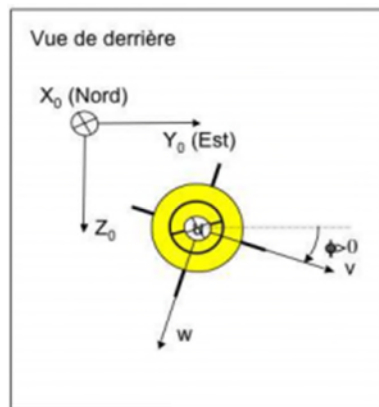
$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

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 $J_1(\eta_2)$ et $J_2(\eta_2)$ (3 rotations successives pour passer de R_0 à R_v), il pourra se référer à [29] ou encore à [27].



(a) Angle de Lacet

(b) Angle de Tangage



(c) Angle de Roulis

Figure 2.3: définition des angles de rotation

2.2.3 Modèle dynamique :

Le robot sous-marin est considéré comme indéformable, ce qui signifie que sa structure est rigide et que les coordonnées de son centre de gravité sont constantes dans son propre repère. Dans la dynamique du corps rigide, les impacts des forces et des moments extérieurs sont étudiés.

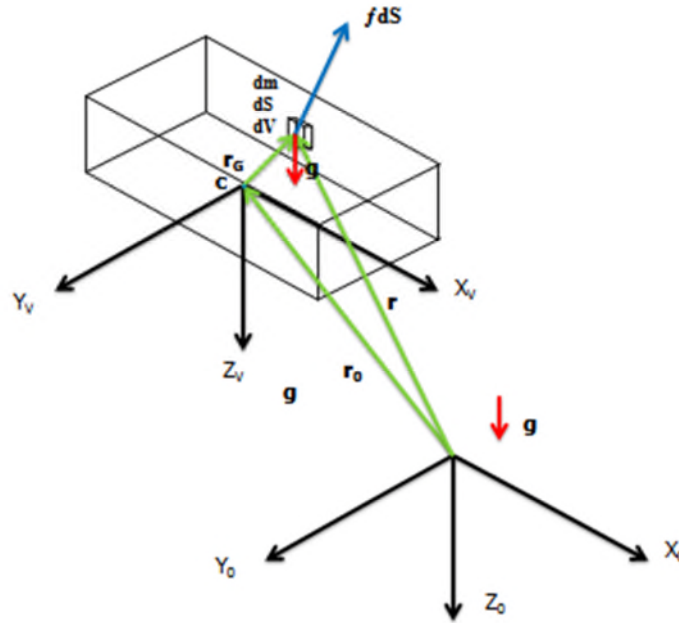


Figure 2.4 : Schéma d'un solide indéformable lié à un repère terrestre et au repère fixe lié au corps.

Considérons la deuxième loi de Newton pour les mouvements linéaires et angulaires

Équations des forces :

$$\int_V \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V \rho_A g dV + \int_S f dS \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow m * \gamma = \sum F$$

Équations des moments :

$$\int_V \frac{d}{dt} \left(r * \frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V r \times \rho_A g dV + \int_S r \times f dS \quad (2.5)$$

$$\Rightarrow I * \alpha'' = \sum M$$

Où,

- $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}_G$ est défini dans la figure (2.3).
- ρ_A est la densité de masse du robot

Les forces appliquées sont divisées en forces de surface et forces de volume, avec :

- $\int_V \rho_A g dV$: force de pesanteur.
- $\int_S f dS$: force du frottement.
- $\int_V \rho_A dV$: masse du solide.

Théorème (dérivé d'un vecteur dans un repère rotatif)

$$\left(\frac{dc}{dt}\right)_{x_0y_0z_0} = \left(\frac{dc}{dt}\right)_{x_vy_vz_v} + \omega \times C_g$$

- $(x_0y_0z_0)$: les coordonnées du repère fixe
- $(x_vy_vz_v)$: les coordonnées du repère fixe
- ω : vitesse angulaire.
- C_g : centre de gravité.

On peut s'écrire l'équation précédente sous la forme :

$$\dot{c} = \dot{c} + \omega \times c$$

Noter pour cela,

$$\dot{\omega} = \dot{\omega} + \underbrace{\omega \times \omega}_0 = \dot{\omega}$$

Ou $\dot{\omega}$ est indépendant du système, l'équation (2.3) est écrite comme suit :

$$\int_V \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V \frac{d}{dt} \left(\frac{dr_0}{dt} + \frac{dr_G}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V f(\dot{v}_0 + \ddot{r}_G) \rho_A dV \quad (2.6)$$

Le centre du robot $x_vy_vz_v$ doit être fixe, impliqué $\dot{r}_G = 0$, cela peut résumer les relations suivants :

$$\begin{aligned} \dot{r}_G &= \dot{r}_G + \omega \times r_G = \omega \times r_G \\ \ddot{r}_G &= \dot{\omega} \times r_G + \omega \times \dot{r}_G \\ \ddot{r}_0 &= \dot{v}_0 = \dot{v}_0 + \omega \times v_0 \end{aligned}$$

Par substitution l'équation devient :

$$\int_V (\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) \rho_A dV = \int_V \rho_A g dV + \int_S f dS \quad (2.7)$$

Si nous supposons que le robot a une masse constante c'est-à-dire $m = \int_V \rho_A dV$, l'équation (2.7) sera simplifiée :

$$m(\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) = f_0 \quad (2.8)$$

Ici nous avons rassemblé toutes les forces externes qui expriment les mouvements de translation. Pour l'équation des mouvements de rotation peut être réécrite d'une façon semblable. Considérons l'équation (2.5) :

$$\int_V \left(\frac{dr}{dt} \times \frac{dr}{dt} \right) \rho_A g dV + \int_V r \times \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V r \times \rho_A g dV + \int_S r \times f dS$$

Puisque $\frac{dr}{dt} \times \frac{dr}{dt} = 0$ et $r = r_0 + r_G$, nous obtenons :

$$\int_V (r_0 + r_G) \times \ddot{r} \rho_A dV = \int_V (r_0 + r_G) \times \rho_A g dV + \int_S (r_0 + r_G) \times f dS$$

Dans cette expression nous pouvons éliminer les termes identifiées comme mouvement linéaire, équation (2.4), C'est-à-dire.

$$r_O \times \left(\underbrace{\int_V \ddot{r} \rho_A dV - \int_V \rho_A g dV - \int_S f dS}_0 \right) = 0$$

L'équation précédente devient :

$$\int_V r_G \times (\ddot{r}_0 + \ddot{r}_G) \rho_A dV = \int_V r_G \times \rho_A g dV + \int_S r_G \times f dS \quad (2.9)$$

Finalement,

$$\int_V r_G (\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) \rho_A dV = \int_V r_G \times \rho_A g dV + \int_S r_G \times f dS \quad (2.10)$$

Nous observons qu'il est possible de récrire la dernière équation (2.10) en utilisant l'expansion de produit triple vecteur $a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$ avec $a = b = \omega$ et $c = r_G$, qui rapporte :

$$\begin{aligned} \int_V r_G \times (\omega \times (\omega \times r_G)) \rho_A dV &= \int_V r_G \times (\omega(\omega \cdot r_G) - r_G(\omega \cdot \omega)) \rho_A dV \\ &= \int_V r_G \times \omega(\omega \cdot r_G) \rho_A dV - \int_V \underbrace{r_G \times r_G}_0 (\omega \cdot \omega) \rho_A dV \end{aligned}$$

En utilisant la définition du tenseur I_0 d'inertie (calculé en ce qui concerne l'origine locale), il est possible de réécrire :

$$\begin{aligned} \int_V r_G \times (\omega \cdot r_G) \rho_A dV &= I_0 \omega \\ \int_V r_G \times \omega(\omega \cdot r_G) \rho_A dV &= \omega \times (I_0 \omega) \end{aligned}$$

Où,

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Avec, les I_{ii} étant les moments d'inertie et les I_{ij} les produits d'inertie, définis comme Suits :

$$I_{xx} = \int_V ((y^2 + z^2) \rho_A) dV, I_{xy} = \int_V (x \cdot y \cdot \rho_A) dV$$

$$I_{yy} = \int_V ((x^2 + z^2) \rho_A) dV, I_{xz} = \int_V (x \cdot z \cdot \rho_A) dV$$

$$I_{zz} = \int_V ((x^2 + y^2)\rho_A)dV, I_{yz} = \int_V (y \cdot z \cdot \rho_A)dV$$

Finalement l'équation (2.10) peut être écrite comme :

$$mr_G \times \dot{v}_0 + mr_G \times (\omega \times v_0) + I_0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) = m_0 \quad (2.11)$$

Où,

- Forces externes : $f_0 = \Gamma_1 = [X \ Y \ Z]^T$
- Moments externes : $m_0 = \Gamma_2 = [K \ M \ N]^T$
- Vitesse linéaires : $v_0 = v_1 = [u \ v \ w]^T$
- Centre de gravité : $r_G = CG = [x_G \ y_G \ z_G]^T$

Les équations (2.8) et (2.11) sont écrites avec la notation SNAME [Society of Naval Architect and Marine Engineers]

Synthèse : Si on développe les équation (2.8) et (2.11), on obtient :

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\ + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - x_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned}$$

Simplification : La dynamique d'un robot sous-marin donnée dans le système d'équations précédent peut s'exprimer sous la forme [27] :

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \Gamma$$

Avec,

- $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ est le vecteur des vitesses linéaires et angulaires.
- $\Gamma = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ est le vecteur des forces et des moments externes.

M_{RB} : est la matrice d'inertie due à la dynamique du système, c'est une matrice symétrique, c'est-à-dire $M_{RB} = M_{RB}^T$, qui s'exprime ainsi,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & -I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

C_{RB} : Matrice des forces de Coriolis $v_1 \times v_2$ et des forces centrifuges $v_1 \times v_2$ qui s'appliquent au robot. C'est une matrice antisymétrique de dimension 6×6 et sa représentation est (2.13) :

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \\ m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & m(x_G r + v) \\ -m(x_G q - w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q - I_{xx}q \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}q & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ces paramètres sont donnés aux Annexe.

Le vecteur des forces et moments qui s'appliquent sur le robot, peut être décomposé de la façon suivante :

$$\Gamma = \Gamma_h + \Gamma_g + \Gamma_u + \Gamma_p$$

Où,

- Γ_h : regroupe les forces et moments hydrodynamiques,
- Γ_g : est le vecteur des forces et moments dus à l'action de la gravité et de la flottabilité,
- Γ_u : est le vecteur des forces et moments générés par les actionneurs du véhicule.
Nous considérons qu'il est déterminé par l'addition des effets de chacun des actionneurs du véhicule,
- Γ_p : regroupe les forces et moments résultant des perturbations dus à l'environnement (courants marins, houle,...).

2.2.4 Les efforts hydrodynamiques

Ils agissent sur tout corps immergé en mouvement relatif dans un fluide visqueux, et peuvent être classés comme suit :

1. Les forces et moments dus à l'inertie et à la masse d'eau ajoutée,
2. Les forces dus aux frottements visqueux du fluide sur le corps,

La principale difficulté réside dans leur connaissance et leur formulation. En effet, ces efforts ne peuvent pas être obtenus de manière analytique. [30].

Inertie et la masse d'eau ajoutées

Du point de vue physique, tout corps mobile en eau libre provoque un déplacement d'une certaine quantité de cette eau. Le bilan des efforts dus à l'inertie et à la masse d'eau ajoutée peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma_a = -(M_a \dot{v} + C_a(v)v) \quad (2.14)$$

Où,

M_a la matrice d'inertie ajoutée, définie strictement positive et dont les termes sont constants et calculés pour l'ensemble du véhicule :

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

Les efforts hydrodynamiques sont deux aux changements d'énergie cinétique entre un solide et les particules du fluide. Le calcul des efforts de masse ajoutée commence donc par la définition de cette énergie cinétique :

$$T_a = \frac{1}{2} v^T M_a v$$

Les forces et les couples générés par le changement d'énergie cinétique du fluide sont déterminés directement avec les équations de Kirchhoff :

$$\text{Force} : \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_a}{\partial v_1} \right) + v_2 \times \frac{\partial T_a}{\partial v_1} = -f_a$$

$$\text{Couple : } \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_a}{\partial v_2} \right) + v_2 \times \frac{\partial T_a}{\partial v_2} + v_1 \times \frac{\partial T_a}{\partial v_1} = -n_a$$

Une propriété essentielle de cette matrice est : $M_{ij} = M_{ji}$. Nous pouvons ajouter aussi que, par convention, tous les coefficients sont négatifs. Il faut signaler aussi que les symétries de forme que présente un engin de type torpille vont simplifier cette matrice. Si nous considérons que le véhicule à des plans de symétrie, suivant $(x_v y_v)$, $(x_v z_v)$, nous avons alors :

$$M_a = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

C_a : est la matrice des forces de coriolis et des forces centrifuges hydrodynamiques, pour une classe de sous-marin destinés à des déplacements à faible vitesse, certains termes (de couplage) deviennent négligeable [27], elle peut se mettre sous la forme :

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{r}}r \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{r}}r & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u - Z_{\dot{w}}u & Y_{\dot{v}}v & -Z_{\dot{q}}u & -K_{\dot{p}}p + N_{\dot{r}}p \\ 0 & X_{\dot{u}}u - Y_{\dot{v}}u & 0 & -Z_{\dot{q}}w & K_{\dot{p}}p - M_{\dot{q}}p & -Y_{\dot{r}}u \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La section A.3 donne une méthode de calculs de ces paramètres. Les valeurs numériques des éléments des équations (2.15) et (2.16) se trouvent au Annexe.

Forces d'amortissement

Ce sont des efforts de résistance de l'eau aux mouvements de l'engin. Ils sont représentés par une matrice $D(v)$ strictement négative, le signe négatif signifie que les forces et couples sont appliqués au corps par l'environnement. Ces efforts sont nuls lorsque la vitesse est nulle.

Les efforts d'amortissement sont dus principalement à trois conséquences, dont certaines sont prépondérantes pendant que d'autres peuvent être négligés :

- La force d'amortissement due à la rugosité de solide : il peut exister dans le cas où la rugosité de la surface du solide soit importante. Le robot présente un extérieur lisse qui fait que cet effet soit minime.
- La force d'amortissement induit : sont les forces induites lors de la formation des tourbillons à l'arrière d'un solide. Les effets de cette force sont souvent petits et ils ne seront pas pris en compte.
- La force d'amortissement due à la forme, elle est représentée par :

$$D_f = -\frac{1}{2}\rho C_D A |v|v$$

est qui présente la force de traînée.

Où

- ρ est la densité du fluide.
- C_D est un coefficient de traînée
- A est la surface du corps en incidence
- v est le vecteur de vitesse

Le bilan des efforts dus aux amortissements, qui regroupe les efforts de traînée et de portance, peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma_d = -D(v)v$$

La matrice d'amortissement pour le robot est :

$D(v)$

$$= - \begin{bmatrix} X_{uu}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uu}|v| + Y_{uv} & 0 & 0 & 0 & Y_{rr}|r| \\ 0 & 0 & Z_{ww}|w| + uZ_{uw} & 0 & Z_{qq}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{pp}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{ww}|p| & 0 & M_{qq}|q| + uM_{uq} & 0 \\ 0 & N_{vv}|v| & 0 & 0 & 0 & N_{rr}|r| + uN_{ur} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Les valeurs des paramètres de la matrice précédente sont listées au Annexe.

2.2.5 Les efforts hydrostatiques

Ce sont des efforts qui se présentent quand l'engin est à l'arrêt complet, ils dépendent des caractéristiques du véhicule ainsi que des propriétés du milieu aquatique.

La poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est un effet statique dû à la présence d'un solide immergé dans un fluide. Il est égal à la force opposée au poids que subit le volume de fluide contenu dans l'enveloppe immergée du système.

$$BB = \rho \cdot V_{fl} \cdot g \quad (2.18)$$

Où

- ρ : densité du fluide
- V_{fl} : le volume de fluide déplacé, ou volume du solide.

$$V_{fl} = \frac{\pi}{4} (2r)^2 l$$

- r : rayon
- l : longueur
- g : l'accélération gravitationnelle

Forces de pesanteur

Le poids engendre des effets opposés à ceux de la poussée d'Archimède et s'applique au centre de gravité du solide. On le modélise ainsi :

$$WW = m \cdot g \quad (2.19)$$

Où, m masse du solide

Les équations (2.18) et (2.19) permettent d'établir une relation d'équilibre hydrostatique exprimé avec l'expression suivante : $G = WW - BB$, appelée aussi résultante hydrostatique. Le comportement du solide immergé dépend du signe de G . la figure (2.4) distingue les trois comportements possibles pour un solide immergé :

- (a) flottation : le solide remonte à la surface,
- (b) flottabilité neutre : le solide est en équilibre hydrostatique,
- (c) immersion : le solide plonge.

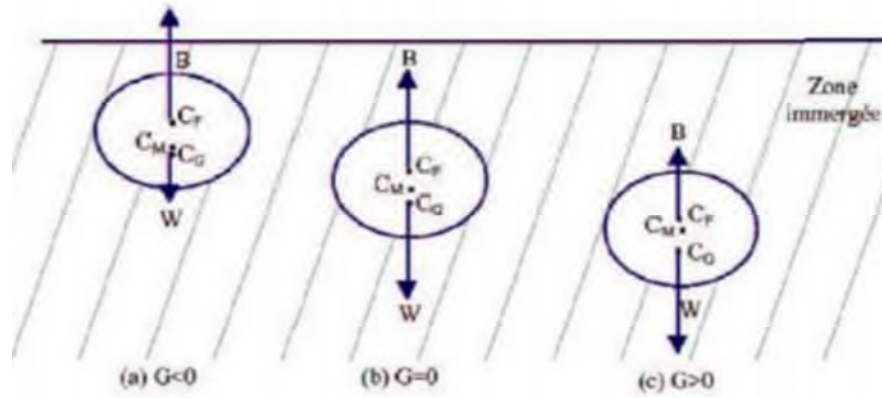


Figure 2.5: Equilibre hydrostatique

Où,

- C_F : Centre de flottabilité,
- C_G : Centre de gravités,
- C_M : Centre de masse.

Le bilan des efforts hydrostatiques peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma_g = -g(\eta)$$

En appliquant les résultats de la section 2.2.2, la force du poids et la force de flottabilité peut être transformé :

$$f_G = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ WW \end{bmatrix}, \quad f_B = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ BB \end{bmatrix}$$

Où $J_1(\eta_2)$ est matrice de transformation de coordonnées définies dans section 2.2.2.

$$\Gamma_g = \begin{bmatrix} f_G - f_B \\ r_G \times f_G - r_B \times f_B \end{bmatrix}$$

Noter que le z est positif vers le bas.

Finalement le couple résultant de la gravité et de la flottabilité (poussée d'Archimède) dans le cas d'un véhicule sous-marin en immersion s'exprime par :

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (WW - BB)\sin\theta \\ -(WW - BB)\cos\theta\sin\phi \\ -(WW - BB)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_G WW - y_B BB)\cos\theta\cos\phi + (z_G WW - z_B BB)\cos\theta\sin\phi \\ (z_G WW - z_B BB)\sin\theta + (x_G WW - x_B BB)\cos\theta\cos\phi \\ -(z_G WW - z_B BB)\cos\theta\sin\phi - (y_G WW - y_B BB)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Les paramètres du robot sont donnés à l'annexe.

2.2.6 Gouvernes du robot

Le robot est de forme cylindrique, elle est équipée d'un gouvernail à l'arrière et une paire de barres de plongée situées à l'arrière. Cette dernière, permette de contrôler l'angle d'assiette du robot et son immersion, tandis que le gouvernail permet de commander le suivi de cap. Le robot possède à l'arrière un unique propulseur qui n'est pas orientable, voir Figure (2.6). Cette configuration matérielle est très fréquente pour les robots autonomes sous-marins de type torpille [31].



Figure 2.6 : Actionneurs du robot

Le principe de fonctionnement des surfaces mobiles repose sur celui déjà exposé dans le paragraphe 2.2.3. Toute surface en incidence par rapport à un fluide visqueux en écoulement est soumise à une force de portance perpendiculaire à cette surface et une force de trainée parallèle à celle-ci. La résultante de ces deux forces est exprimée par [12] :

$$F_g = 0.5\rho S_g V_0^2 C_s \delta_e \quad (2.21)$$

$$M_g = x_{fin} * F_g$$

Où

- ρ est la masse volumique du fluide
- S_g est la surface du corps en incidence
- V_0 est la vitesse relative du corps dans le fluide

- $C_{s\alpha}$ est le coefficient de la pente de l'angle d'attaque effectif α
- δ_c est l'angle de braquage de gouverne
- x_{fin} est la distance d'ancrage par rapport à l'origine local de l'engin

Le coefficient de la pente de l'angle d'attaque effectif est défini par [12]:

$$C_{s\alpha} = \frac{dC_s}{d\alpha} = \left[\frac{1}{2\bar{\alpha}\pi} + \frac{1}{\pi(AR_e)} \right]^{-1}$$

Où

- AR_e est l'allongement effectif de l'aile : $AR_e = 2 \frac{b_g^2}{s_g}$
- s_g est la surface de l'aile
- b_g est l'envergure (longueur) de l'aile
- $\bar{\alpha}$ paramètre de la pente de l'aile.

Parce que les gouvernes sont situées à un certain décalage par rapport au centre du corps du robot, ils subissent à vitesses effectives suivantes :

$$\begin{aligned} u_{fin} &= u + z_{fin}q - y_{fin}r \\ v_{fin} &= v + x_{fin}r - z_{fin}p \\ w_{fin} &= w + y_{fin}p - x_{fin}q \end{aligned} \quad (2.22)$$

Où

x_{fin} , y_{fin} et z_{fin} sont les coordonnées du surface mobile (gouverne) par rapport au centre du corps du robot. Pour notre robot, nous allons négliger les termes y_{fin} et z_{fin} parce qu'ils sont faibles par rapport aux vitesses de translation du robot.

Les angles de braquage des gouvernes effectif δ_{sc} pour le cap du robot et δ_{sc} pour l'immersion du robot peut être exprimée comme :

$$\begin{aligned} \delta_{re} &= \delta_r - \beta_{re} \\ \delta_{se} &= \delta_s - \beta_{se} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Où δ_r et δ_s sont les références pour l'angle de braquage des gouvernes qui contrôle la coque du robot, et β_{re} et β_{se} sont les angles effectifs d'attaque des ailettes a partir du plan zéro, comme représenté sur les figure 2.27 et 2.28. pour des petits angles, les angles effectifs d'attaque peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} \beta_{re} &= \frac{v_{fin}}{u_{fin}} \approx (v + x_{fin}r) \\ \beta_{se} &= \frac{w_{fin}}{u_{fin}} \approx (w + x_{fin}q) \end{aligned} \quad (2.24)$$

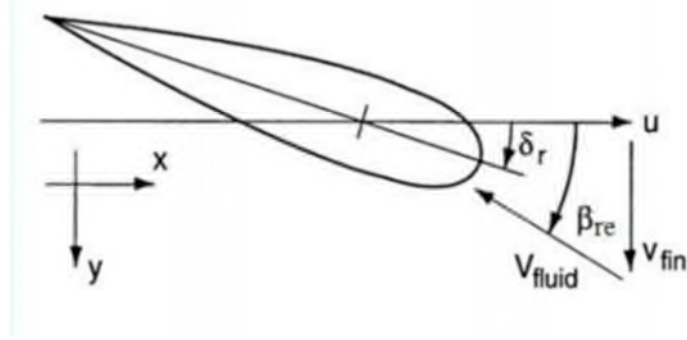


Figure 2.7 : Angle d'attaque effectif de cap

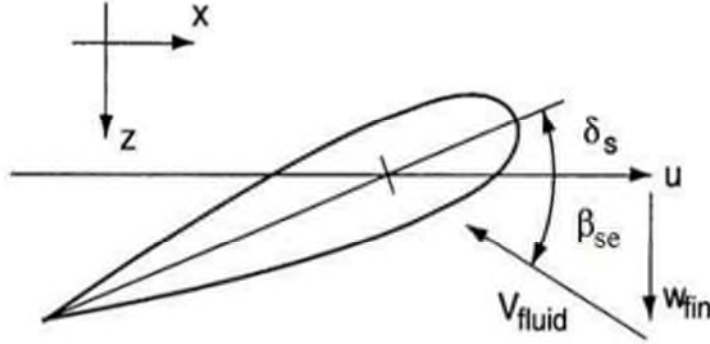


Figure 2.8: Angle d'attaque effectif d'immersion

Substituer les résultats des équations 2.22 ,2.23 et 2.24 dans l'équation 2.25 :

$$\begin{aligned}
 Y_r &= \frac{1}{2} \rho C_{s\alpha} S_g (u^2 \delta_r - uv - x_{fin}(ur)) \\
 Z_s &= \frac{1}{2} \rho C_{s\alpha} S_g (u^2 \delta_s - uw - x_{fin}(uq)) \\
 N_r &= \frac{1}{2} \rho C_{s\alpha} S_g x_{fin} (u^2 \delta_r - uv - x_{fin}(ur)) \\
 M_s &= \frac{1}{2} \rho C_{s\alpha} S_g x_{fin} (u^2 \delta_r - uw - x_{fin}(uq))
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Finalement, les forces et les moments des gouvernes peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}
 Y_r &= Y_{\delta_r} u^2 \delta_r + Y_{uvf} uv + Y_{urf} ur \\
 Z_s &= Z_{\delta_s} u^2 \delta_s + Z_{uwf} uw + Z_{uqf} uq \\
 N_r &= N_{\delta_r} u^2 \delta_r + N_{uvf} uv + N_{urf} ur \\
 M_s &= M_{\delta_s} u^2 \delta_s + M_{uwf} uw + M_{uqf} uq
 \end{aligned}$$

2.2.7 Propulseur

La propulsion du robot est réalisée grâce à un moteur électrique à courant continu avec une hélice, dont le diagramme est montré à la figure (2.9). Afin d'éviter d'avoir un modèle de propulsion complexe, avec des paramètres non-linéaires à calculer ou identifier, on utilisera une représentation simplifiée. Ce type de considération est très utilisé dans le domaine des AUV's. Tout de suite, on va décrire la fonction du propulseur simplifiée, utilisée par le modèle.

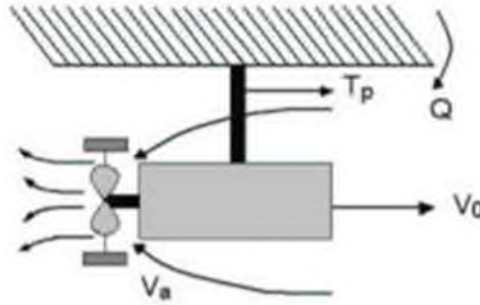


Figure 2.9 : diagramme du propulseur d'AUV

Des pales inclinées formant une hélice sont fixées sur un arbre en rotation et permettent de générer une force de poussée dans l'axe de rotation de l'arbre. Une approximation de la poussée T_p et couple résistant Q générés dans le cas d'un propulseur à une hélice est [32] :

$$T_p = \rho D_p^4 K_T (J_0) |n_p| n_p$$

$$Q = \rho D_p^4 K_Q (J_0) |n_p| n_p$$

Où

- n_p : Vitesse de rotation de l'hélice
- ρ : Masse volumique de l'eau de mer.
- D_p : Diamètre de l'hélice.
- J_0 : Coefficient d'avancement du propulseur dans l'eau :

$$J_0 = \frac{V_a}{n_p D_p}$$

Avec V_a ; la vitesse moyenne de l'eau autour de l'hélice, définie par : $V_a = (1 - w_\alpha) V_0$

Où V_0 est la composante axiale de la vitesse de l'eau en amont du propulseur, et w_α est un coefficient compris dans [0.1 ; 0.4] caractérisant le sillage du véhicule.

- K_T : est le coefficient de poussée, qui est égal à

$$K_T = C_{t_0} + C_{t_1} J_0 + C_{t_2} J_0^2 + C_{t_3} J_0^3$$

Où les constantes sont données dans le tableau (2.1).

- K_Q : est le coefficient du couple, qui est égal à

$$K_Q = C_{q_0} + C_{q_1}J_0 + C_{q_2}J_0^2 + C_{q_3}J_0^3$$

Où les constantes sont données dans le tableau (2.1).

i	C_{t_i}	C_{q_i}
0	0.505390	0.090271
1	-0.088971	-0.023529
2	-0.29960	-0.023529
3	0.046836	-0.0020050

Tableau 2.1 : Coefficients de poussée et de couple

Finalement le vecteur des forces et des moments appliqués par le unique propulseur est représenté comme suit :

$$T_{prop} = \begin{bmatrix} T_p \\ 0 \\ 0 \\ Q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.2.8 Perturbations

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

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

Densité de l'eau de mer

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

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

En conclusion, nous retiendrons que les coefficients hydrodynamiques d'un sous-marin évoluent selon la localisation géographique de l'engin (pôle Nord ou mer Méditerranée par exemple) et sa profondeur.

Courants marins

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

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

Ils sont aussi influencés par la proximité des côtes et la topographie du fond marin. [27] propose, pour les besoins de simulation, un modèle simplifié des courants marins.

2.2.9 Relation générale de la dynamique

La modélisation dynamique d'un robot sous-marin autonome, conduit à l'équation générale suivante :

$$M(\dot{v}) + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \Gamma_u \quad (2.27)$$

Avec,

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

$$M = M_{RB} + M_a$$

Où, M_{RB} et M_a sont respectivement déterminées par les relations (2.12) et (2.15).

- $C(v)$ est le vecteur de forces de Coriolis et l'eau ajoutée, défini par :

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

Où, $C_{RB}(v)$ et $C_a(v)$ étant les matrices respectivement déterminées par les relations (2.13) et (2.16).

- $D(v)$ est la matrice des coefficients d'amortissement déterminée par la relation (2.17)

- $g(\eta)$ est le vecteur des forces et moments dus à l'action de la gravité et de la poussée d'Archimède, défini par (2.20).
- Γ_u est le vecteur des forces et des moments générés par les actionneurs du véhicule. Nous pouvons combinés les termes des équations (2.16), (2.17) et (2.25) sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 Y_{uv} &= Y_{uwl} + Y_{uvf} \\
 Y_{ur} &= Y_{ura} + Y_{urf} = X_{\dot{u}} + Y_{urf} \\
 Z_{uw} &= Z_{uwl} + Z_{uwf} \\
 Z_{uq} &= Z_{uqa} + Z_{uqf} = -X_{\dot{u}} + Z_{uqf} \\
 M_{uw} &= M_{uwa} + M_{uwl} + M_{uwf} = -(Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}) + M_{uwl} + M_{uwf} \\
 M_{uq} &= M_{uqa} + M_{uqf} = -Z_{\dot{q}} + M_{uqf} \\
 N_{uv} &= N_{uva} + N_{uwl} + N_{uvf} = (Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}) + N_{uwl} + N_{uvf} \\
 N_{ur} &= N_{ura} + N_{urf} = Y_{\dot{r}} + N_{urf}
 \end{aligned}$$

2.3 Découplage du modèle mathématique

Dans la partie précédente (section 2.2), nous avons donné une description générale de la modélisation d'un robot sous-marin autonome. Nous avons pu constater que ce modèle est non-linéaire et complexe. De plus, le calcul des paramètres hydrodynamiques est souvent fait à partir d'équations empiriques, ou ils peuvent être obtenus en bassin des carènes. De ce fait, nous proposons, pour avoir un modèle simplifié de notre robot sous-marin, de découpler l'immersion et le cap, afin d'obtenir une modélisation dans chaque plan [17].

2.3.1 Modèle en immersion

Si nous considérons uniquement, la dynamique découplée du robot dans le plan de la plongée, nous avons seulement besoin de considérer les variables suivantes :

- x , la position du véhicule,
- z , sa profondeur,
- θ , son angle de tangage,
- u , sa vitesse d'avancement,
- w , sa vitesse de descente et enfin,
- q , sa vitesse de tangage

Nous supposons nulles les vitesses de glissement, cap et roulis (v, r, p) et nous négligeons les autres variables ne faisant pas parties du plan de plongée. Avec ces suppositions, les 12 éléments du vecteur d'état du système sont simplifiés aux composantes suivantes : u, w, q, z et θ

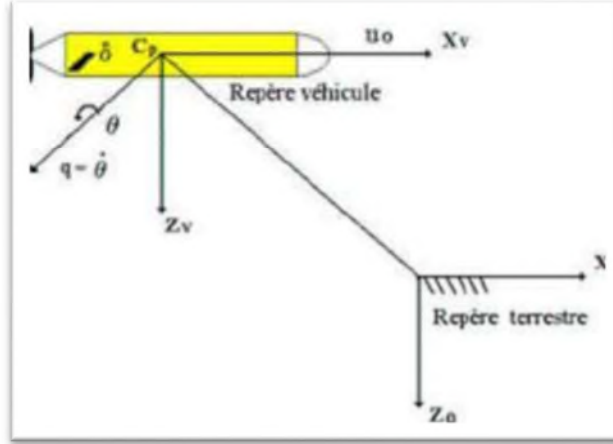


Figure 2.10 : Diagramme en plongée du robot sous marin autonome

En considérant que la position x est découplée du système et que la vitesse linéaire u est constante $u = 2.6 \text{ m/s}$ (soit $\dot{u} = 0$). Le vecteur d'état devient $Y = [w, q, \theta, z]^T$. Avec cette considération, il est possible d'obtenir un modèle en plongée d'ordre quatre :

$$M_p \dot{Y} = C D_p Y + g_p(\eta) + V_p u + U_p \quad (2.28)$$

Où

les matrices et vecteurs de l'équation précédente sont formés par les éléments suivants : la matrice de masse $M_p = M_a + M_{RB}$:

$$M_p = \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -m x_g - Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -m x_g - M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de Coriolis $C_p = C_a + C_{RB}$ et la matrice des forces d'amortissement D_p , vont être simplifiées pour la matrice $C D_p$ et un vecteur de vitesse constante :

$$C D_p = \begin{bmatrix} Z_{ww}|w| + u Z_{uw} & Z_{qq}|q| + u(m + Z_{uq}) + m z_g q & 0 & 0 \\ M_{ww}|w| + u M_{uw} & M_{qq}|q| + u(M_{uq} - m x_g) - m z_g w & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\sin(\theta) \end{bmatrix} u$$

Le vecteur des efforts hydrostatiques $g_p(\eta)$ de l'équation, est ramené au :

$$g_p(\eta) = \begin{bmatrix} (WW - BB)\cos(\theta) \\ -(z_g WW - z_b BB)\sin(\theta) - (x_g WW - x_b BB)\cos(\theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Finalement U_p est le vecteur des entrées de commande :

$$U_p = \begin{bmatrix} Z_{\delta_p} u^2 \\ M_{\delta_p} u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_p$$

Les valeurs numériques des coefficients du modèle en plongée sont données en Annexe.

2.3.2 Modèle en cap

Nous procédons de la même manière que pour le modèle en immersion.

Si nous envisageons uniquement un déplacement du robot dans le plan horizontal à tangage nul, nous avons alors seulement besoin de considérer les variables suivantes :

- (x, y) : la position du véhicule,
- ψ : son angle de lacet,
- u : sa vitesse d'avancement,
- v : sa vitesse de glissement et enfin,
- r : sa vitesse de lacet.

Nous supposons nulles les vitesses de descente, roulis et tangage (w, p, q) et nous ne considérons par les variables ne faisant pas parties du plan horizontal. Avec ces suppositions, les 12 éléments du vecteur d'état du système sont simplifiés aux composante suivantes : u, v, r et ψ .

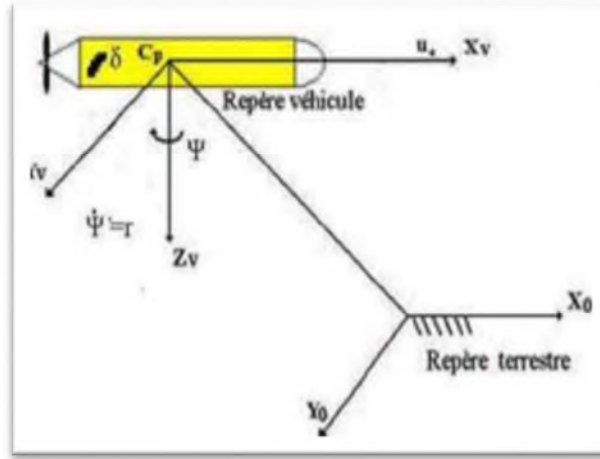


Figure 2.11 : Diagramme en cap de la torpille

En considérant que la position x et y est découplée du système et que la vitesse linéaire u est constante $u = 2.6 \text{ m/s}$ (soit $\dot{u} = 0$). Le vecteur d'état devient $Y = [v, r, \psi]^T$. Avec cette considération, il est possible d'obtenir un modèle en cap d'ordre trois :

$$M_c \dot{Y} = CD_c Y + g_c(\eta) + V_c u + U_c \quad (2.29)$$

Où les matrices et vecteurs de l'équation précédente sont formés par les éléments suivants : la matrice de masse $M_c = M_a + M_{RB}$:

$$M_c = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de Coriolis $C_c = C_a + C_{RB}$ et la matrice des forces d'amortissement D_c , vont être simplifiées pour la matrice CD_c et un vecteur de vitesse constante :

$$CD_c = \begin{bmatrix} Y_{vv}|v| + uY_{uv} & Y_{rr}|r| + u(Y_{ur} - m) + my_g r & 0 \\ N_{vv}|v| + uN_{uv} & N_{rr}|r| + u(N_{ur} - mx_g) + my_g v & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Finalement U_c est le vecteur des entrées de commande :

$$U_c = \begin{bmatrix} Y_{\delta_c} u^2 \\ N_{\delta_c} u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c$$

Les vecteurs numériques des coefficients du modèle en cap sont donnés en Annexe

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé le comportement de notre robot sous-marin autonome en deux parties différentes: la première concernant la modélisation cinématique, qui traite des aspects géométrique du mouvement. La deuxième concernant la modélisation dynamique, qui analyse l'effet des forces et des moments qui génèrent le mouvement .par la suite et d'après le modèle mathématique générale du robot sous-marin autonome qu'il est non-linéaire, complexe et leurs paramètres sont couplés entre eux, et pour le simplifier nous avant proposé de découpler le mode d'immersion du mode de cap, afin d'obtenir une modélisation dans chaque plan.

Chapitre 03:

Commande par mode glissant du robot sous-marin autonome

3.1 Introduction :

La commande en régime glissant est une technique répandue pour la commande des robots sous-marins. Elle garantit une robustesse vis-à-vis des perturbations, son in-convenant majeur étant la réticence. Le phénomène de réticence est indésirable et nuisible pour les actionneurs, caractérisé par des commutations à très haute fréquence.

La commande par mode glissant est la technique choisie pour commander le robot. En effet, elle fait preuve d'une grande robustesse vis-à-vis des perturbations et des variations des paramètres du système. Cette technique de contrôle est un bon compromis entre la complexité, l'efficacité et la robustesse.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de la commande en régime glissant d'ordre un, et nous allons également exposer l'inconvénient principal de cette commande.

3.2 La commande par mode glissant

Le principe de la commande en mode glissant développé par Utkin est de contraindre le système à atteindre et rester sur une surface de glissement ou bien dans son voisinage. Ce type de commande a suscité un grand intérêt du fait de ses deux principaux avantages :

- la relative simplicité de sa mise en œuvre.
- sa robustesse vis-à-vis des perturbations extérieures.

Cette dernière caractéristique nous intéresse plus particulièrement. En effet, l'un des principaux problèmes dans la commande des véhicules sous-marins autonomes concerne les incertitudes sur les paramètres hydrodynamiques de l'engin.

L'objectif de cette technique de contrôle est de respecter deux contraintes :

- une première caractérisant l'attractivité d'une surface de glissement,
- une seconde maintenant le système sur cette surface.

3.2.1 Principe de fonctionnement :

L'idée de base de la commande en régime glissant est premièrement d'attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée. Puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra en permanence le système dans cette région.

En résumé, la commande par régime glissant est divisée en deux parties [32]:

(Voir figure 3.1) :

1. détermination d'une région de l'espace d'état telle qu'une fois le système dans cette région, il tienne le comportement désiré,
2. définir une loi de commande qui conduise le système jusqu'à cette région de l'espace d'état.

Les deux composantes de la commande sont alors définies par :

$$u = u_{eq} + u_{dis} \quad (3.1)$$

u_{dis} : La commande discontinue permet au système d'atteindre et de rester sur la surface de glissement.

u_{eq} : Elle est obtenue avec la méthode de la commande équivalente.

Le principe est basé sur la détermination du comportement du système lorsqu'il est sur la surface de glissement, soit $s = 0$. Cette commande peut être aussi linéaire que non linéaire.

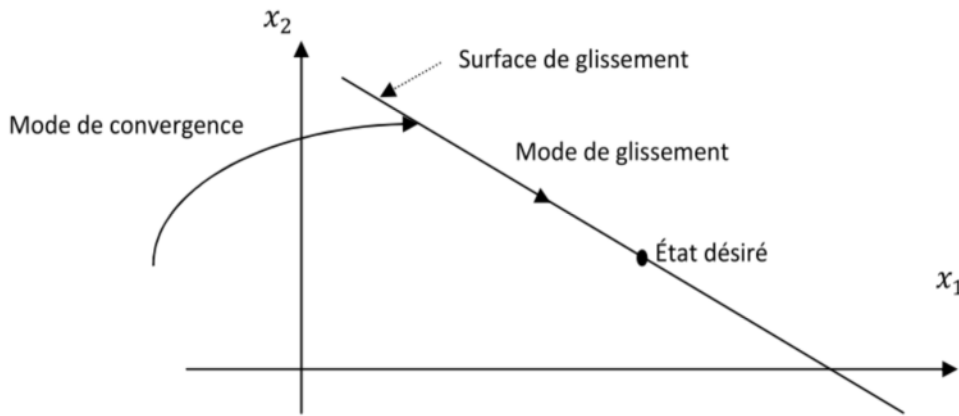


Figure 3.1 : convergence du système glissant

3.2.2 Définition de régime glissant :

On va considérer le système dynamique suivant [32]:

$$\mathbf{X}^{(n)} = f(x) + g(x)u \quad (3.2)$$

Où

\mathbf{X} : est la sortie du système :

X : est le vecteur d'état,

$$X = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)}]^T$$

u : est le vecteur de commande, dont l'expression est définie par :

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t), & \text{si } s_i(X) > 0 \\ u_i^-(x, t), & \text{si } s_i(X) < 0 \end{cases} \quad i = 1, \dots, m$$

u^+ et u^- sont des fonctions continues.

f est une fonction généralement non linéaire et partiellement connue

g est fonction de commande non exactement connue.

Nous voulons faire suivre au vecteur d'état X une trajectoire désirée, définie par le vecteur désiré $X_d(t)$. pour cela, on pose le vecteur d'erreur :

$$\tilde{X} = X - X_d = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)}]^T$$

Par ailleurs, nous allons définir une surface de glissement dans l'espace d'état des erreurs

$$\begin{aligned} s(X) &= 0, \\ s(X) &= S \tilde{X} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Où

S sont des constantes de glissement.

Avec la définition précédente, le problème de suivre $X \equiv X_d$ est le même que celui de rester sur la surface $s(X)$ pour tout le temps. $t > 0$ en effet représente une $s \equiv 0$ équation, dont la solution unique est $\tilde{X} \equiv 0$. de cette façon le problème de suivre le vecteur désiré X_d réduit à retenir s à zéro.

Après la détermination de la surface de glissement, l'étape suivante est de garantir l'existence d'un régime glissant. Il existe un régime glissant, si dans le voisinage de la surface de glissement $s = 0$, les vecteurs de vitesse des trajectoires du système pointent toujours vers la surface. On dit d'une autre manière, la distance à la surface de glissement et sa vitesse de changement s ont un signe opposé.

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} &< 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} &> 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

L'expression précédente peut être écrite de façon simplifiée :

$$s\dot{s} < 0 \quad (3.5)$$

Cette équation est appelée attractivité de la surface ou condition de glissement.

3.2.3 Propriétés de la convergence en temps fini :

Les propriétés de convergence en temps fini des commandes par régime glissant d'ordre un sont obtenues en considérant la fonction de Lyapunov suivante [33]:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2(X) \quad (3.6)$$

Et de déterminer une loi de commande qui soit capable de satisfaire la condition :

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (3.7)$$

Où

η est une constante strictement positive. Cette condition est appelée condition de η -attractivité. Si nous faisons l'intégration de l'expression (3.7) entre le temps initial $t = 0$ et le temps de convergence, nous avons :

$$s(t = t_{att}) - s(t = 0) \leq -\eta(t_{att} - 0) \quad (3.8)$$

Finalement la surface de glissement s sera atteinte dans un temps fini t_{att} inférieur ou égale à :

$$t_{att} \leq \frac{s(t=0)}{\eta} \quad (3.9)$$

3.2.4 Méthode de la commande équivalente :

La technique de la commande équivalente permet de déterminer la sortie de la commande continue u_{eq} , une fois que le système se trouve sur la surface de glissement $s = 0$. nous allons supposer que, à $t = t_{att}$ les vecteurs d'état x du système interceptent la surface de glissement et qu'il existe un régime glissant à $t > t_{att}$. l'existence du régime glissant implique que $\dot{s}(x; t) = 0$, et $s(x; t) = 0$ pour tout $t > t_{att}$, soit : $s = 0$

$$\frac{\partial s}{\partial x} [f(x) + g(x)u_{eq}] = \dot{s} = 0$$

Finalement u_{eq} est donnée par :

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (3.10)$$

Les fonctions f et g ne sont pas connues avec précision, cependant on dispose des approximations \hat{f} et \hat{g} issues de l'étape de modélisation.

3.2.5 Commande par régime glissant du premier ordre :

La commande par mode glissant a connu un essor considérable durant les dernières décennies [34] [35] [36]. Ceci est dû principalement à la propriété de convergence rapide et en temps fini des erreurs, ainsi, que la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures [37].

Tous ses aspects positifs ne doivent pas néanmoins masquer certains inconvénients. Les commandes à modes glissants procèdent de manière discontinue, ce qui conduit à exciter toutes les fréquences du système à contrôler et donc des modes pas forcément pris en compte dans la modélisation. En second lieu, dans la plupart des cas, les discontinuités de l'algorithme de contrôle interviennent directement sur les actionneurs. Si cet organe n'est pas conçu pour ce type de sollicitations, cela risque de conduire à son vieillissement prématuré et le système sera soumis à chaque instant à une commande élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré.

La première partie présente les concepts de base de la commande par mode glissant d'ordre un qui se synthétise en deux étapes : on détermine une sortie fictive $s(x)$ appelée surface de glissement sur laquelle les objectifs des contrôles sont réalisés, ensuite on calcule la loi de commande afin de ramener la trajectoire des états à cette sortie et de la maintenir sur cette surface tout le temps jusqu'à l'équilibre [38]. La deuxième partie est consacrée à le problème majeur de la commande par modes glissants ; le chattering, et les méthodes classiques permettant de réduire les effets.

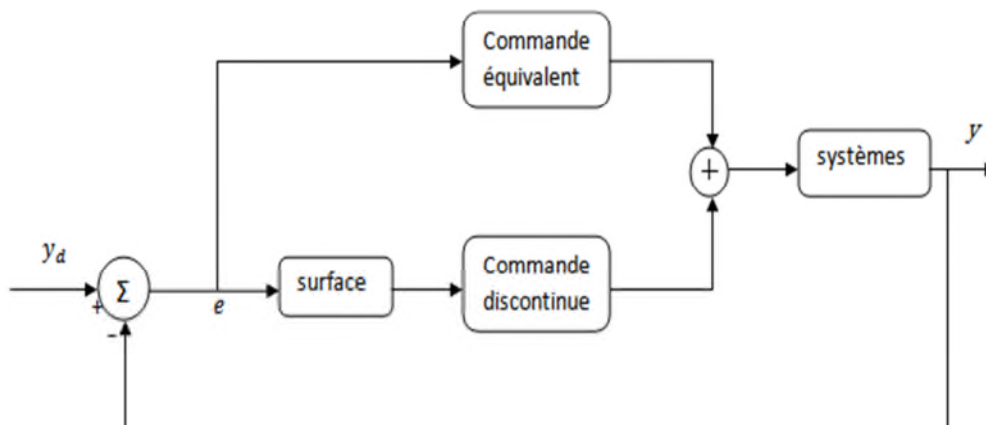


Figure 3.2 : schéma blocs de la commande par mode glissant du premier ordre

3.2.6 Phénomène de réticence ou « chattering » :

La technique de commande décrite dans la partie précédente assure un comportement désire du système en boucle fermée. Cependant, elle a besoin (dans le cas idéal) d'une commutation à fréquence infinie au niveau des actionneurs. Cette oscillation au voisinage de la surface est appelée réticence est un phénomène indésirable. En effet, elle induit des dynamiques de haute fréquence sur les actionneurs du véhicule pouvant les endommager, et augmente ainsi considérablement la consommation énergétique.

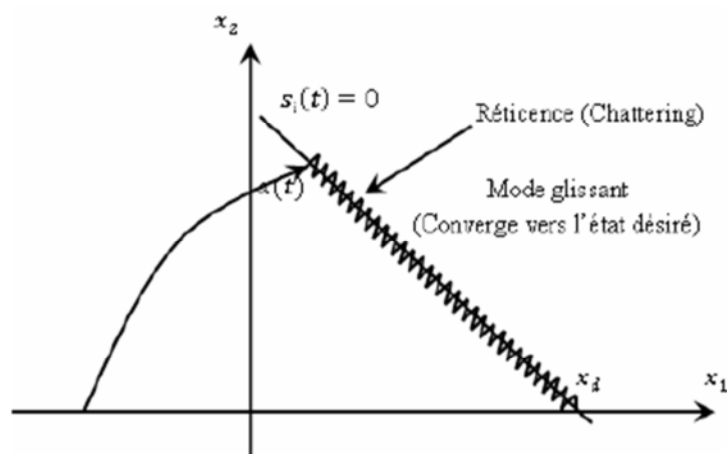


Figure 3.3 : phénomène de la réticence

3.2.7 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence

La réticence est le principal désavantage des techniques de contrôle en mode glissant du premier ordre. De nombreuses études ont été effectués dans le but de réduire ou d'éliminer ce problème.

Solution de couche limitée :

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons décrire les techniques les plus utilisées pour limiter ce phénomène. Ces techniques sont basées sur la définition d'une zone autour de la surface à l'intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la fonction signe est applique. Ainsi, le terme à variation plus douce, par exemple :

$$sat(s) = \begin{cases} 1, & sis > \epsilon \\ \frac{s}{\epsilon}, & silsl \leq \epsilon \\ -1, & sis < -\epsilon \end{cases} \quad (3.11)$$

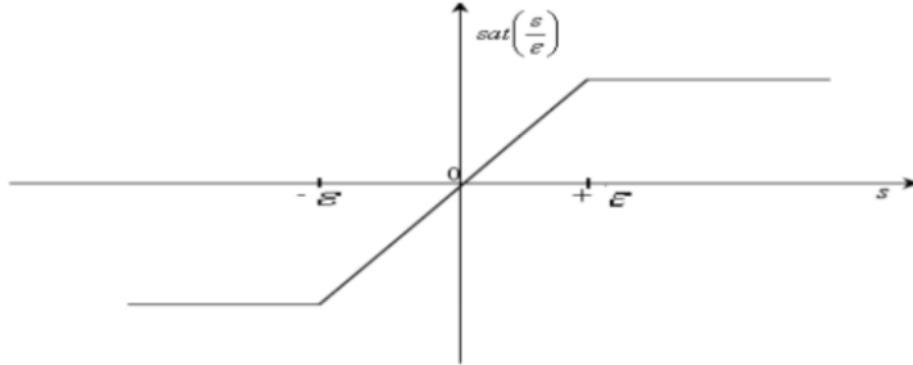


Figure 3.4 : Fonction de saturation *sat*

La fonction tangente hyperbolique *tanh* a l'avantage de faire varier la largeur de la bande de commutation en ajoutant un terme supplémentaire ϕ (Figure (3.4)).

L'expression s'écrit finalement : $tanh(s/\phi)$

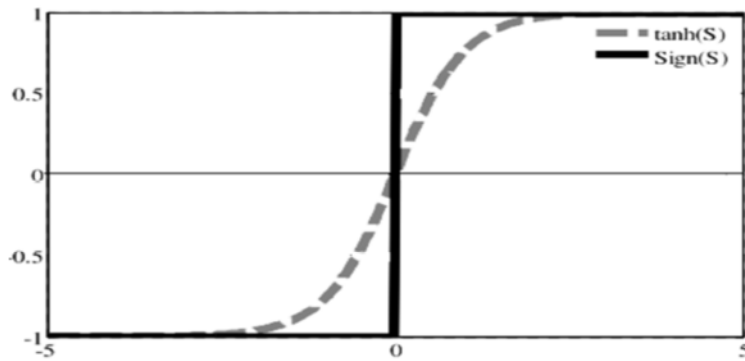


Figure 3.5 : fonction tangente hyperbolique *tanh*

Solution par mode glissant flou :

Parmi les solutions proposées au problème de réticence on peut citer la commande par mode glissant flou qui consiste à remplacer la fonction de commutation par une fonction de saturation. Mais cette solution n'est qu'un cas particulier de la commande flou, d'où l'intérêt à utiliser une commande qui combine la logique floue et le mode glissant afin d'obtenir une commande robuste et lisse. Certains chercheurs [39] ont essayé de trouver une similitude

entre la commande floue non linéaire et la commande par mode glissant et de combiner les deux lois de commande, c'est-à-dire la commande floue pour sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre, et le régime glissant pour ses fondements théoriques rassurant du point de vue stabilité et robustesse. Cette combinaison reliant les avantages d'invariance par rapport aux incertitudes et aux perturbations.

3.2 Application de la commande sur le robot sous-marin autonome :

Dans cette section nous allons calculer la loi de commande par régime glissant du premier ordre dans le plan vertical et dans le plan horizontal de l'AUV en considérant la vitesse linéaire u constante.

➤ La commande en mode plongée :

Modèle dynamique :

Le modèle simplifié considéré ici est donné par l'expression (2.28) et il prend en compte les trois états suivants $Y = [w, q, \theta, z]^T$. Ensuite nous allons le réécrire :

$$M_p \dot{Y} = CD_p Y + g_p(\eta) + V_p u + U_p \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -mx_g - M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{ww}|w| + uZ_{uw} & Z_{qq}|q| + u(m + Z_{uq}) + mz_g q & 0 & 0 \\ M_{ww}|w| + uM_{uw} & M_{qq}|q| + u(M_{uq} - mx_g) - mz_g w & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} (WW - BB)\cos(\theta) \\ -(z_g WW - z_b BB)\sin(\theta) - (x_g WW - x_b BB)\cos(\theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\sin(\theta) \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} Z_{\delta_p} u^2 \\ M_{\delta_p} u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_p$$

Surface de glissement :

Nous allons définir la surface de glissement s en fonction de l'espace d'états des erreurs Y :

$$s = \alpha w + \beta q + \gamma(\theta - \theta_d) + \mu(z - z_d) \quad (3.13)$$

Les coefficients de la surface de glissement, sont donnés au Annexe.

La dérivée de s , en supposant que les entrées sont des échelons, est exprimée par l'équation suivante :

$$\dot{s} = \alpha \dot{w} + \beta \dot{q} + \gamma \dot{\theta} + \mu \dot{z}$$

L'expression précédente écrite d'une façon matricielle, donne :

$$\dot{s} = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \mu] \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = S\dot{Y}$$

Commande équivalente :

La commande équivalente est déterminée à partir de la solution de l'expression $\dot{s} = 0$.

Si on force l'expression précédente à zéro et si on remplace \dot{Y} par l'équation (3.12), nous avons :

$$\begin{aligned} \dot{s} &= SM_p^{-1}(CD_p Y + g_p(\eta) + V_p u + U_p) = 0 \\ \dot{s} &= SM_p^{-1}(f) = 0 \end{aligned}$$

La commande équivalente :

$$U_{eq} = -(CD_p Y + g_p(\eta) + V_p u) = -f_{eq} \quad (3.14)$$

La sortie de la commande glissante est formée par deux parties :

$$U_p = U_{eq} + K_{glis} \text{sign}(s_c)$$

Finalement la sortie de la commande δ_c est la suivante :

$$\begin{aligned} \delta_p &= -(\alpha B_{11} + \beta B_{21})^{-1}((\alpha A_{11} + \beta A_{21} + \mu \cos\theta)w + (\alpha A_{12} + \beta A_{22} + \gamma)q + \alpha G_{11} + \\ &\beta G_{21} - u \sin\theta) + K_{glis} \text{sign}(s_c) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Où

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -\frac{Z_{\dot{q}} + mx_g}{\det(M_p)} (M_{uw}u + M_{ww}|w|) - \frac{I_{yy} - M_{\dot{q}}}{\det(M_p)} (Z_{ww}|w| + uZ_{uw}) \\
 A_{12} &= -\frac{Z_{\dot{q}} + mx_g}{\det(M_p)} (M_{qq}|q| + u(M_{uq} - mx_g) - mwz_g) - \frac{I_{yy} - M_{\dot{q}}}{\det(M_p)} (u(m + Z_{uq}) + Z_{qq}|q| \\
 &\quad + mz_gq) \\
 A_{21} &= -\frac{m - Z_{\dot{w}}}{\det(M_p)} (uM_{uw} + M_{ww}|w|) - \frac{M_{\dot{w}} + mx_g}{\det(M_p)} (Z_{ww}|w| + uZ_{uw}) \\
 A_{22} &= -\frac{m - Z_{\dot{w}}}{\det(M_p)} (M_{qq}|q| + u(M_{uq} - mx_g) - mwz_g) - \frac{M_{\dot{w}} + mx_g}{\det(M_p)} (u(m + Z_{uq}) \\
 &\quad + Z_{qq}|q| + mz_gq) \\
 B_{11} &= \left(-\frac{Z_{\dot{q}} + mx_g}{\det(M_p)} M_{\delta_c} - \frac{I_{yy} - M_{\dot{q}}}{\det(M_p)} Z_{\delta_c} \right) u^2 \\
 B_{21} &= \left(-\frac{m - Z_{\dot{w}}}{\det(M_p)} M_{\delta_c} - \frac{M_{\dot{w}} + mx_g}{\det(M_p)} Z_{\delta_c} \right) u^2 \\
 G_{11} &= -\frac{Z_{\dot{q}} + mx_g}{\det(M_p)} \left((x_b BB - x_g WW) \cos\theta + (z_b BB - z_g WW) \sin\theta \right) \\
 &\quad + \frac{I_{yy} - M_{\dot{q}}}{\det(M_p)} (BB - WW) \cos\theta \\
 G_{21} &= -\frac{m - Z_{\dot{w}}}{\det(M_p)} \left((x_b BB - x_g WW) \cos\theta + (z_b BB - z_g WW) \sin\theta \right) \\
 &\quad + \frac{M_{\dot{w}} + mx_g}{\det(M_p)} (BB - WW) \cos\theta \\
 s_p &= \alpha w + \beta q + \gamma(\theta - \theta_d) + \mu(z - z_d) \\
 \det(M_p) &= (M_{\dot{w}} + mx_g)(mx_g + Z_{\dot{q}}) + (m - Z_{\dot{w}})(M_{\dot{q}} - I_{yy})
 \end{aligned}$$

➤ **La commande en mode de cap :**

Modèle dynamique :

Le modèle simplifié considéré ici est donné par l'expression (2.29) et il prend en compte les trois états suivants $Y = [v, r, \psi]^T$. Ensuite nous allons le réécrire :

$$M_c \dot{Y} = CD_c Y + g_c(\eta) + V_c u + U_c \quad (3.16)$$

$$M_c = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{vv}|v| + uY_{uv} & Y_{rr}|r| + u(Y_{ur} - m) + my_g r & 0 \\ N_{vv}|v| + uN_{uv} & N_{rr}|r| + u(N_{ur} - mx_g) + my_g v & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta_c} u^2 \\ N_{\delta_c} u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c$$

Surface de glissement :

Nous allons définir la surface de glissement s en fonction de l'espace d'états des erreurs Y :

$$s = \varpi v + \chi r + \vartheta(\psi - \psi_d) \quad (3.17)$$

Les coefficients de la surface de glissement, sont donnés au Annexe.

La dérivée de s , en supposant que les entrées sont des échelons, est exprimée par l'équation suivante :

$$\dot{s} = \varpi \dot{v} + \chi \dot{r} + \vartheta \dot{\psi}$$

L'expression précédente écrite d'une façon matricielle, donne :

$$\dot{s} = [\varpi \quad \chi \quad \vartheta] \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = S\dot{Y}$$

Commande équivalente :

La commande équivalente est déterminée à partir de la solution de l'expression $\dot{s} = 0$.

Si on force l'expression précédente à zéro et si on remplace \dot{Y} par l'équation (3.12), nous avons :

$$\begin{aligned} \dot{s} &= SM_c^{-1}((CD_c Y + g_c(\eta) + V_c u) + U_c) = 0 \\ \dot{s} &= SM_c^{-1}(f) = 0 \end{aligned}$$

La commande équivalente :

$$U_{eq} = -(CD_c Y + g_c(\eta) + V_c u) = -f_{eq} \quad (3.18)$$

La sortie de la commande glissante est formée par deux parties :

$$U_c = U_{eq} + K_{glis} \text{sign}(s_c)$$

Finalement la sortie de la commande δ_c est la suivante :

$$\delta_c = -(\varpi B_{11} + \chi B_{21})^{-1}((\varpi A_{11} + \chi A_{21})v + (\varpi A_{12} + \chi A_{22} + v)r) + K_{glis} \text{sign}(s_c) \quad (3.19)$$

Où

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -\frac{Y_{\dot{r}} - mx_g}{\det(M_c)} (uN_{uv} + N_{vv}|v|) - \frac{I_{zz} - N_{\dot{r}}}{\det(M_c)} (Y_{vv}|v| + uY_{uv}) \\
 A_{12} &= -\frac{Y_{\dot{r}} - mx_g}{\det(M_c)} (N_{rr}|r| + u(N_{ur} - mx_g) - mvy_g) - \frac{I_{zz} - N_{\dot{r}}}{\det(M_c)} (u(m - Y_{ur}) + Y_{rr}|r| \\
 &\quad + my_g r) \\
 A_{21} &= -\frac{m - Y_{\dot{v}}}{\det(M_c)} (uN_{uv} + N_{vv}|v|) - \frac{N_{\dot{v}} - mx_g}{\det(M_c)} (Y_{vv}|v| + uY_{uv}) \\
 A_{22} &= -\frac{m - Y_{\dot{v}}}{\det(M_c)} (N_{rr}|r| + u(N_{ur} - mx_g) - mvy_g) - \frac{N_{\dot{v}} - mx_g}{\det(M_c)} (u(m - Y_{ur}) + Y_{rr}|r| \\
 &\quad + my_g r) \\
 B_{11} &= \left(-\frac{Y_{\dot{r}} - mx_g}{\det(M_c)} N_{\delta_c} - \frac{I_{zz} - N_{\dot{r}}}{\det(M_c)} Y_{\delta_c} \right) u^2 \\
 B_{21} &= \left(-\frac{m - Y_{\dot{v}}}{\det(M_c)} N_{\delta_c} - \frac{N_{\dot{v}} - mx_g}{\det(M_c)} Y_{\delta_c} \right) u^2 \\
 s_c &= \varpi v + \chi r + \vartheta(\psi - \psi_d) \\
 \det(M_c) &= (m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}}) + (mx_g - N_{\dot{v}})(Y_{\dot{r}} - mx_g)
 \end{aligned}$$

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons proposée les lois de commande par mode glissant(SM) qui possèdent des avantages comme le régime glissant est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface. Ainsi, nous avons précisée la commande par mode glissant d'ordre un qu'elle a l'inconvénient de phénomène de réticence, pour ce la nous avons obligée d'éliminer ce phénomène.

Dans le quatrième chapitre nous allons exposer la commande floue comme une solution effective pour résoudre le problème de réticence « **chattering** ».

Chapitre 04:

Commande par régime glissant flou du robot Sous-marin autonome

4.1 Introduction :

La commande par logique floue permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des études théoriques approfondies, mais malheureusement, ce type de commande floue ne permet pas de maintenir de bonnes performances de poursuite en présence des erreurs d'approximation et des perturbations externes. Dans ce cadre on a choisi d'utiliser la commande par mode glissant flou, qui combine la logique floue et le mode glissant afin d'obtenir une commande robuste et lisse.

4.2 Concepts de base de la logique floue

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues. Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistique. Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques qui sont normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous ensemble flous de la même classe.

4.2.1 Théorie des sous-ensembles flous :

Dans cette section, nous décrivons rapidement les fondements mathématiques de la théorie des sous-ensembles flous [40]. Dans la théorie ensembliste classique, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est définie par une valeur logique standard : 1 si l'élément appartient au sous-ensemble, sinon 0. Dans la théorie floue, un élément peut appartenir en partie à un sous-ensembles : son degré d'appartenance est décrit par une valeur comprise entre 0 et 1

Soit X , un ensemble dénombrable ou non " univers du discours ". Un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par sa fonction d'appartenance μ_A , telle que :

$$\begin{aligned}\mu_A: X &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x)\end{aligned}$$

Où

$\mu_A(x)$ Représente le degré d'appartenance de x à l'ensemble flou A .

4.2.2 Fonctions d'appartenance

Chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance.

En général, la forme de la fonction d'appartenance dépend de l'application et peut être monotone, triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche.

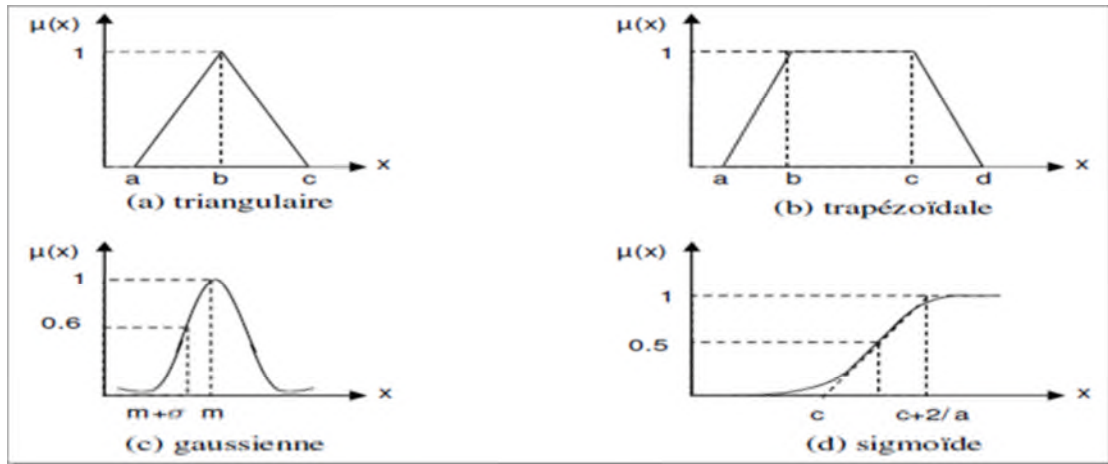


Figure 4.1 : exemples de fonction d'appartenance

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable x .

4.2.3 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Les ensembles flous ont le grand avantage de constituer une représentation mathématique de labels linguistiques largement utilisés dans l'expression de connaissances expertes, qualitatives et manipulées dans un raisonnement approché.

Ils apparaissent donc comme un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique, qualitative). Pour montrer dans quelle mesure un sous-ensemble flou A d'un référentiel X diffère d'un sous-ensemble classique de X , nous définissons les caractéristiques essentielles suivantes.

1. Support d'un sous-ensemble flou

Le support d'un sous-ensemble flou A est caractérisé par l'ensemble des éléments de X , qui sont à des degrés divers dans A , et que l'on note par $Supp(A)$ défini par:

$$Supp(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$$

2. Noyau d'un sous-ensemble flou

Le noyau d'un sous-ensemble flou A est caractérisé par l'ensemble des éléments de X qui sont réellement dans A , et que l'on note par $N(A)$ défini par:

$$N(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$$

3. Hauteur d'un sous-ensemble flou

La hauteur H d'un sous-ensemble flou A est la plus grande valeur du degré

d'appartenance $\mu_A(x)$. Elle définit à l'aide de l'opérateur $H(A)$, telle que :

$$H(A) = \max_{x \in X} \mu(x)$$

4.2.4 Opération sur les sous-ensembles flous

Disposant d'une représentation formelle de classes floues sous forme de fonctions d'appartenance nuancées, il est naturel de chercher à faire avec ces ensembles ce que l'on fait avec des ensembles classiques, Zadeh a ainsi généralisé les opérations d'égalité, d'inclusion, de complémentation, d'union et d'intersection, aux ensembles flous. Pour établir de telles généralisations, il est commode de représenter un ensemble flou, non plus par sa fonction d'appartenance, mais par une famille d'ensembles appelés coupes de niveaux, qui sont autant de représentants classiques de l'ensemble flou obtenus en fixant un seuil d'appartenance,

1. Egalité

Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(x)$.

$$A_i = A_j \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_{A_i}(x) = \mu_{A_j}(x)$$

2. Inclusion

Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(X)$

$$A_i \in A_j \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_{A_i}(x) \leq \mu_{A_j}(x)$$

3. Intersection

Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(X)$. L'intersection de A_i avec A_j définit un nouveau sous-ensemble flou A_k ayant pour fonction d'appartenance μ_{A_k} définie par :

$$\mu_{A_k}(x) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{A_j}(x)), \quad \forall x \in X$$

4. Union

Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(x)$. La réunion de A_i avec A_j définit un nouveau sous-ensemble flou A_k , ayant pour fonction d'appartenance μ_{A_k} définie par :

$$\mu_{A_k}(x) = \max(\mu_{A_i}(x), \mu_{A_j}(x)), \quad \forall x \in X$$

5. Complémentarité

Soit A_i un élément de l'ensemble $F(x)$. Le complémentaire \bar{A}_i de A_i a pour fonction d'appartenance telle que:

$$\mu_{\bar{A}_i}(x) = 1 - \mu_{A_i}(x), \quad \forall x \in X$$

4.2.5 Variables linguistiques

C'est une variable dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou phrases exprimés en langage naturel. Elle sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue.

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplet $(x, T(x), X)$ où x désigne le nom de la variable, X son univers de discours, et $T(x)$ son ensemble de termes ou valeurs linguistiques.

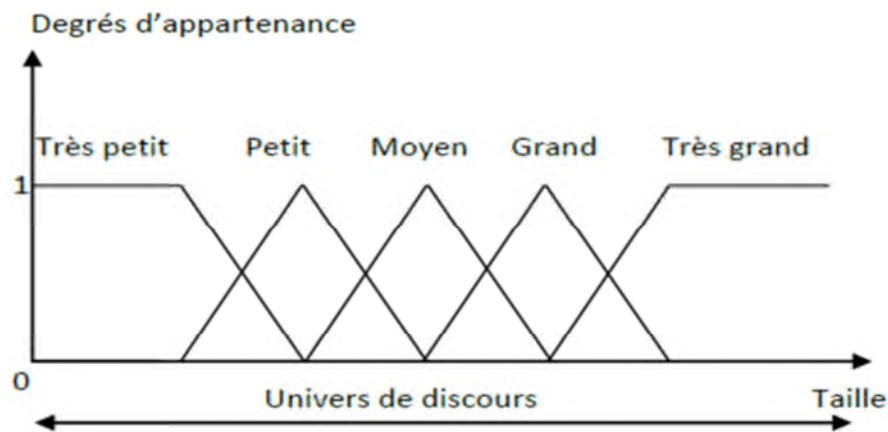


Figure 4.2 : Représentation de variable linguistique.

4.3 La commande floue

Le contrôle flou est l'étude, la mise au point, et l'expérimentation de système basés sur des règles floues. La première étape dans la construction d'un contrôleur flou est de définir une base de connaissances contenant l'information sur les variables linguistiques et les sous ensemble flous les caractérisant, ainsi que les règles liant ces variables, bases sur une connaissance experte du problème, permettant d'aboutir à la détermination de la sortie. Ces sorties sont évaluées par le contrôleur, à partir des entrées floues, issues du processus de fuzzification des entrées réelles, et des règles de commande floues. Les sorties intermédiaires, issues de l'évaluation des règles floues demeurent des variables floues, qu'il est nécessaire de modifier par le processus de défuzzification, afin d'obtenir les informations de commande non floues destinées au processus final. Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux (figure 4.2)

- Fuzzification.
- Base de connaissances.
- Moteur d'inférence.
- La défuzzification.

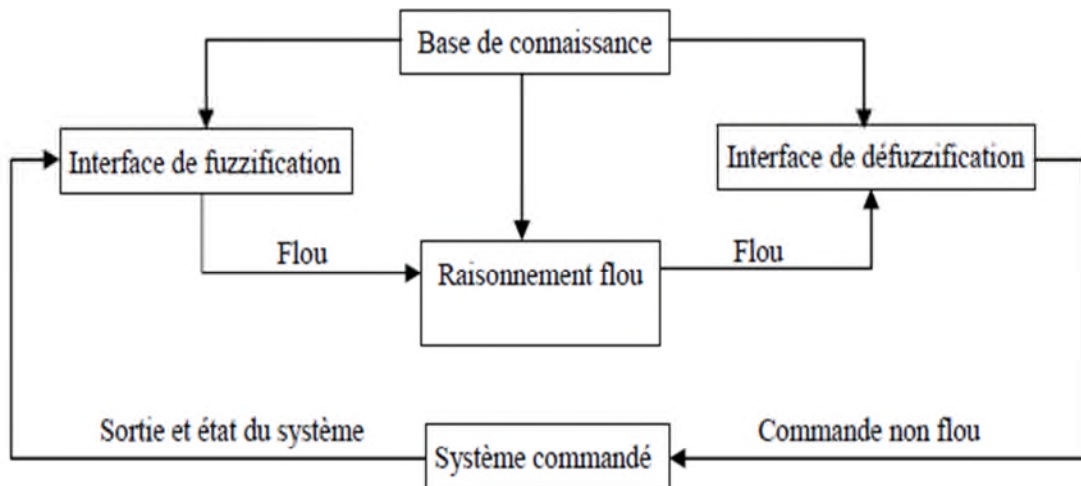


Figure 4.3: Schéma générale de la commande floue.

4.3.1 Fuzzification

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro.

4.3.2 Base de connaissance

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues.

- La base de données : Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie
- La base des règles floues : Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme : " Si prémisse Alors conclusion ", qui peut être, à titre d'exemple, la suivante :

R^i : Si x_1 est A_1^i et et x_n et A_n^i Alors μ_i est B^i

Ou sous la forme SUGENO :

R^i : Si x_1 est A_1^i et et x_n et A_n^i Alors $\mu_i = f^i(x)$

Ou

$f(x)$: un polynôme

Dans ce travail, on s'intéressera aux systèmes flous de type Takagi-Sugeno à conclusion constante dont la i^{me} règle floue est donnée par :

R^i : Si x_1 est A_1^i et et x_n et A_n^i Alors $\mu_i = c_i$

Où

c_i est un singleton

4.3.3 Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. En fait, le moteur d'inférence combine les règles floues. En utilisant les principes de la logique floue, pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie.

Dans cette étape, il s'agit de déterminer comment le système interprète les variables linguistiques floues. Les variables linguistiques (entrées et sorties) sont liées par les règles D'inférence. Les variables sont liées par l'opérateur " ET " , tandis que les variables de sortie des différentes règles sont liées par l'opérateur " OU " et l'ensemble des règles sont liées par les connecteurs tels que " ET " et " Alors " . La conséquence d'une règle floue est inférée par l'emploi de règle de composition, en utilisant les fonctions d'implications floues et les connecteurs " ET " et " Alors " .

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons :

- Linguistiquement : On écrit les règles de façons explicite.
- Symboliquement : Il s'agit en fait d'une description linguistique ou l'on remplace la désignation des ensembles flous par des abréviations.
- Par matrice d'inférence : Elle rassemble toutes les règles d'inférence sous forme de tableau, il y a donc autant de cases que des règles.

Exemple

- **Sous forme linguistique :**

Si (la température est élevée **ET** la vitesse est faible) **Alors** la tension est grande positive.

OU

Si (la température est moyenne **ET** la vitesse est faible) **Alors** la tension est positive.

- **Sous forme symbolique :**

Si t° est F **ET** v est F **Alors** V= Z, **OU**

Si t° est M **ET** v est F **Alors** V= P, **OU**

Si t° est E **ET** v est F **Alors** V= GP, **OU**

Si t° est F **ET** v est E **Alors** V= Z, **OU**

Si t° est M **ET** v est E **Alors** V= Z, **OU**

Si t° est E **ET** v est E **Alors** V= P.

Avec :

t° : température

v : vitesse

V : tension

E : élevée

M : moyenne

F : faible

- **Sous forme de tableau :**

$v t^\circ$	F	M	E
F	Z	P	GP
E	Z	Z	P

Tableau 4.1 : Exemple de matrice des règles

Les méthodes d'inférence se différencient selon la combinaison et l'utilisation des opérateurs (ET et OU) dans les règles d'inférence. Parmi ces méthodes on trouve :

Méthode d'inférence MAX- MIN

Cette méthode représente l'opérateur " ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" par la fonction "Min" et l'opérateur " OU" par la fonction "max".

Méthode d'inférence MAX- Produit

Cette méthode représente l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" par la fonction "Prod" et l'opérateur "OU" par la fonction "max".

Méthode d'inférence Somme - Produit

Cette méthode représente l'opérateur "ET" par la fonction "Prod", la conclusion "ALORS" par la fonction "Prod" et l'opérateur "OU" par la fonction "Somme".

A titre d'exemple on prend la méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani), on applique sur l'exemple précédent :

- Règle 1 (R_1) : Si t° est E ET v est F Alors $V=GP$, OU
- Règle 2 (R_2) : Si t° est M ET v est F Alors $V=G$,

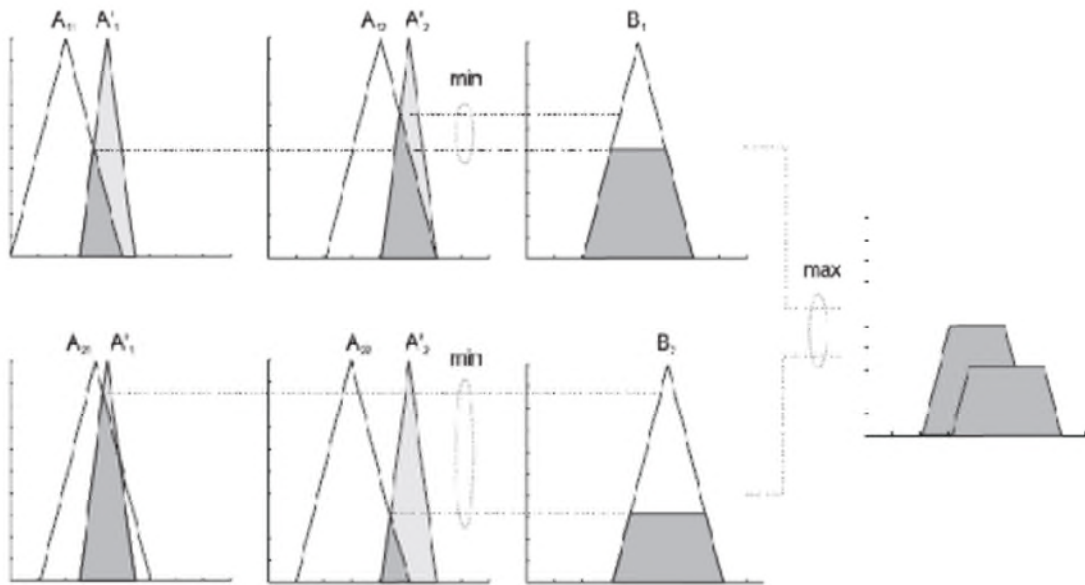


Figure 4.4 : Exemple d'inférence MAX-Min

La variable t_0° est élevée avec un degré d'appartenance de 0.7 et moyenne avec un degré d'appartenance de 0.2. La vitesse v est faible avec un degré d'appartenance de 1.

L'application de la première règle d'inférence donne un degré d'appartenance à la condition de 0.7 (minimum du à l'opérateur **ET** entre les deux degrés d'appartenance).

On obtient ainsi une " fonction d'appartenance partielle ". De manière similaire, la seconde règle donne lieu à une fonction d'appartenance écrêtée à 0.2.

La fonction d'appartenance résultante correspond au maximum des fonctions d'appartenance partielles puisque les règles sont liées par la disjonction, voir figure (4.3)

4.3.4 La défuzzification

Elle a pour but l'obtention d'une valeur numérique pour chaque variable de sortie à – Sugeno, le calcul se fait simplement par une somme normalisée des valeurs associées aux règles. Dans le cas de règles de type Mamdani, une valeur numérique doit être obtenue à partir de l'union des sous-ensembles flous correspondant aux différentes conclusions.

Parmi les nombreuses possibilités pour réaliser cette étape, nous pouvons citer :

1. La méthode du centre de gravité : C'est la méthode de défuzzification la plus courante.
2. La méthode de la hauteur.
3. La méthode de la valeur maximum.
4. La méthode de la moyenne des centres.

La méthode de défuzzification par le centre de gravité est la méthode la plus utilisée en commande floue du fait qu'elle fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. Elle consiste à calculer le centre de gravité de la surface formée par la fonction d'appartenance résultante.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n c^i \prod_{j=1}^m \mu_j^i}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \mu_j^i}$$

Où

m et n sont respectivement le nombre d'entrées et celui de règles floues utilisées.

Synthèse d'un contrôleur flou

Un contrôleur flou est un système flou avec les modules expliqués précédemment. La synthèse d'un contrôleur flou passe par les étapes suivantes :

- **Obtention de la base de connaissance** : elle provient d'un expert, de l'expérience ou même de l'apprentissage. C'est la partie la plus importante du contrôleur.
- **Le choix des entrées et sorties** : quand les règles floues sont assez suffisantes, les choix sont imposés naturellement. Le plus souvent ce n'est pas le cas, il y a généralement besoin d'ajouter d'autres règles à ajuster par des méthodes d'optimisation ou d'apprentissage pour améliorer les performances.

Toutefois un choix d'entrées très particulièrement utilisé est l'erreur et sa variation.

- **Choix des ensembles flous** : suivant la plage de variation des entrées et sorties, la dynamique du système à commander, la fréquence de traitement...., la nature et le

nombre d'ensembles flous peut varier. Il est souvent conseillé d'utiliser des fonctions triangulaires car le nombre de règles actives à la fois est considérablement réduit et les calculs sont relativement simples.

- **Choix des opérateurs flous** : suivant le but recherché et les contraintes évoquées précédemment, on peut choisir un parmi les opérateurs existants.
- **Les gains de normalisation** : après détermination des limites des variables, il est préférable de les diviser par leurs valeurs maximales pour travailler sur des ensembles normalisés $[-1,1]$. Ceci permet de constater plus facilement l'influence relative de chaque entrée sur la commande.

4.4 Structure du contrôleur flou glissant

Le contrôleur flou-glissant est composé de deux blocs (figure 4.4). Un bloc pour le calcul de la commande équivalente et la surface de glissement. Le deuxième bloc est un régulateur flou, dont l'entrée est la surface et la sortie est la commande attractante[41][42].

La sortie du contrôleur flou-glissant est la somme de la commande équivalente et la commande attractante.

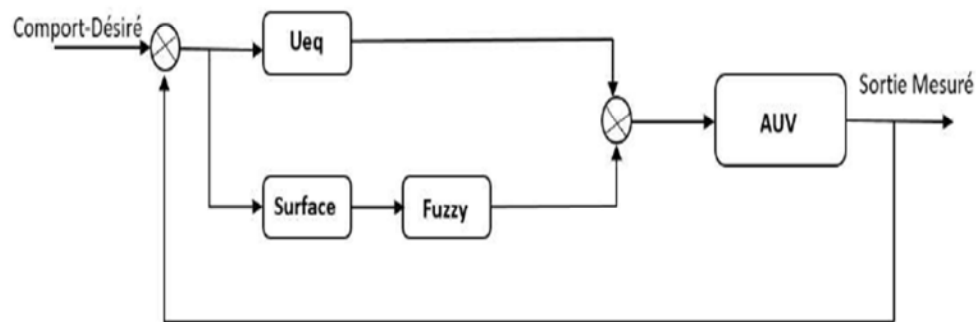


Figure 4.5 : Structure du régulateur flou-glissant

4.4.1 Synthèse du contrôleur flou glissant

- **Commande équivalente et surface de glissement**

Le calcul de la commande équivalente et de la surface de glissement est le même que pour la commande par mode de glissement développée précédemment.

- Plan horizontal (plan de lacet) :

$$\delta_c = -(\varpi B_{11} + \chi B_{21}) - 1((\varpi A_{11} + \chi A_{21})v + (\varpi A_{12} + \chi A_{22} + \vartheta)r) + K_{glis} \text{sign}(s_c)$$

-Plan vertical (plan de plongée) :

$$\delta_c = -(\alpha B_{11} + \beta B_{21}) - 1((\alpha A_{11} + \beta A_{21} + \mu \cos \theta)\omega + (\alpha A_{12} + \beta A_{22} + \gamma)q) + \alpha G_{11} + \beta G_{21} - u \sin \theta + K_{glis} \text{sign}(s_c)$$

• Commande d'attractivité

L'attractivité est réalisée par un contrôleur flou du type Takagi-Sugeno se ayant une seule entrée (surface) qui a trois fonctions d'appartenance, et une seule sortie (la commande d'attractivité) qui a trois fonctions d'appartenance.

Les fonctions d'appartenance des deux variables s et u , sont illustrées par les figures (4.6) et (4.7). On définit des fonctions d'appartenance de forme triangulaires pour la surface de glissement s et des singletons pour la commande u .

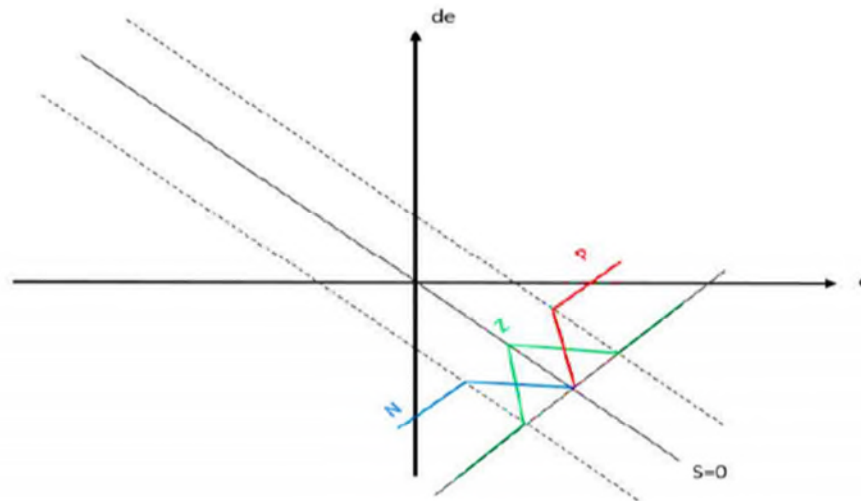


Figure 4.6 : partition floue de l'espace autour de la surface de glissement

Elle en possède trois règles sont les suivant :

- **R₁** : SI s est N Alors u est P
- **R₂** : SI s est Z Alors u est Z
- **R₃** : SI s est P Alors u est N

OU :

- **N** : négatif ;
- **Z** : zéro ;
- **P** : positif.

Les fonctions d'appartenance sont choisies de la forme :

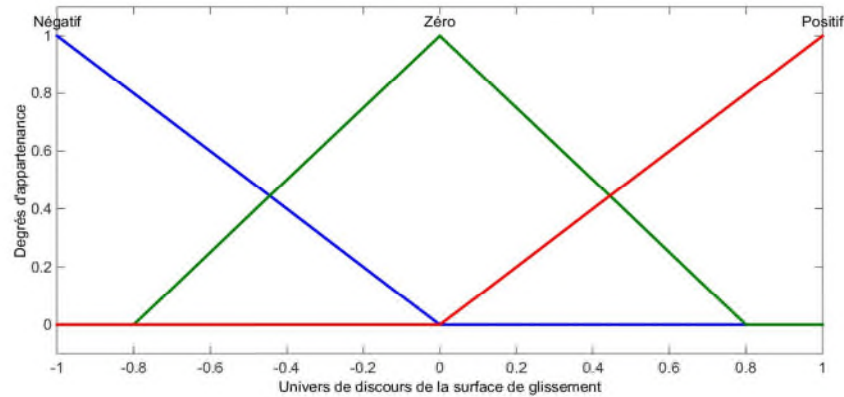


Figure 4.7 : Les fonctions d'appartenances d'entrée s

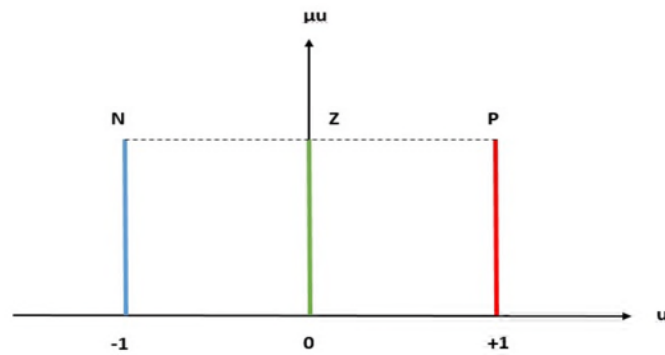


Figure 4.8: les fonctions d'appartenances de sortie u

4.4.2 Contrôleur PI flou par mode glissant

Dans le but d'améliorer la robustesse de la commande flou-glissant déterminée au paragraphe précédent, un contrôleur PI basé sur la théorie des modes de glissement est présenté. On prenant en considération tous les non linéarités de notre système.

La commande développée dans cette section se compose de deux termes :

- Un premier terme correspondant à la commande équivalente.
- Un deuxième terme correspondant à un PI synthétisé par la méthode du mode glissant, avec des gains bien déterminés en prenant en considération toutes les non linéarités et les caractéristiques du système.

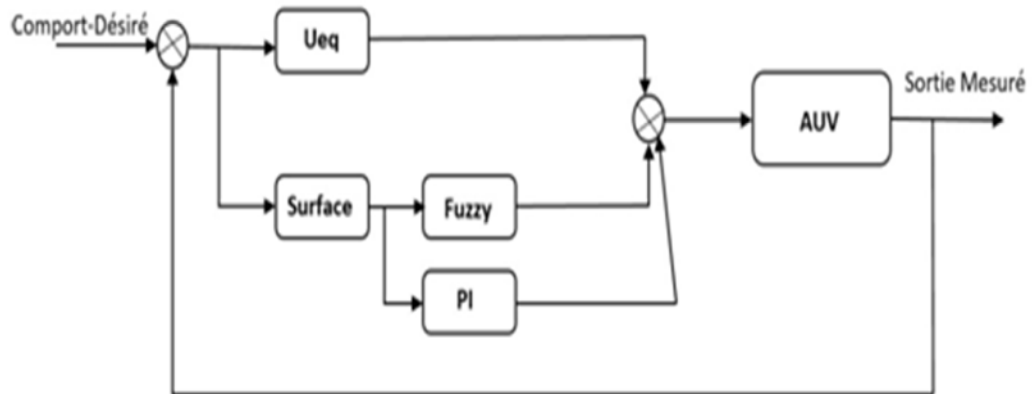


Figure 4.9 : Structure du régulateur flou-glissant

4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre une commande par mode glissant-flou à été formulée et développée, Ceci a permis de résoudre le problème du broutement de la commande par mode de glissement appliqué au robot sous-marin autonome. En plus l'hybridation de la commande à présenter des très bonnes robustesses contre les variations paramétriques du modèle ainsi que la dynamique désirée du système est définie par les surfaces de glissement proposé au préalable. En effet, nous constatons que la commande appliquée au système est moins oscillatoire que celle calculée par mode de glissement tout seul.

Chapitre 05:

Résultats de simulation

5.1 Introduction

Afin de voir quel type de contrôleurs précédents qui nous donnera des bonnes performances à notre robot sous-marin autonome. Nous allons présenter à travers ce chapitre, les résultats des simulations de différentes lois de commande étudiés dans les chapitres précédents et qui sont appliquées au système, de robot sous-marin autonome.

Ces tests de simulations ont l'objectif de trouver la commande qui donne à la fois une meilleure robustesse devant les incertitudes paramétrique et les perturbations externes et une meilleure convergence vers les comportements désirés de notre robot sous-marin autonome.

Nous avons fait notre simulation en deux de modélisations :

- Modélisation dans le plan horizontale (plan de cap ou de lacet)
- Modélisation dans le plan vertical (plan d'immersion ou de plongée).

Les résultats des simulations sont présentés avec différentes techniques de commande non linéaire, lesquels :

- Commande par mode glissant du premier ordre.
- Commande par mode glissant flou.
- Commande par mode PI glissant flou.

5.2 Résultats des simulations de la commande par mode glissant du premier ordre

Dans cette section, nous présentons nos résultats de simulation sur les lois de commande en régime glissant du premier ordre. Ces simulations sont réalisées en utilisant un simulateur basé sur le modèle mathématique à 6ddl du robot sous-marin autonome. Avec le but de comparer les résultats entre différentes fonctions sigmoïdes, les expérimentations ont été réalisées en utilisant la fonction signe (sign) et le tangente hyperbolique (tanh).

Dans un premier temps, nous avons réalisé des simulations sans prendre en compte l'environnement. Puis, dans une deuxième phase, nous avons ajouté des perturbations au robot afin de tester la robustesse de la commande par mode glissant.

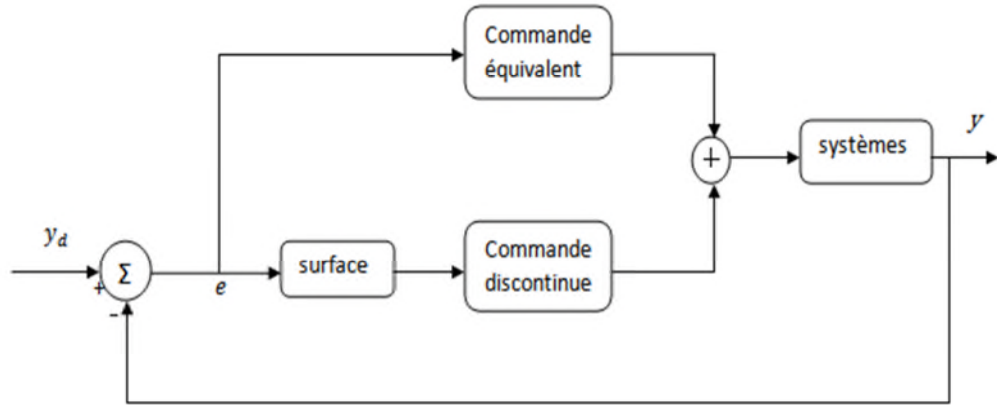


Figure 5.1 : schéma blocs de la commande par mode glissant du premier ordre.

Nous présentons pour ces deux types de simulations, le cap ψ et l'angle d'inclinaison des gouvernes δ_c pour le plan horizontal du véhicule, le profondeur z , le tangage θ et l'angle d'inclinaison des gouverne de plongés δ_p .

La mission du véhicule consiste en une simple ligne droite d'une durée de 80s.

5.2.1 Simulation sans bruits

Les paramètres de la simulation :

- Le cap désiré : $\psi = 90^\circ$
- La profondeur désirée : $z_d = 5m$
- La vitesse absolue du véhicule : $V_s = 2.6m/s$.

✓ Cap du véhicule

En ce qui concerne le cap du robot, le résultat de simulation devant cette loi de commande est donné sur la figure (5.2). Nous pouvons remarquer l'apparition du phénomène de broutement (réticence) dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes de cap δ_c qu'utilise la fonction *sign* comme fonction de saturation. Le robot arrive à son cap désiré ψ_d après 12 secondes.

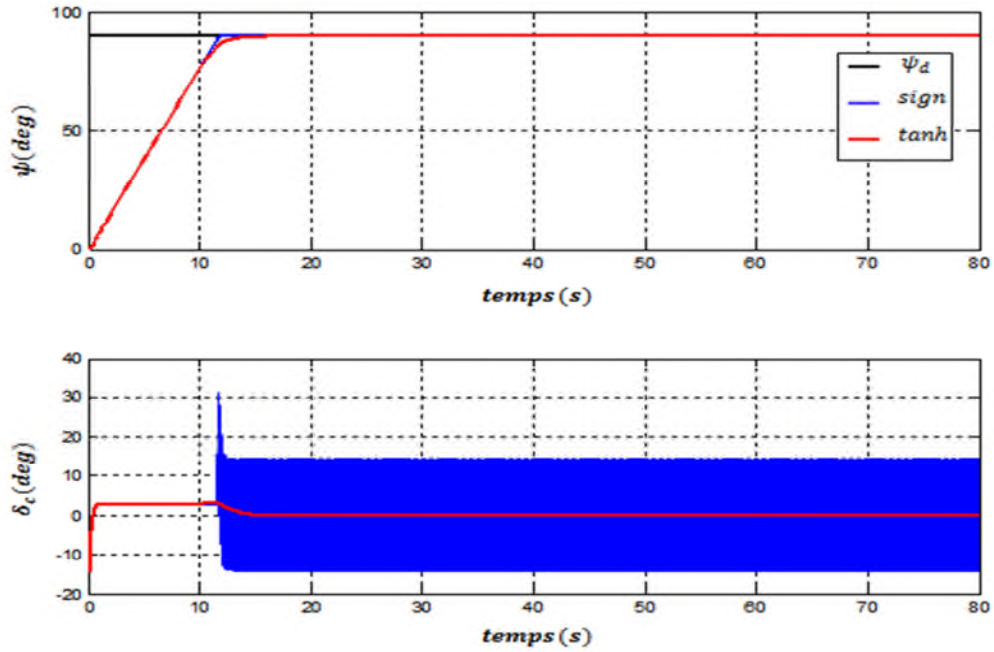


Figure 5.2 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan horizontal.

✓ Immersion du véhicule

Le résultat de simulation devant cette loi de commande est donné sur la figure (5.3). Nous pouvons remarquer l'apparition du phénomène de broutement dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes d'immersion δ_p qu'utilise la fonction $sign$ comme fonction de saturation. Le robot arrive à sa profondeur désirée z_d après 22 secondes, avec un angle de tangage θ nul.

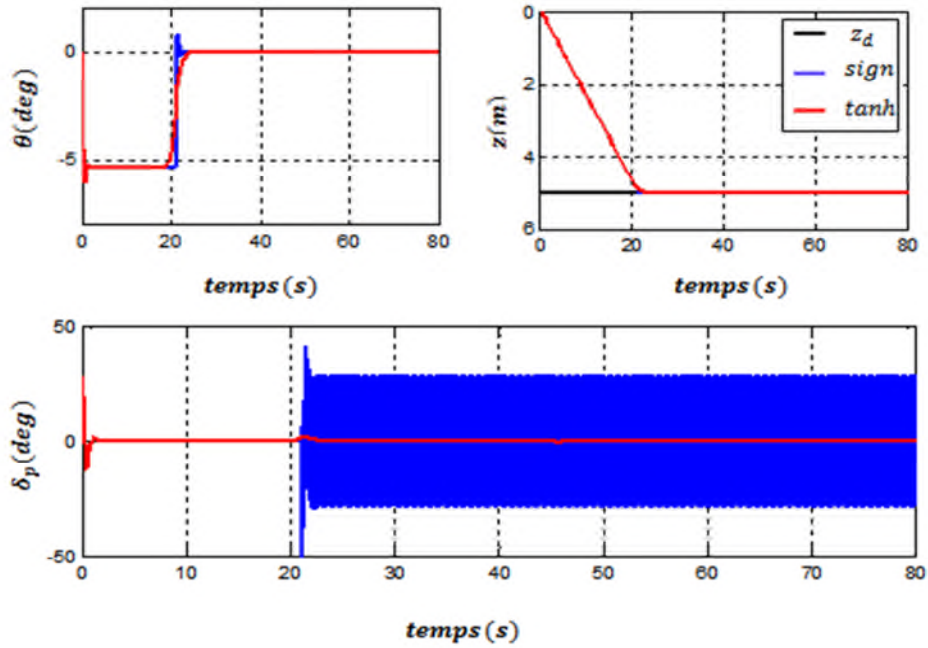


Figure 5.3 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan vertical.

5.2.2 Simulation avec bruits

Nous nous intéressons dans cette partie, au test de la robustesse de la commande par mode glissant du premier ordre développée précédemment ou nous allons imposer dans un premier temps une force de trainée au mouvement de robot (sur l'entrée du système c-à-d sur les gouvernes) dans les deux plans vertical et horizontal. Nous allons considérer dans un deuxième temps que le robot se trouve au milieu d'un courant marin, pour cela nous allons ajouter aux simulations des bruits sur les capteurs. Les mesures des capteurs sont soumises à d'écarts bruits gaussiens. Bien sur sans oublier que nous allons aussi ajouter les incertitudes paramétriques de +20% sur les inerties (i_{zz}, i_{yy}) et sur les paramètres hydrodynamiques $(Z_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}})$.

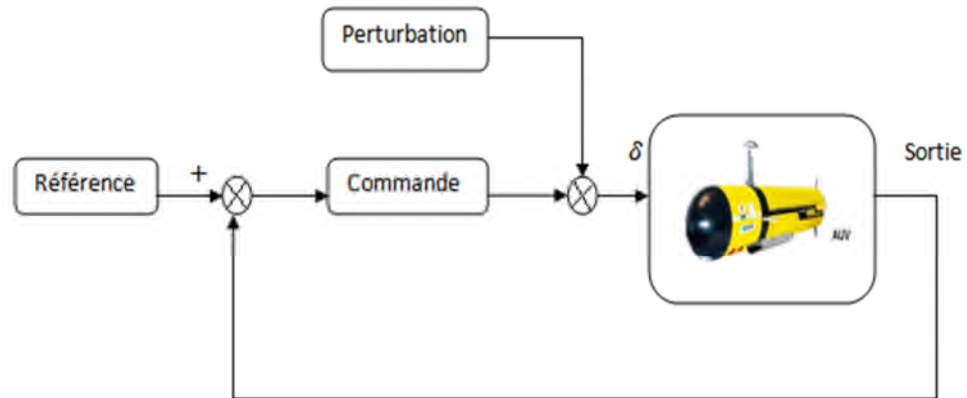


Figure 5.4 : Schéma bloc de la commande en présence de perturbation sur l'entrée du système.

✓ Cap du véhicule

Si on applique une force perturbatrice $p = 0.51\sin(0.7t)$ à l'instant $t = 60s$ sur l'entrée du robot on obtient la figure (5.5). D'après les résultats de simulation nous remarquons que le contrôleur par mode glissant d'ordre un montre un rejet acceptable de la perturbation dans le plan horizontal.

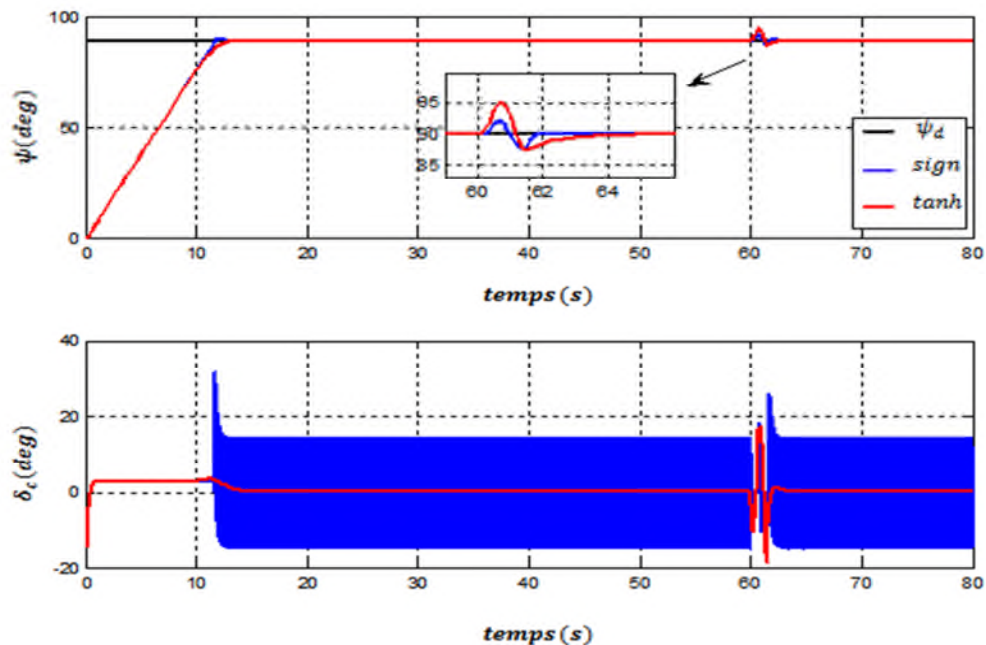


Figure 5.5 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.

Nous ne bruitons pas les mesures des capteurs pour le plan vertical du véhicule. Nous privilégions la réaction du robot dans le plan horizontal. Les résultats de simulation devant cette loi de commande avec bruit est donnée sur la figure (5.7). Les résultats de simulation

montrent une robustesse acceptable devant les perturbations de l'environnement. Nous remarquons la réapparition du phénomène du broutement dans le signal de commande qu'utilise la fonction tanh.

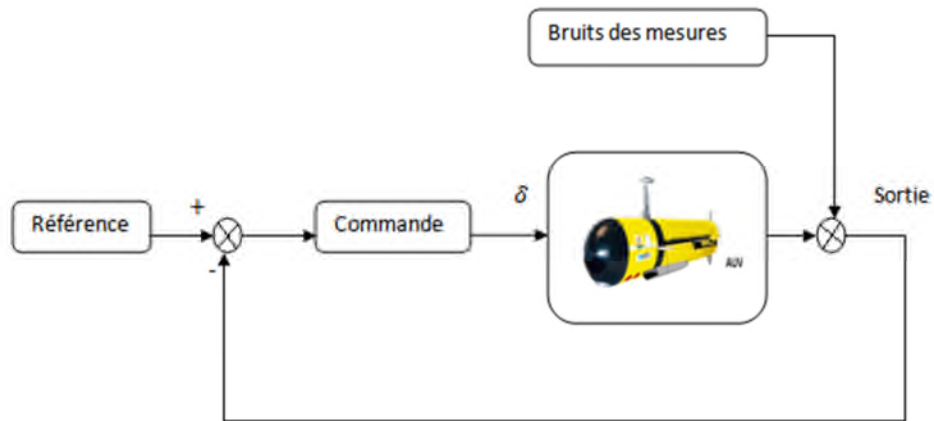


Figure 5.6 : Schéma global de la commande en présence de bruits issue des capteurs

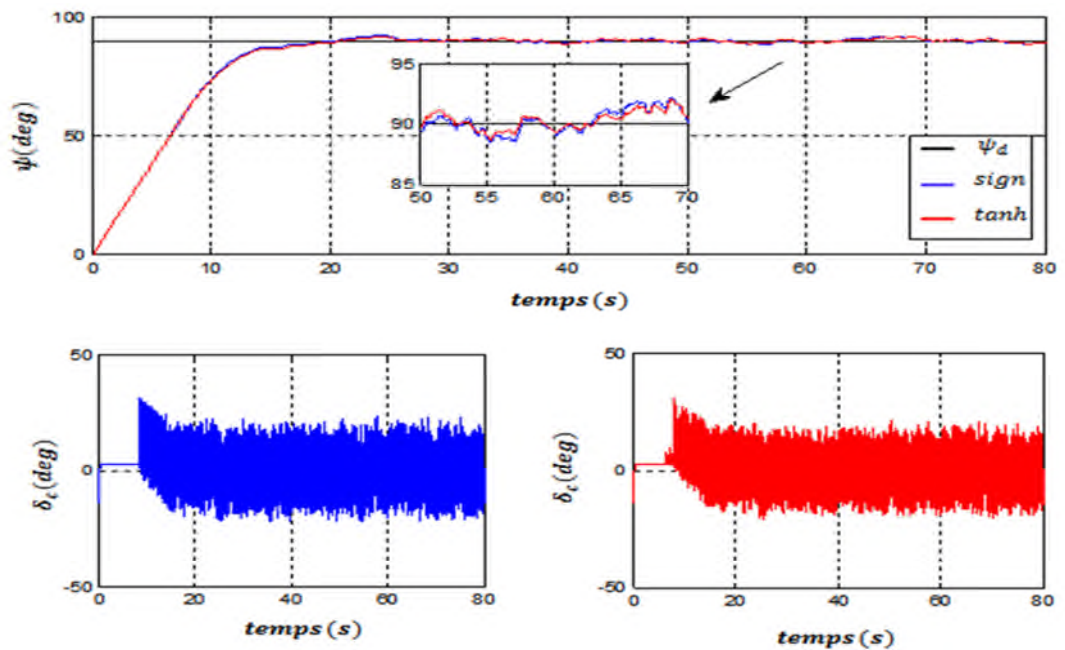


Figure 5.7 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec un bruit des capteurs dans le plan horizontal.

✓ Immersion du véhicule

Si on applique une force perturbatrice $p = \sin(0.7t)$ à l'instant $t = 60s$ sur l'entrée du robot on obtient la figure (5.8). D'après les résultats de simulation nous remarquons que le contrôleur par mode glissant du premier ordre montre un rejet acceptable de la perturbation dans le plan vertical.

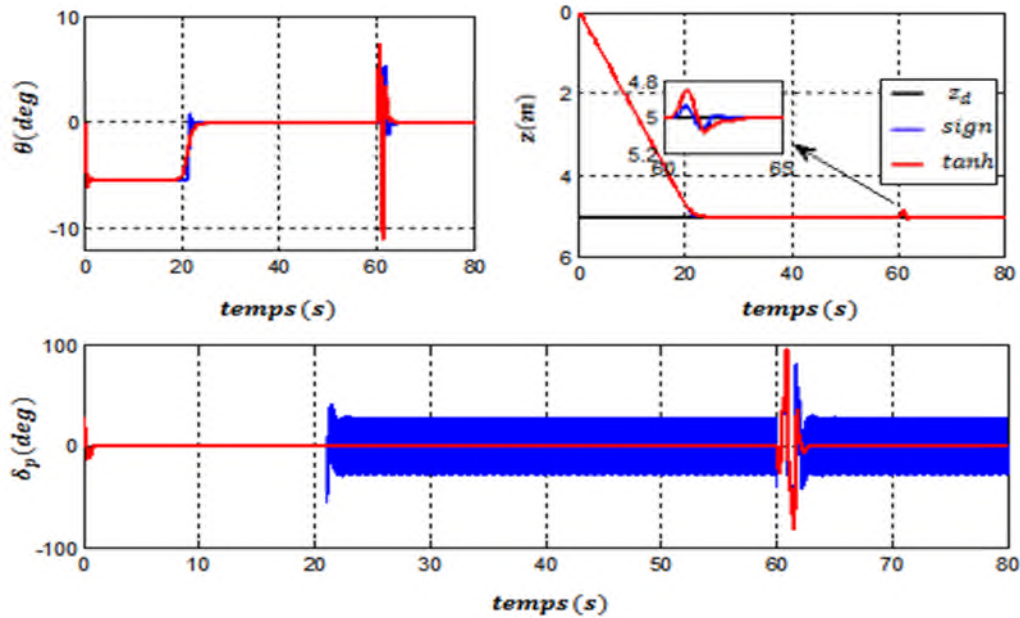


Figure 5.8 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec bruits sur l'entrée dans le plan vertical.

Le comportement de la technique de premier ordre sous l'influence du bruit de courant marin est fourni par la figure (5.9). Les résultats de simulation montrent une robustesse acceptable devant les perturbations de l'environnement. Nous remarquons la réapparition du broutement dans le signal de commande qu'utilise la fonction tanh.

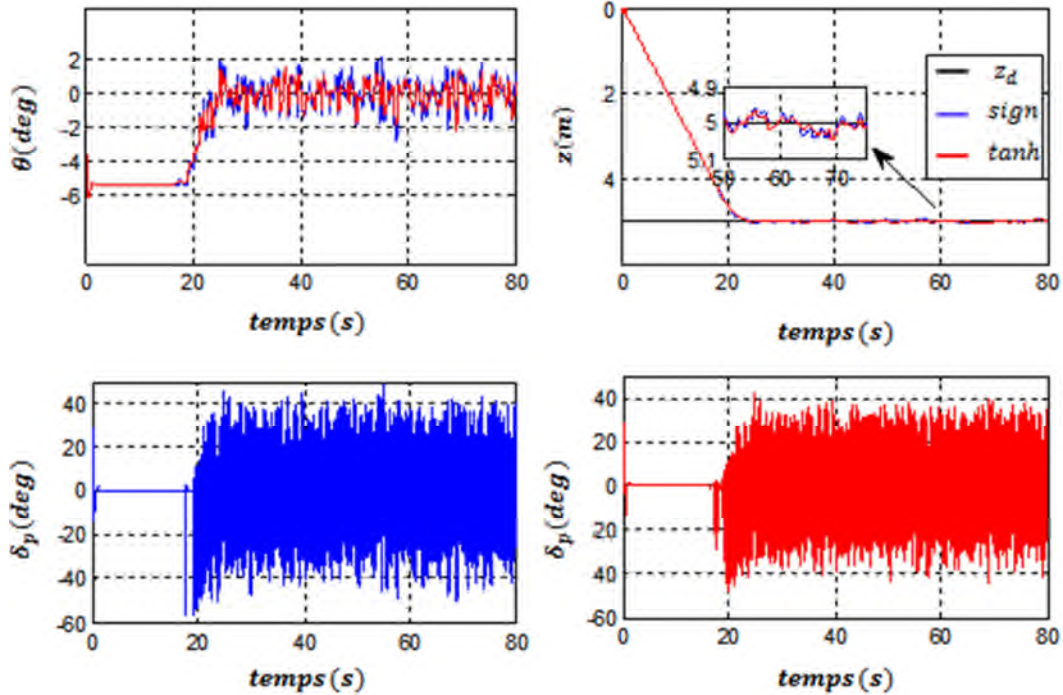


Figure 5.9: Réponse du robot devant la commande par mode glissant du premier ordre avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical.

L'effet du broutement est réduit en remplaçant la fonction signe par tanh, mais cette solution n'est pas optimale du fait que le broutement réapparaît lorsque le bruit des capteurs est rajouté aux simulations. Pour cela nous allons introduire et implémenter la technique de commande par mode glissant fluou.

5.3 Résultats des simulations de la commande par mode glissant fluou

Dans cette section, nous présentons nos résultats de simulation sur les lois de commande en régime glissant fluou. Avec le but de comparer les résultats entre la commande par mode glissant et la commande par mode glissant fluou.

5.3.1 Simulation sans bruits

✓ Cap du véhicule

En ce qui concerne le cap du robot, les résultats de simulation devant cette loi de commande est donné sur la figure (5.10). Nous pouvons remarquer l'élimination du phénomène de broutement (réticence) dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes de cap δ_c . le robot arrive à son cap désiré ψ_d après 12 secondes.

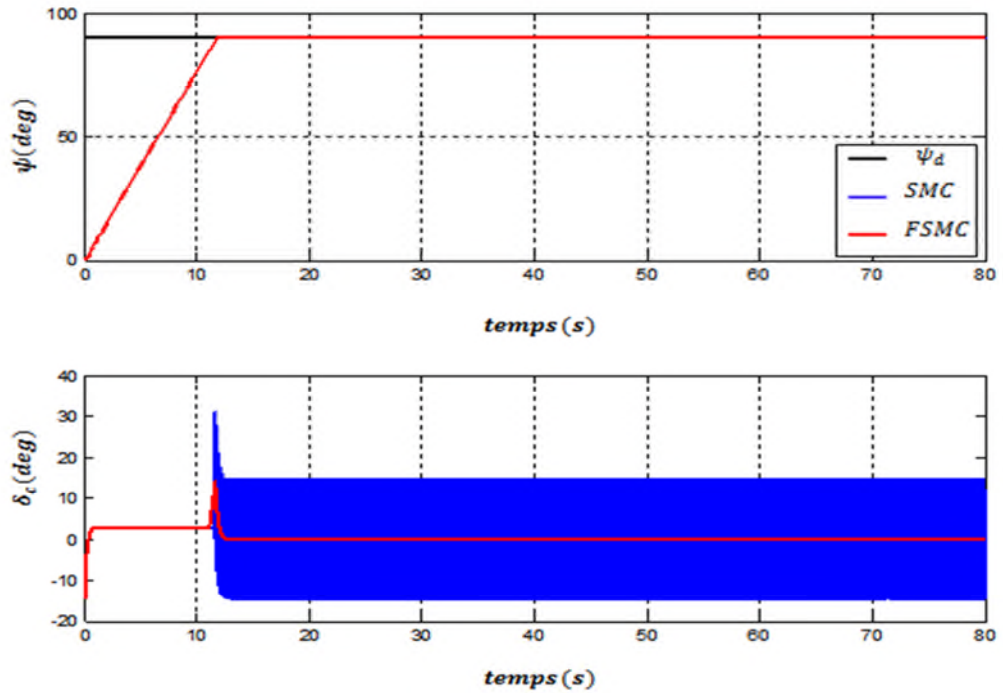


Figure 5.10 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou dans le plan horizontal.

✓ Immersion du véhicule

Le résultat de simulation devant cette loi de commande est donné sur la figure (5.11). Nous pouvons remarquer l'élimination du phénomène du broutement dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes d'immersion δ_p . Le robot arrive à sa profondeur désiré z_d après 22 secondes, avec un angle de tangage θ nul.

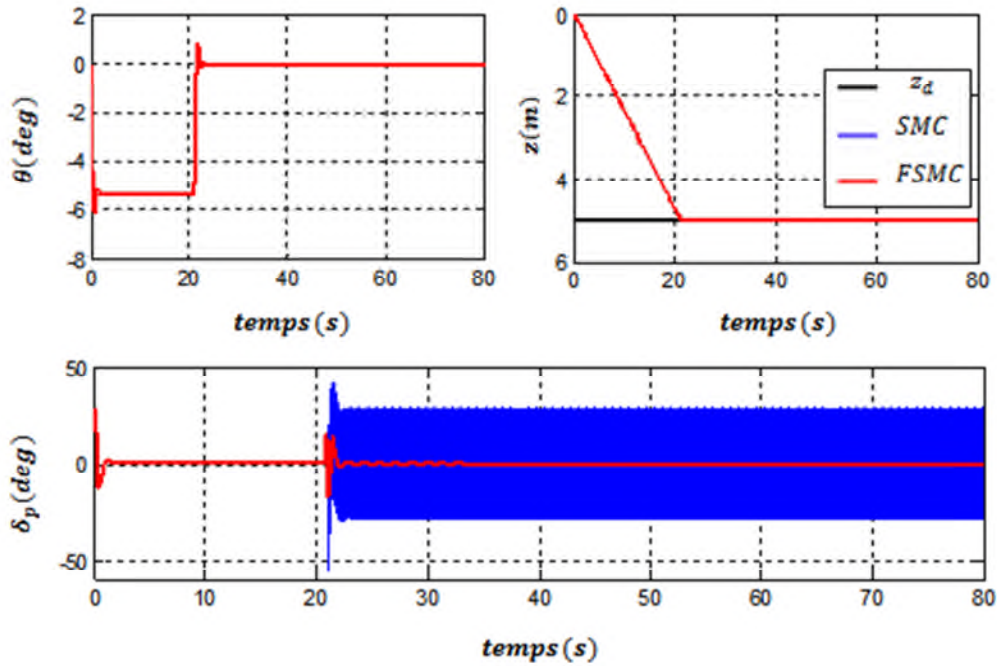


Figure 5.11 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou dans le plan vertical.

5.3.2 Simulation avec bruits

Les conditions pour les simulations bruitées sont identiques à celles de la section précédente.

✓ Cap du véhicule

Nous ne bruitons pas les mesures des capteurs pour le plan vertical du robot. Nous privilégions d la réaction du robot dans le plan horizontal. Les résultats de simulation devant cette loi de commande avec bruits est donnée sur les figures (5.12) et (5.13). Les résultats de simulation montrent une divergence du système par rapport à ces états désiré. Nous avons perdu de la robustesse devant les perturbations de l'énergie.

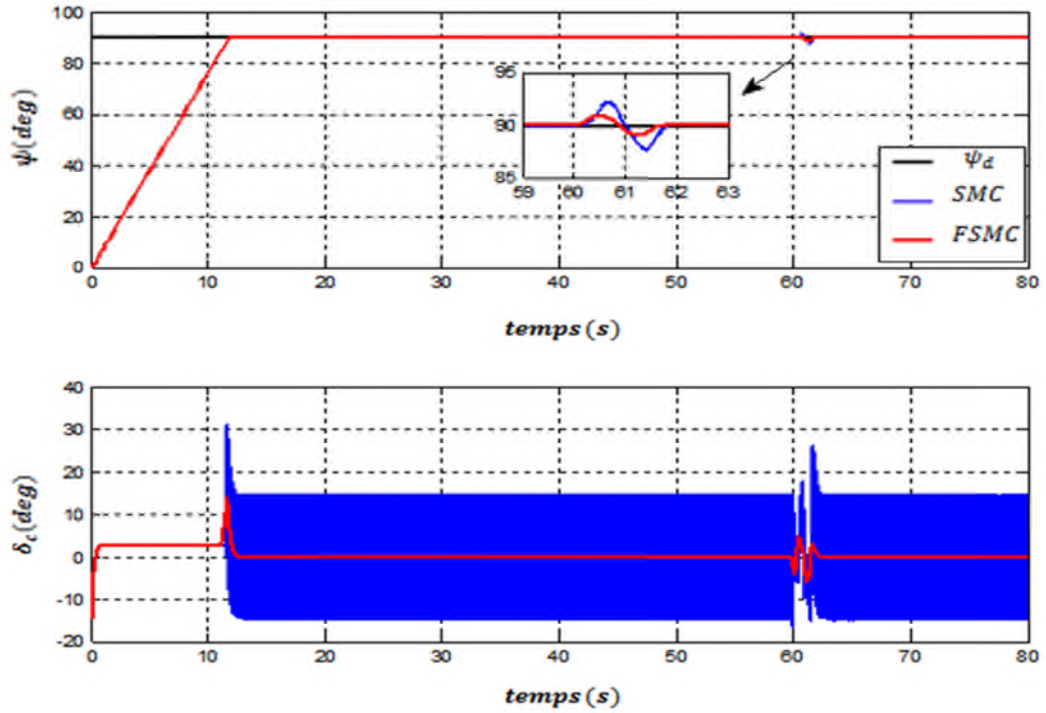


Figure 5.12 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.

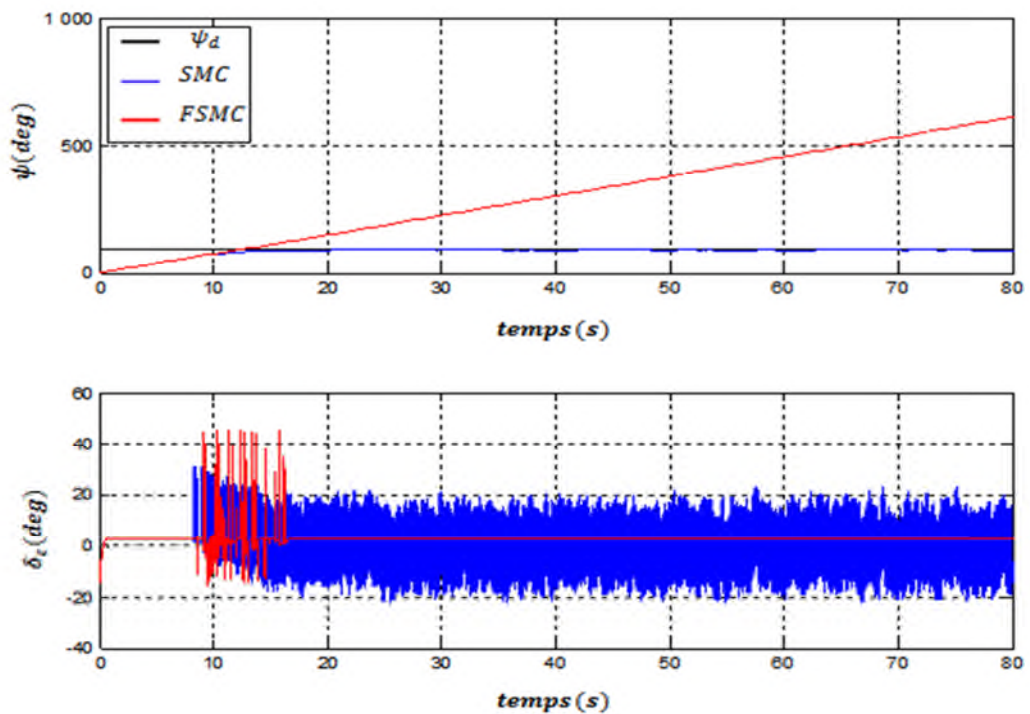


Figure 5.13 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant flou avec bruit sur les capteurs dans le plan horizontal.

✓ **Immersion du véhicule**

Le comportement de cette commande sous l'influence des bruits est fourni par les figures (5.14) et (5.15). Les résultats de simulation montrent une divergence du système par rapport à ces états désiré. Nous avons perdu de la robustesse devant les perturbations de l'énervement.

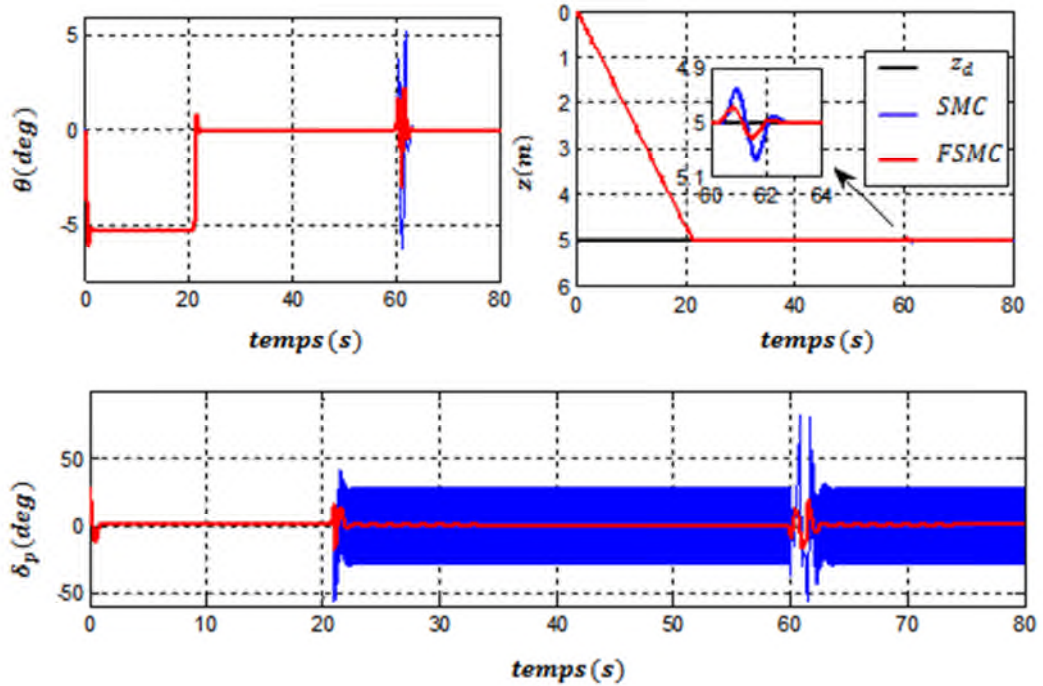


Figure 5.14 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan vertical.

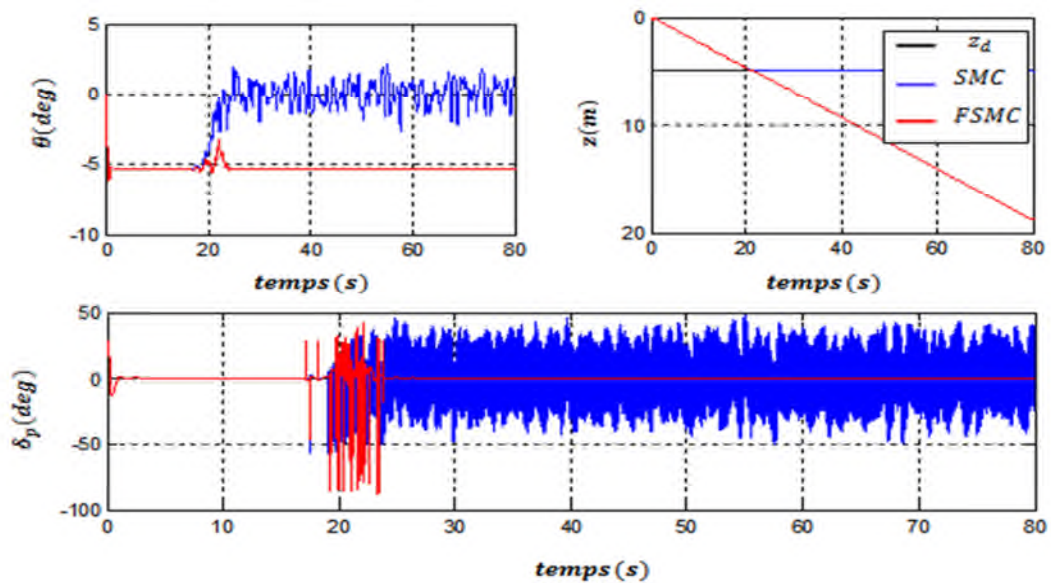


Figure 5.15 : Réponse du robot devant la commande par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical.

Afin d'améliorer cette divergence de système on a essayé de concevoir un contrôleur plus robuste vis-à-vis à des perturbations. Il s'agit de contrôleur proportionnel intégral PI par mode glissant flou.

5.4 Résultats des simulations de la commande par mode PI glissant flou

Dans cette section, nous présentons nos résultats de simulation sur les lois de commande en régime PI glissant flou. Avec le but de comparer les résultats entre la commande par mode glissant et la commande par mode PI glissant flou.

5.4.1 Simulation sans bruits

✓ Cap du véhicule

En ce qui concerne le cap du robot, le résultat de simulation devant cette loi de commande est donnée sur la figure (5.16). Nous pouvons remarquer l'élimination du phénomène de broutement (réticence) dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes de cap δ_c . Le robot arrive à son cap désiré ψ_d après 5 secondes.

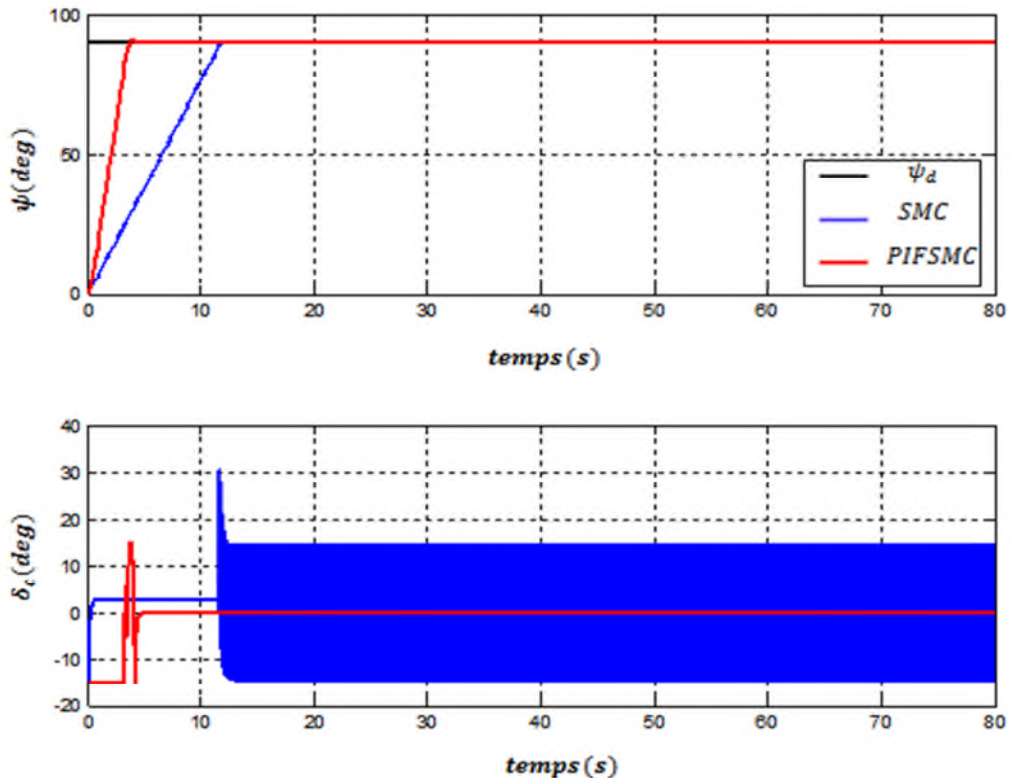


Figure 5.16 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant flou dans le plan horizontal.

✓ Immersion du véhicule

Le résultat de simulation devant cette loi de commande est donné sur la figure (5.17).

Nous pouvons remarquer l'élimination du phénomène de broutement dans le graphe de l'inclinaison des gouvernes d'immersion δ_p . Le robot arrive à sa profondeur désirée z_d

Après 6 secondes, avec un angle de tangage θ nul.

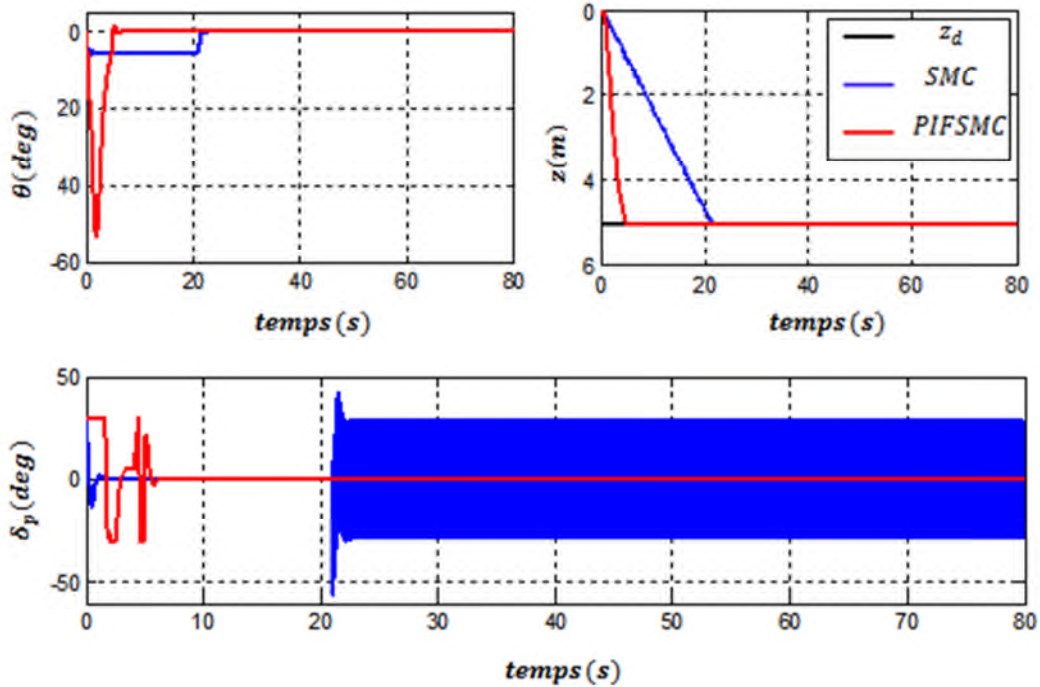


Figure 5.17 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant flou dans le plan vertical.

5.4.2 Simulation avec bruits

Les conditions pour les simulations bruitées sont identiques à celles de la section précédente.

✓ Cap du véhicule

Nous ne bruitons pas les mesures des capteurs pour le plan vertical du robot. Nous privilégions la réaction du robot dans le plan horizontal. Les résultats de simulation devant cette loi de commande avec bruits est donnée sur les figures (5.18) et (5.19). Les résultats de simulation montrent une robustesse devant les perturbations de l'énerverment.

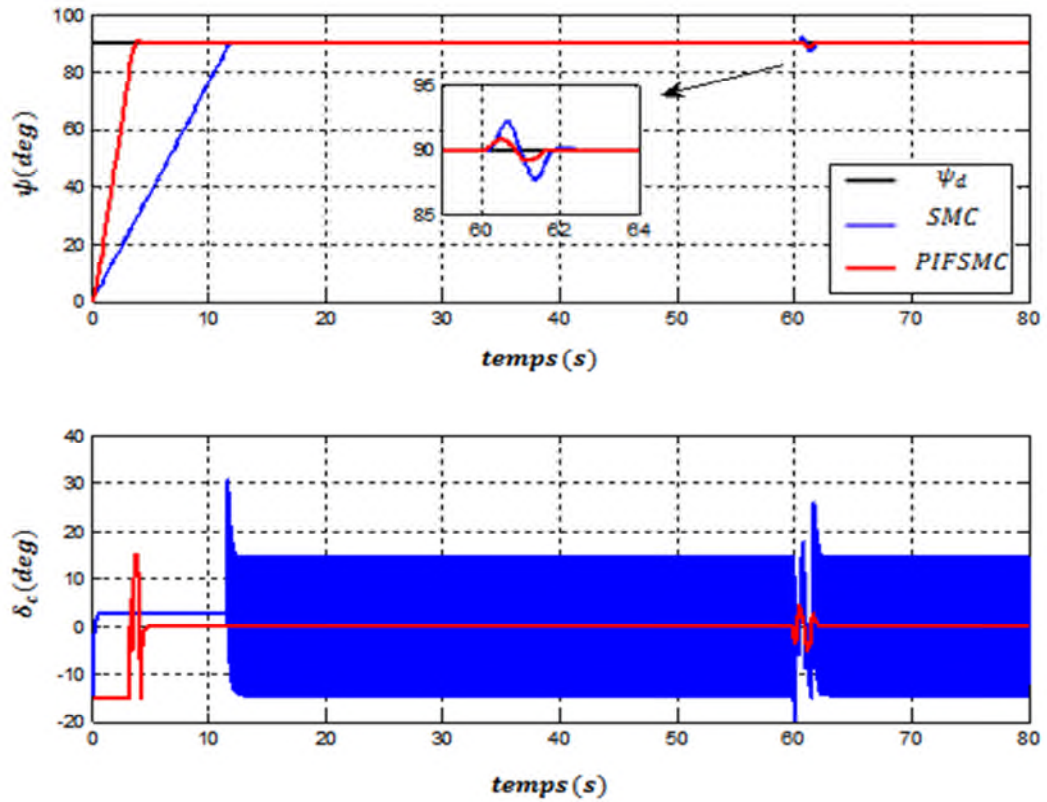


Figure 5.18 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.

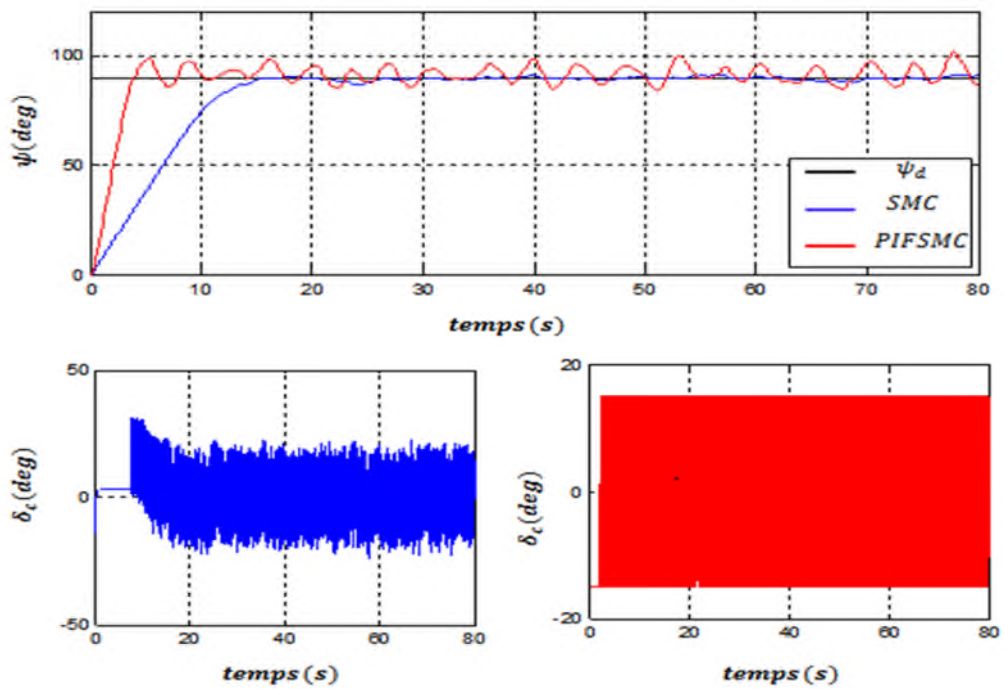


Figure 5.19 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan horizontal.

✓ **Immersion du véhicule**

Le comportement de cette commande sous l'influence des bruits est fourni par les figures (5.20) et (5.21). Les résultats de simulation montrent une robustesse acceptable devant les perturbations de l'énervement.

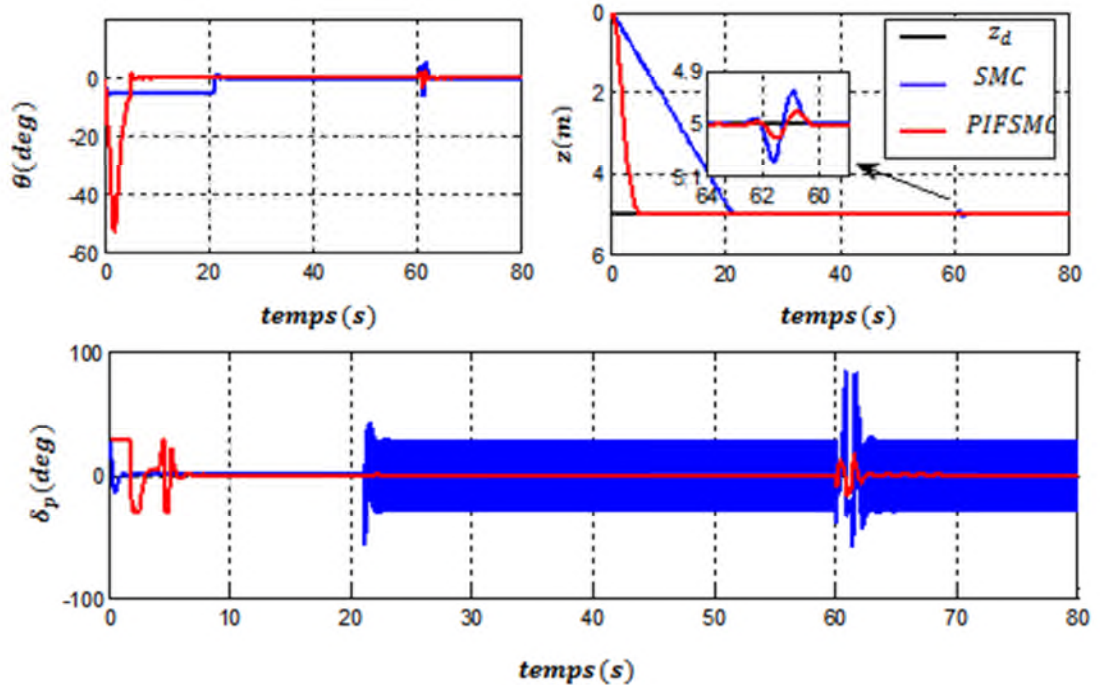


Figure 5.20 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan vertical.

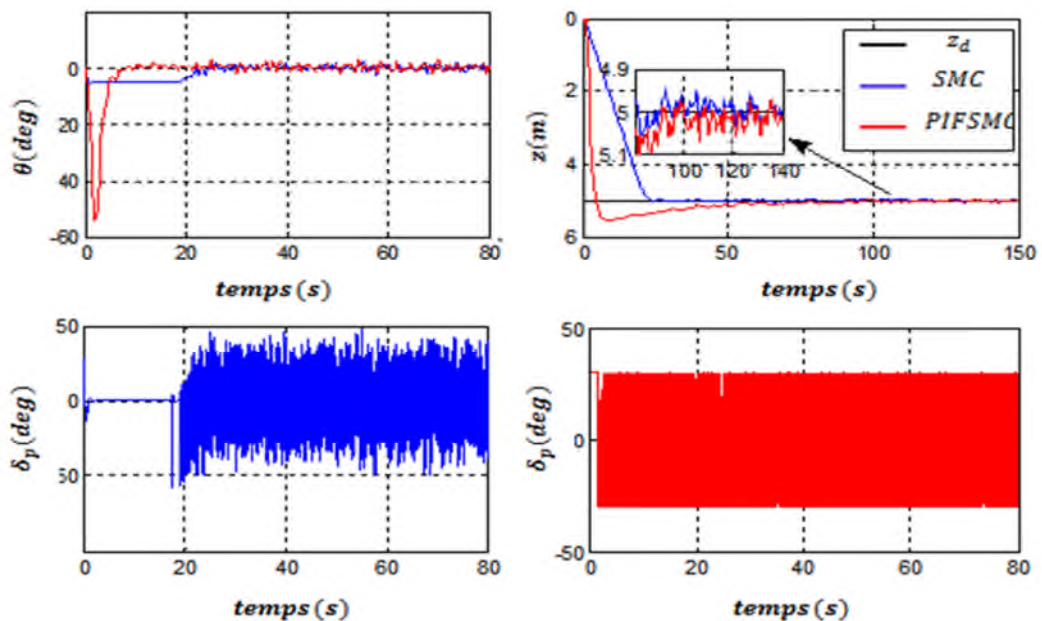


Figure 5.21 : Réponse du robot devant la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan vertical.

5.5 Conclusion

En se basant sur le modèle dynamique présenté dans le chapitre 02 nous avons utilisé plusieurs techniques de commandes robustes pour le contrôle d'un robot sous-marin autonome avec des approches par logique floue et le mode glissant. La commande par mode PI glissant flou à donner des bonnes résultats de simulation vu les performances réalisées, plusieurs tests de robustesse ont été effectués et cela en ajoutant des perturbations de nature externe comme le courant marin et des incertitudes paramétrique. Le contrôleur présente un rejet relatif à ces perturbations et il a su garder la stabilité du système

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude se situe dans le domaine de la commande des véhicules sous-marins de type torpille. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la commande par mode glissant basée sur la logique floue pour arriver à une commande permettant une bonne stabilité, une bonne robustesse du système du véhicule sous-marin autonome(H160).

Dans ce manuscrit, nous avons proposé une synthèse de la modélisation d'un robot sous-marin autonome, puis, nous avons détaillé les modèles non linéaires dans le plan horizontal et vertical du robot. A partir de cette modélisation, nous avons décrit les lois de commande actuelle du robot.

Dans la commande des systèmes sous-marins, les incertitudes paramétriques et les perturbations sont les principales difficultés. Les chercheurs ont développés des nombreuses solutions pour éliminer ces problèmes. La plupart d'entre elles sont basées sur des méthodes PID et commande par régime glissant d'ordre un. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux méthodes les plus utilisées au niveau l'industrie et des instituts de recherche. Les modes glissants permettent d'associer les qualités de robustesse devant des incertitudes et perturbations. Ils ont une relative simplicité d'implantation sur des systèmes réels, d'où l'importance de ces techniques. Les propriétés du mode glissant d'ordre un ont été développées dans le troisième chapitre. Il a été vu que la discontinuité au voisinage de la surface induisent des dynamiques de haute fréquence appelés réticence. Afin d'éviter cet inconvénient, nous avons combiné une nouvelle technique de commande par l'intelligence artificielle à la commande par régime glissant d'ordre un, il s'agit de la technique par logique floue.

L'objectif principale de ce travail de master est l'utilisation des techniques hybride type glissant d'ordre un floue avec un contrôleur proportionnel intégral, pour la commande de robot sous-marin autonome, ces techniques sont efficaces pour la commande de ce type du systèmes. Dans les prochaines années le recours aux techniques hybrides pour la commande de ces robots sera généralisé du fait de leur efficacité et de leur relative simplicité d'implémentation.

Perspectives

En particulier la technique de commande d'ordre un avec logique floue méritent d'être validées expérimentalement sur mer. Du fait que son comportement en simulation a été acceptable, et de ce que cette approche est une idée originale pour la commande des robots sous-marins. Les perspectives que nous pourrions lister sont :

- il serait intéressant de pouvoir utiliser des nouvelles techniques hybrides, afin d'obtenir des convergences sur la surface plus précises telle que : la technique neuro-flou par mode glissant
- parmi les applications principales des robots sous-marins autonomes est l'inspection de fonds marins, il serait intéressant pour minimiser le temps d'une mission d'inspection de fonds marins de proposer une stratégie de commande pour la coordination d'une flottille des robots sous-marins autonomes.
- Proposer des stratégies pour la génération des trajectoires et l'évitement d'obstacle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R.L.Wemli. Auv's the maturity of the technology. MTS/IEEE OCEANS, 1999.
- [2] L.Fournet. Positionnement d'engins autonomes grands fonds état de l'art et perspectives.
 Technical report, Conservatoire national des arts et métiers école supérieur des géomètres et topographes, 2002
- [3] S.A.Santos. Contribution a la conception des sous-marins autonomes : Architecture des Actionneurs, architecture des capteurs d'altitude, et commandes référencés capteurs. PhD thesis, These de l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, 1995
- [4] M. Sfakiotakis, D. Lane, and B. Davies. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. IEEE journal of Oceanic Engineering, 24(2), 1999.
- [5] J. Yuh. Design and control of autonomous underwater robots: A survey.
- [6] F. Hover. Autonomous underwater vehicles (auv's). Draft of Maneuvering Committee, 23rd.Int. Towing Tank Conférence, Venice, Italy, 2002.
- [7] J.Yuh. Modeling and control of underwater robotic vehicles. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(6), 1990.
- [8] L.Fournet. Positionnement d'engins autonome grands fonds état de l'art et perspectives. Technical report, Conservatoire national des arts et métiers école supérieur des géomètres et topographes, 2002.
- [9] Daniel W French. *Analysis of unmanned undersea vehicle (UUV) architectures and an assessment of UUV integration into undersea applications*. Thesis of naval postgraduate school , Monterey, California, 2010.
- [10] B.Jalving. *The ndrea-auv hight control system*. IEEE journal of Oceanic Engineering, 19(4), 1994.
- [11] T. Presreto. *Verification of a six-degree of freedom simulation model for the remus autonomous underwater vehicule*. Master's thesis, Master thesis in mechanical engineering at Massachusetts Institute of Technology, 2001. Q .P. Ha, Member, IEEE,
- [12] S.A.Santos . *Contribution à la conception des sous-marins autonomes : Architecture des actionneurs, architecture des capteurs d'altitude, et commandes références capteurs*. PhD thesis, These de l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, 1995.
- [13] P.M.Martins-Encarnacao. *Nonlinear path following control system for ocean vehicules*. PhD thesis, Dissertacao do Doutor Universidade técnica de lisboa, Instituto superior técnico, 2002

-
- [14] Lapierre, L. and Soetanto, D. (2007). *Nonlinear path following control of an AUV*. *Ocean Engineering*, 34 (11) :1734-1744.
- [15] R. Cristi, A. Papoulias-Fotis, and J. Healey. *Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane*. *IEEE JOURNAL OF Oceanic Engineering*, 15 (3), 1990.
- [16] L. Rodrigues, P. Tavares, and M. Prado. *Sliding mode control of an auv in the diving and steering planes*. *MTS/ IEEE OCEANS*, 1996
- [17] Salgado-Jimenez, T. (2004). *Contribution à la commande d'un robot sous-marin autonome de type torpille*. PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques de la langue doc.
- [18] Jean-Mathias Spiewak. *Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes*. Thèse de doctorat en systèmes automatiques et microélectroniques, université de Montpellier II, 2007.
- [19] Hallil Akcakaya and all. *Sliding mode control of autonomous underwater vehicle*. International conference on electrical and electronics engineering 2009
- [20] Marzbanrad A R, Eghtescal M, Kaurali R. *A robust adaptive fuzzy sliding mode controller for trajectory tracking of ROV's*. Decision and control and european control conference, IEEE, 2011.
- [21] He-ming and all. *Nonlinear Backstepping control of underactuated AUV in diving plane*. *Advances in information sciences, services sciences*, 2012.
- [22] Simon A. *Depth control of micro autonomous underwater vehicles () : simulation and experimentation*. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014.
- [23] Zool H, Ismail and Vina W. *Second order sliding mode control scheme for an autonomous underwater vehicle with dynamic region concept*. *Mathematical problems in engineering*, 2015.
- [24] Anirban nay, Surendra Singh patel, S.A Akbar. *Fuzzy logic based depth control of an autonomous underwater vehicle*. International multi-conference on automation, computing, communication, control and compressed sensing, pp117-123, IEEE, 2013.
- [25] Kailei Lao, Yunpeng Zhao, Xiao Liang. *tuning neuro controller by real code genetic algorithm with application to an autonomous underwater vehicle control system*. fourth international conference on intelligent systems design and engineering applications, PP 728-731, IEEE, 2013.

-
- [26] VIDAL, Paul-Étienne. *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation*. 2004.
- [27] T. I. Fossen. *Nonlinear modeling and control of underwater vehicles*. PhD thesis, Dr. in Ing. Thesis of Norwegian Institute of technology, 1994.
- [28] SNAME. *Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid*. Technical Report No. I-15, Technical and research bulletin, The society of naval architects and marine engineers, New York, 1994.
- [29] W. Khalil and E. Dombre. *Modélisation identification et commande des robots*. 2e édition. Hermes Science, 1999.
- [30] E. Olguin-diaz. *Modélisation et commande d'un système véhicule / manipulateur sous-marin*. PhD thesis, These de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 1999.
- [31] V. Creuze. *Navigation référencée terrain pour véhicule autonome sous-marin*. PhD thesis, These de docteur de l'université de Montpellier II, 2002.
- [32] H. BAuhler. *Reglage par mode de glissement*. Presses polytechniques ro-mandes, 1986.
- [33] Baroudi, Mariam (2010). *Contrôle d'un bras robotique flexible*. Mémoire. Rouyn-Noranda, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Sciences appliquées, 127 p.
- [34] V. Utkin, and HoonLee. *Chattering problem in Sliding Modes Control Systems*. pp 346-350, Alghero Italy, 2007.
- [35] L. Fridman, Y. Shtessel, C. Edwards and Xing-Gang Yan. High-ordre sliding-mode observer for state estimation and input reconstruction in non-linear systems. *international Journal of robust and non-linear control* 18(4-5) : pp 399-413, 2008.
- [36] I.Boiko, L. Fridman, A. Pisano, and Usai. *Analysis of chattering in system with second ordre sliding modes*. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol 52, no, 11, pp, 2085-2102, 2007
- [37] A Hamzaoui, N Essounbouli and J Zaytoon. *Fuzzy Sliding Mode Control for Uncertain SISO Systems*. *Processin of IFAC Conf. on Intelligent Control Systems and Signal ICONS03*, pages 233238, 2003.

- [38] O. Bethoux. Commande se detection de défaillance d'un convertisseur multicellulaire série. These de doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise. 2005.
- [39] L. Fridman et A. Levant. *High-Ordre Sliding Mode control in Engineering*. Ed. W. Perruquetti, J.P. Barbot, M. Dekker, Inc. New York, 2002.
- [40] Wei Wu. *Synthèse d'un contrôleur flou par algorithme génétique, application au réglage dynamique des paramètres d'un 00système*. Thèse de doctorat de l'université de lille 1,1998.
- [41] Q. H. Nguyen, D.C. Rye, H. F. Durrant-Whyte. *Fuzzy Sliding-Mode Controllers with Applications*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.48, NO.1, FEBRUARY 2001.
- [42] Chi-Ying Lianga, Juhng-Perng Su. *A new approach to the design of a fuzzy sliding mode controller*. Fuzzy Sets and Systems 139 111124, 2003.

Annexes

Annexe A

Paramètres du robot sous-marin autonome de forme cylindrique

A.1 Paramètres géométriques

paramètres	valeurs	unités	description
r	0.191	m	Rayon
l	1.386	m	Longueur
m	37	kg	Masse
V_{fl}	0.0508	m^3	Volume du solide

Tableau A.1 : Paramètres géométriques.

A.2 Paramètres inertiels I_0

Paramètres	valeurs	Unités
x_G	0	m
y_G	0	m
z_G	1.96e-002	m

Tableau A.2 : Centre de gravité.

Paramètres	Valeurs	Unités
I_{xx}	0.1770	Nms^2
I_{xy}	0.0000	Nms^2
I_{yz}	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.3 : paramètres inertiels.

A.3 Calcul des paramètres hydrodynamiques

, Od99, Fos94]. Un ellipsoïde comme celui qui apparaît sur la Figure (A.1) doit vérifier On peut obtenir des paramètres de masse ajoutée en utilisant les coefficients des corps ellipsoïdes [Lap99]:

1. $b = c$
2. $a > b$

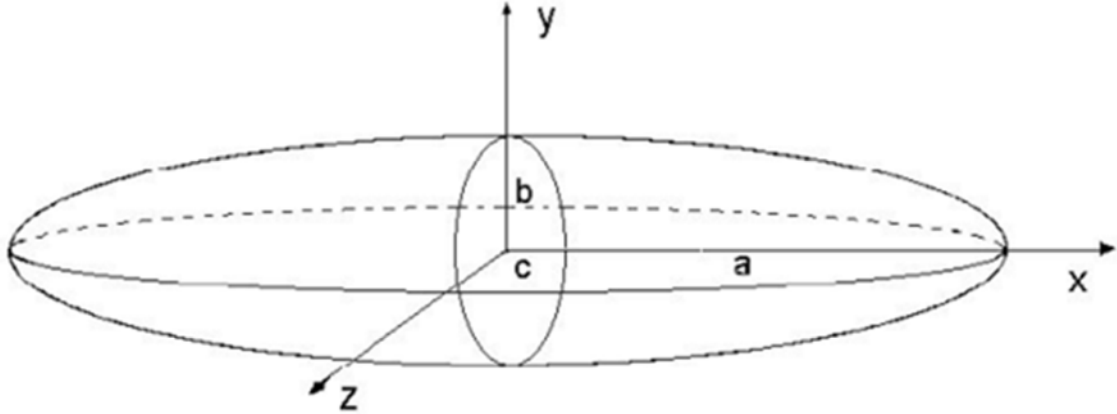


Figure A.1 : ellipsoïde

Les coefficients de la diagonale de la matrice de masse ajoutée sont exprimés comme suit :

$$X_{\dot{u}} = -\frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} m$$

$$Y_{\dot{v}} = -\frac{\beta_0}{2-\beta_0} m$$

$$Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}}$$

$$K_{\dot{v}} = 0.0$$

$$M_{\dot{q}} = -\frac{1}{5} \frac{(b^2 - a^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(b^2 - a^2) - (b^2 + a^2)(\alpha_0 - \beta_0)} m$$

$$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}}$$

Ou $m = \rho V_{ol}$ est la masse de l'ellipsoïde, $V_{ol} = \frac{\pi}{6} ab^2$ est le volume et les fonctions α_0 et β_0 dépendent de l'excentricité e et sont définies par :

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

$$\alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{1+e}{1-e} - e \right)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} \ln \frac{1+e}{1-e}$$

Pour le cas de notre Robot :

Paramètre	Valeurs	Unités	Description
$X_{\ddot{u}}$	-9.30e-001	<i>kg</i>	Masse ajoutée
$Y_{\ddot{v}}$	-3.55e+001	<i>kg</i>	Masse ajoutée
$Y_{\dot{r}}$	+1.93e+000	<i>Kgm/rad</i>	Masse ajoutée
$Z_{\ddot{w}}$	-3.55e+001	<i>kg</i>	Masse ajoutée
$Z_{\dot{q}}$	-1.93e+000	<i>Kgm/rad</i>	Masse ajoutée
$K_{\dot{p}}$	-7.04e-002	<i>Kgm²/rad</i>	Masse ajoutée
$M_{\dot{w}}$	-1.93e+000	<i>kgm</i>	Masse ajoutée
$M_{\dot{q}}$	-4.88e+000	<i>Kgm²/rad</i>	Masse ajoutée
$N_{\dot{v}}$	+1.93e+000	<i>kgm</i>	Masse ajoutée
$N_{\dot{r}}$	-4.88e+000	<i>Kgm²/rad</i>	Masse ajoutée

Tableau A.4 : Masse ajoutée

A.4 Paramètres des forces d'amortissement

Les paramètres de force d'amortissement ont été calculés expérimentalement à partir du bassin de Carènes [Cau92] et sont donnés au tableau (A.5).

A.5 Paramètres de poids et de poussée d'Archimède

A.5.1 centre de flottabilité

On fait la considération que le centre de flottabilité est confondu avec le centre géométrique du véhicule [Fos94], voir Tableau (A.8)

Paramètre	Valeurs	Unités	Description
X_{uu}	-3.90e+000	Kg/m	Force d'amortissement
Y_{vv}	-1.31e+003	Kg/m	Force d'amortissement
Y_{rr}	6.32e-001	$Kg.m/rad^2$	Force d'amortissement
Y_{uv}	-2.86e+001	Kg/m	Force combiné
Y_{ur}	-5.22e+000	Kg/rad	Force combiné
Z_{ww}	-1.31e+003	Kg/m	Force d'amortissement
Z_{qq}	-6.32e-001	Kg/m	Force d'amortissement
Z_{uw}	-2.86e+001	Kg/m	Force combiné
Z_{uq}	-5.22e+000	Kg/rad	Force combiné
K_{pp}	-1.30e-001	Kgm^2/rad^2	Moment d'amortissement
M_{ww}	3.18e+000	Kgm^2/rad^2	Moment d'amortissement
M_{qq}	-9.40e+001	Kgm^2/rad^2	Moment d'amortissement
M_{uw}	2.40e+001	kg	Moment combiné
M_{uq}	-2.00e+000	Kgm/rad	Moment combiné
M_{vv}	-3.18e+000	Kgm^2/rad^2	Moment d'amortissement
N_{rr}	-9.40e+001	Kgm^2/rad^2	Moment d'amortissement
N_{uv}	-2.40e+001	kg	Moment combiné
N_{ur}	-2.00e+000	Kgm/rad	Moment combiné

Tableau A.5 : Paramètres des forces d'amortissement

Paramètres	Valeur	Unités	Description
ρ	1025	Kgm^3	Densité de l'eau de mer
9	9.81	$m.seg^2$	Gravité

Tableau A.6 : Paramètres physiques

Paramètres	Valeur	Unités	Description
WW	2.99e+002	Kgm^3	Poids
BB	3.08e+002	$m.seg^2$	Poussée d'Archimède

A.7 : Poids et poussée d'Archimède

Paramètres	Valeurs	Unités
x_B	0	m
y_B	0	m
z_B	0	m

A.8 : Centre de flottabilité

A.6 Paramètres des gouvernes

Les paramètres des gouvernes sont donnés au Tableau (A.9).

Paramètre	Valeurs	Unités	Description
$Y_{\delta c}$	9.64e+000	$kg/(m.rad)$	Force de la gouverne de cap
$Z_{\delta p}$	-9.64e+000	$kg/(m.rad)$	Force de la gouverne de plongée
$M_{\delta p}$	-6.15e+000	kg/rad	Moment de la gouverne de plongée
$N_{\delta c}$	-6.15e+000	kg/rad	Moment de la gouverne de cap

Tableau A.9 : Paramètres des gouvernes.

A.7 Paramètres du propulseur

Finalement les valeurs du propulseur sont listées au Tableau (A.10).

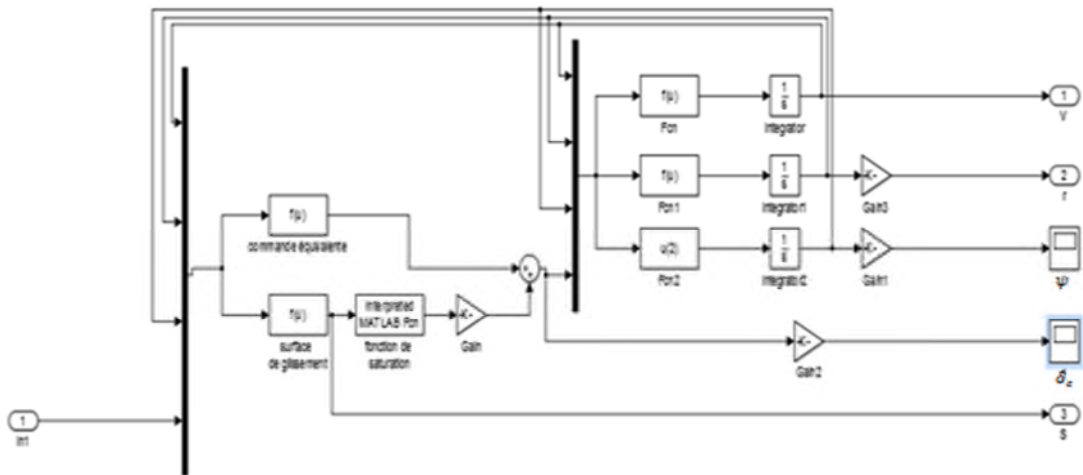
Paramètre	Valeurs	Unités	Description
D_p	0.1	m	Diamètre de l'hélice
C_{t_0}	0.50539		Constante
C_{t_1}	-0.088971		Constante
C_{t_2}	0.29960		Constante
C_{t_3}	0.046836539		Constante
C_{q_0}	0.090271		Constante
C_{q_1}	-0.01347		Constante
C_{q_2}	-0.023529		Constante
C_{q_3}	-0.002005		Constante
X_{prop}	9.25	N	La poussée de l'hélice
K_{prop}	-0.5430	$N.m$	Le couple de l'hélice

Tableau A.10 : Paramètres du propulseur

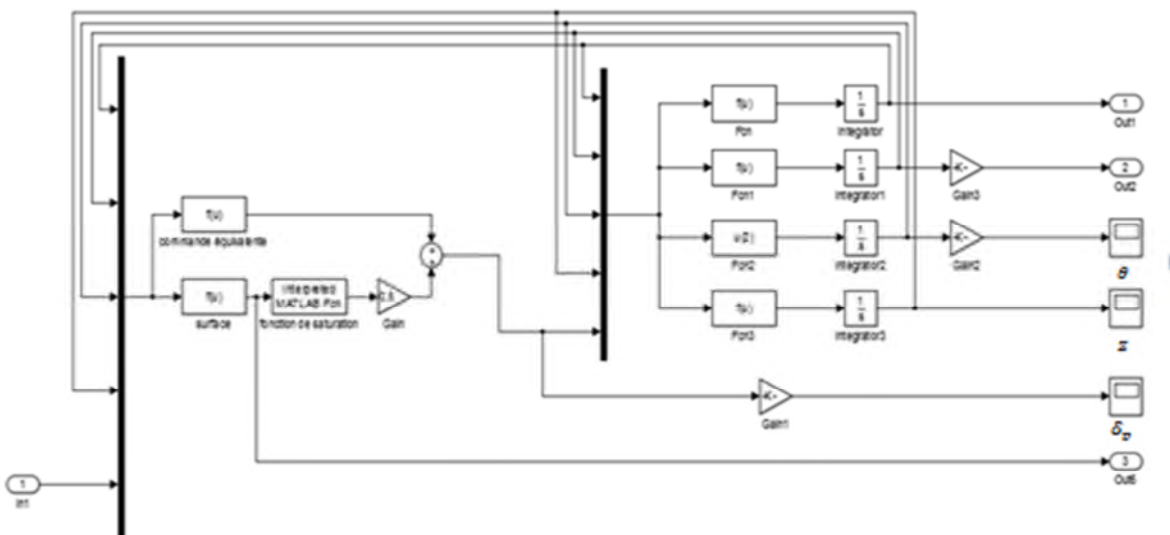
Annexe B

B. Les fichiers simulink de notre système :

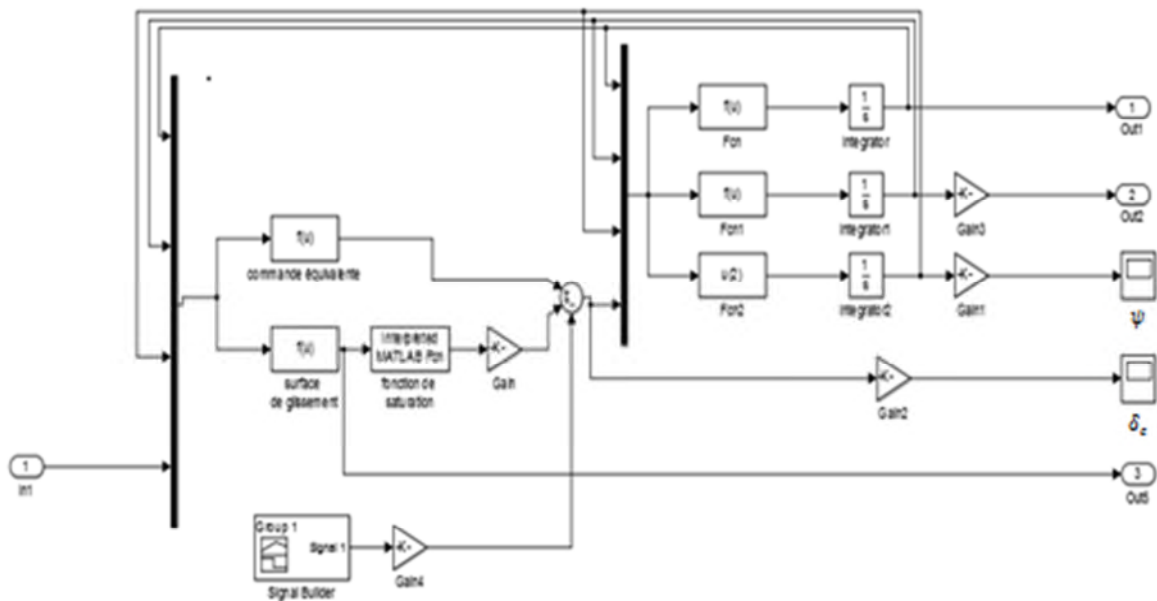
B.1 Résultats des simulations de la commande par mode glissant du premier ordre



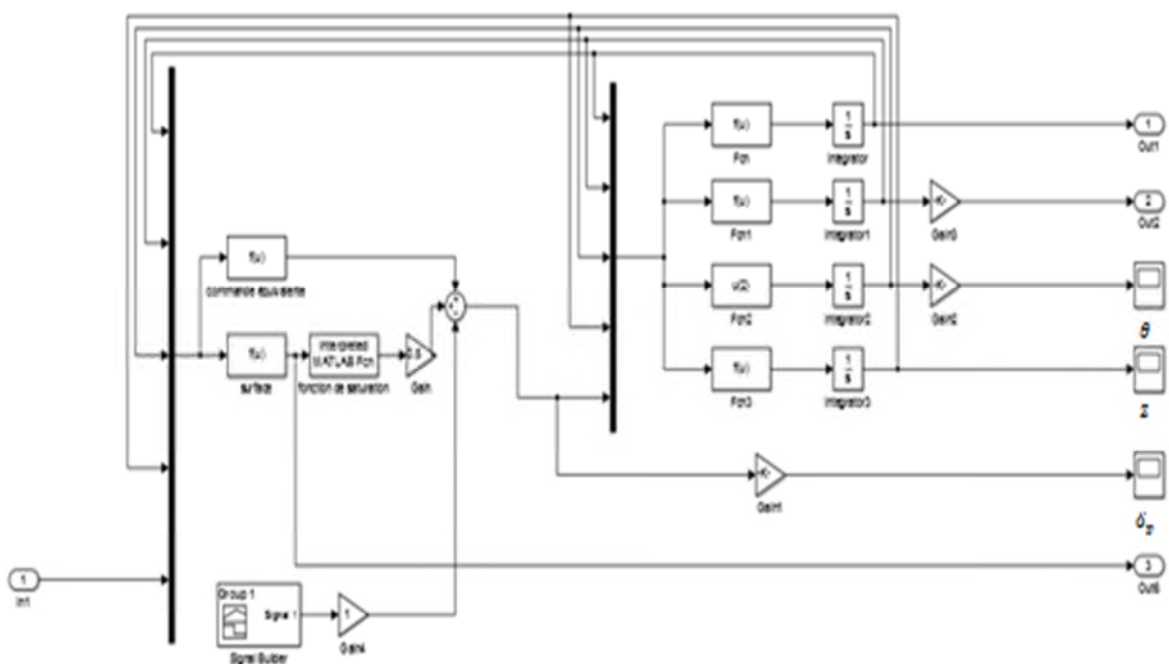
B.1 Le fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan horizontal sans perturbation.



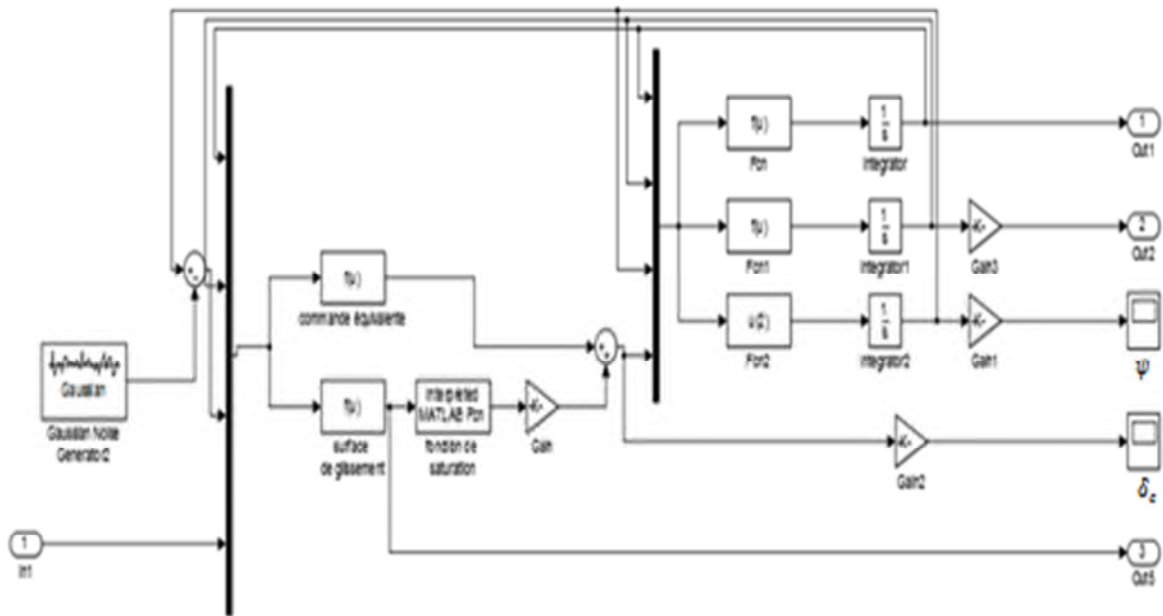
B.2 Le fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre dans le plan horizontal sans perturbation



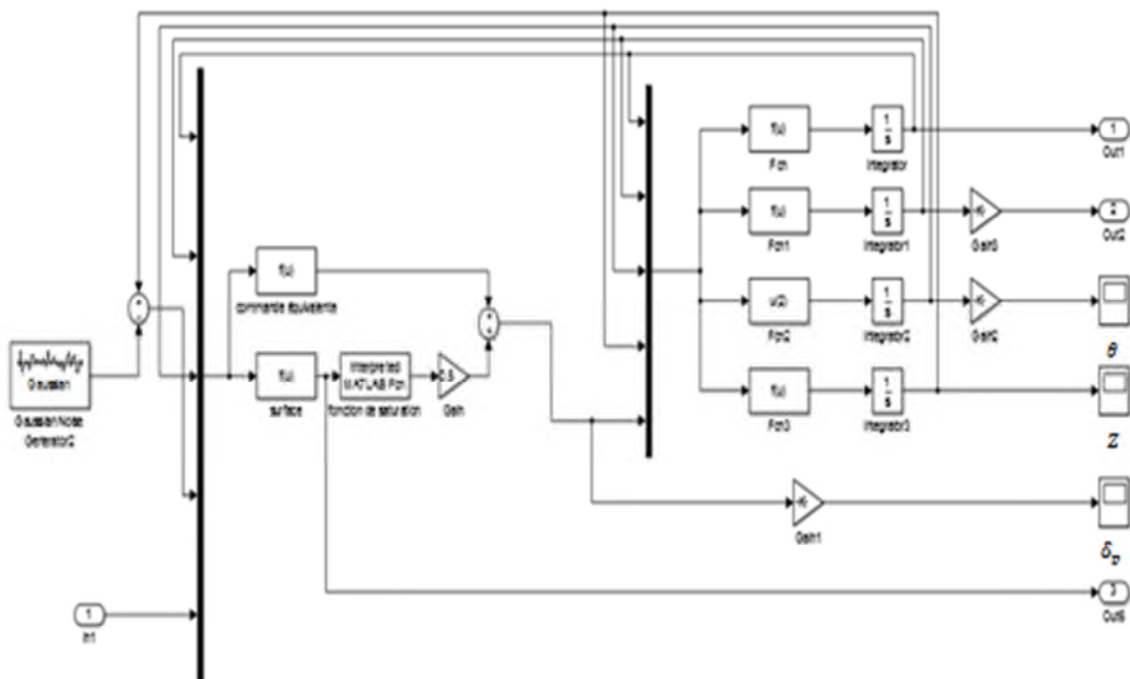
B.3 Fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.



B.4 Fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre avec perturbation d'entrée dans le plan vertical.

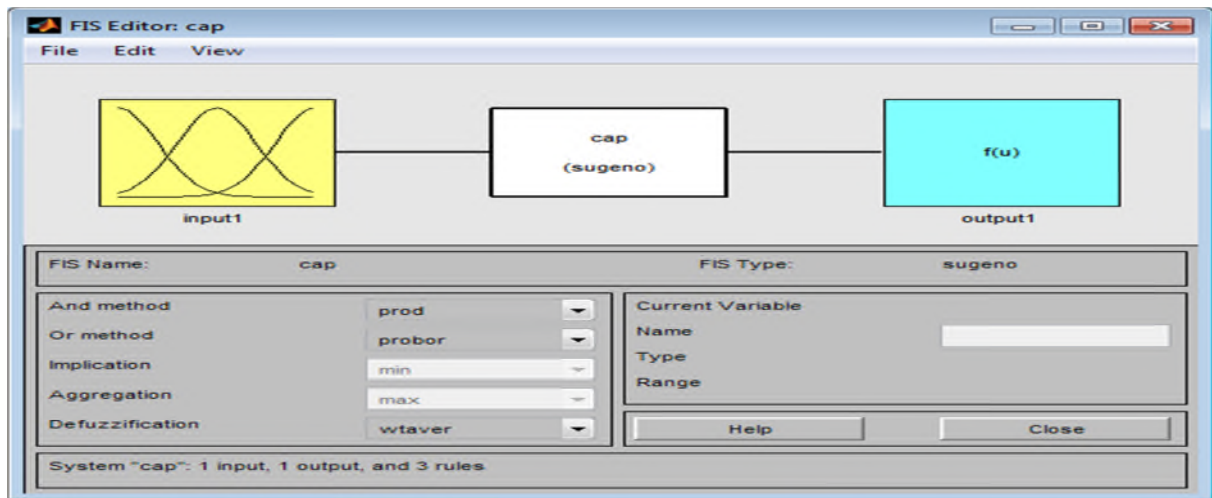


B.5 Fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre avec un bruit des capteurs dans le plan horizontal.

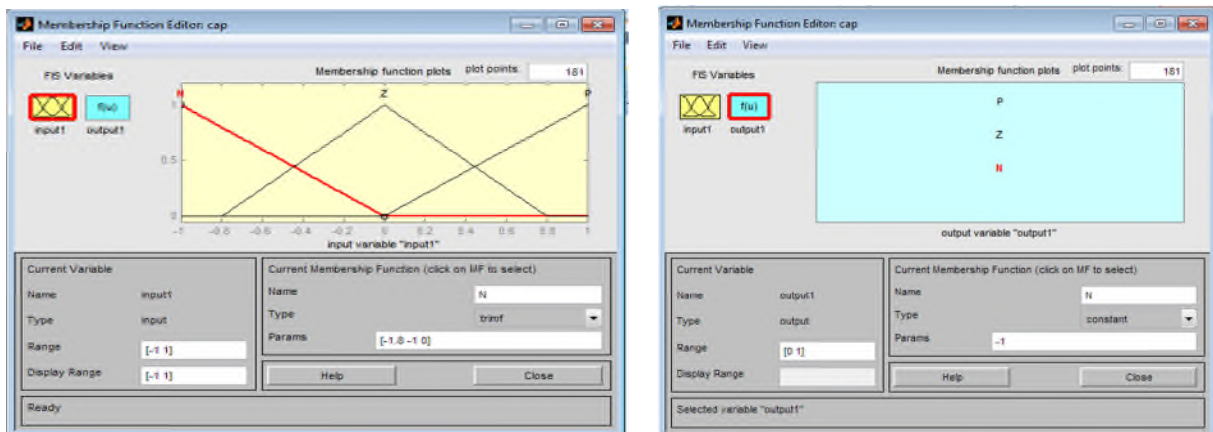


B.6 Fichier simulink de la commande par mode glissant du premier ordre avec un bruit des capteurs dans le plan vertical.

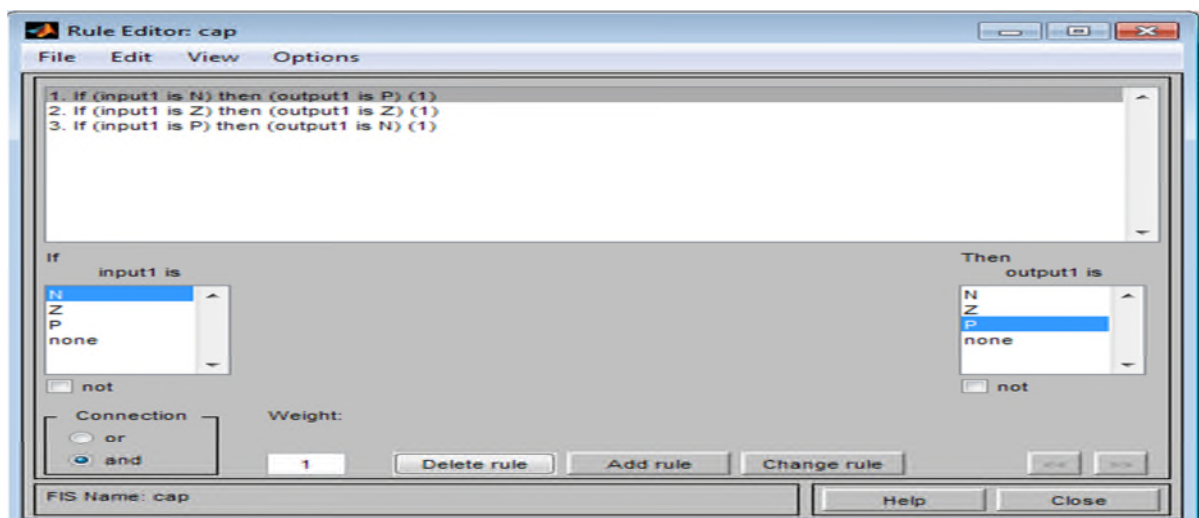
B.2 Résultats des simulations de la commande par mode glissant flu



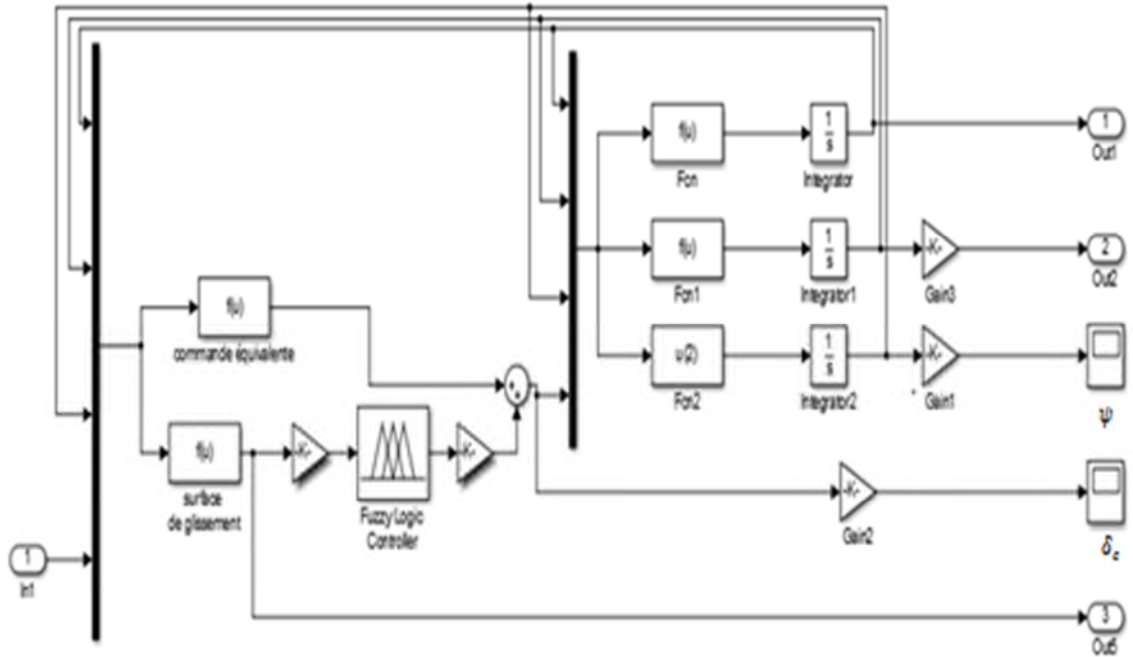
B.7 L'éditeur du système d'inférence flu



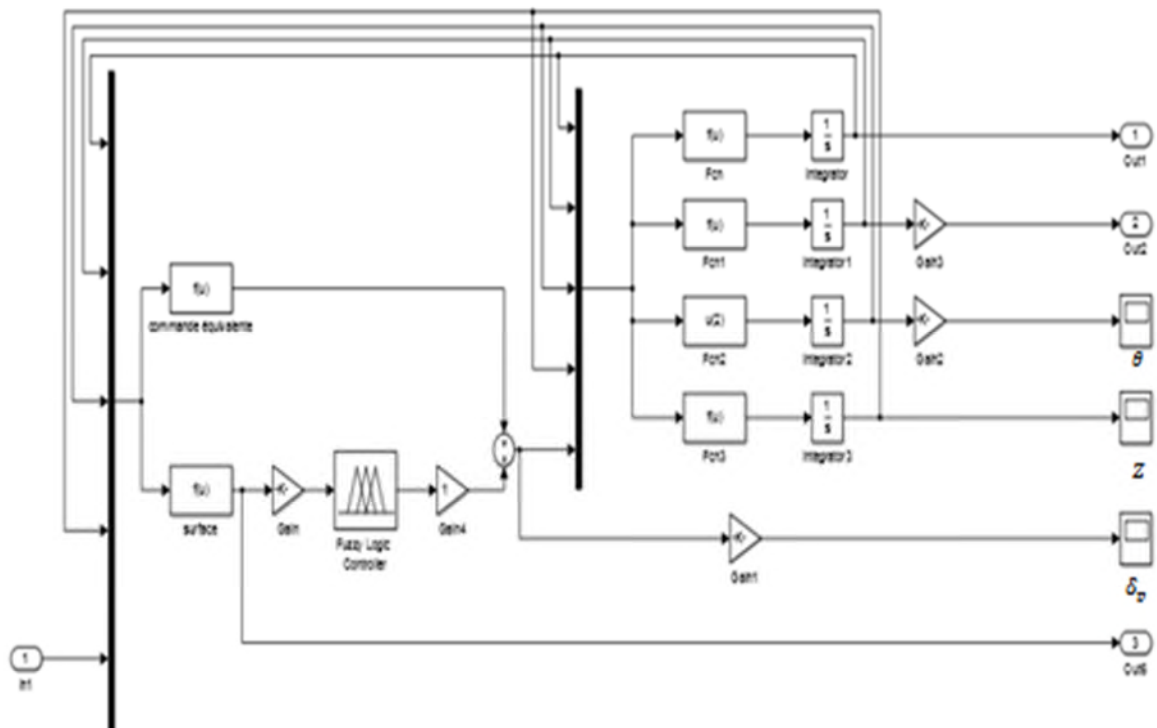
B.8 L'éditeur Des fonctions d'appartenances (entrée/sortie)



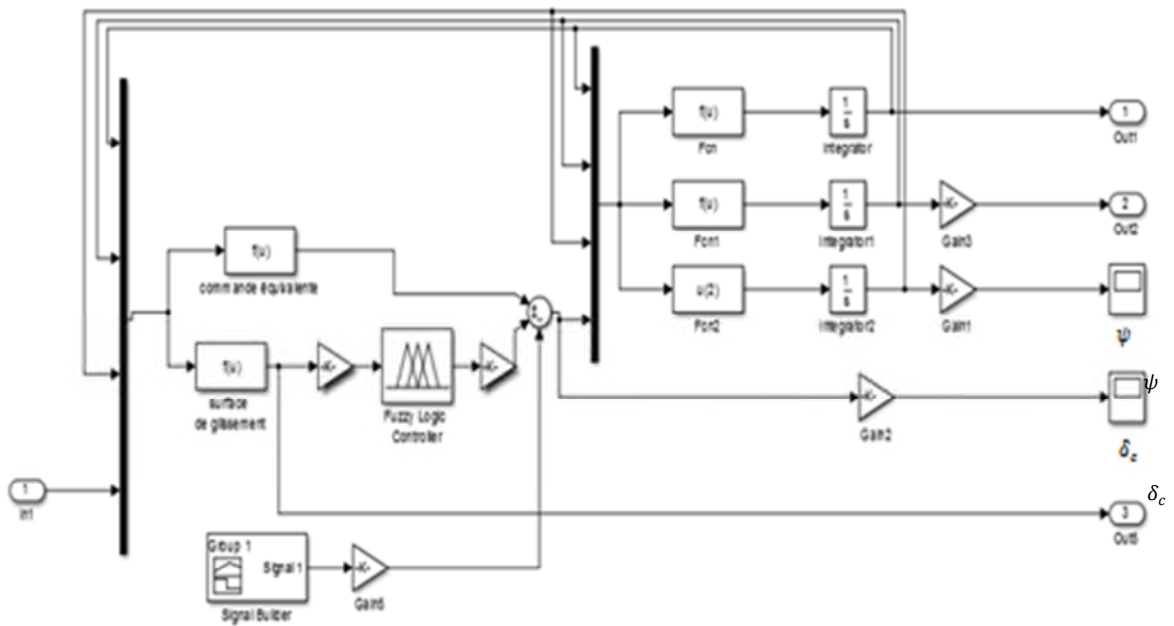
B.9 l'éditeur des règles



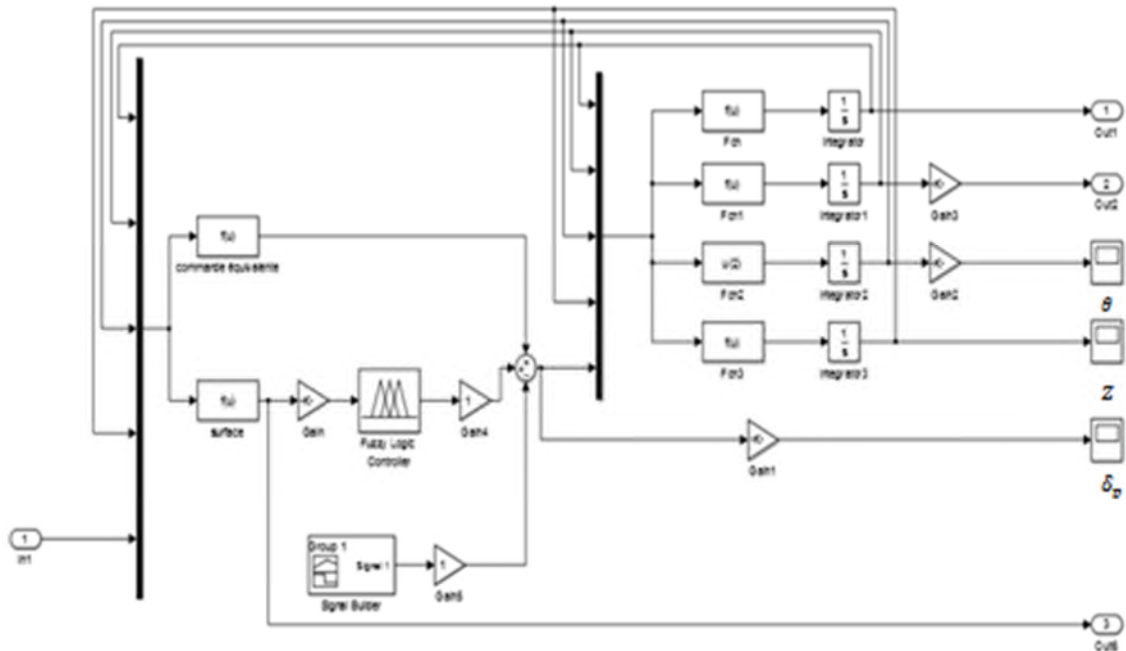
B.10 Fichier simulink de la commande par mode glissant flou dans le plan horizontal sans bruit.



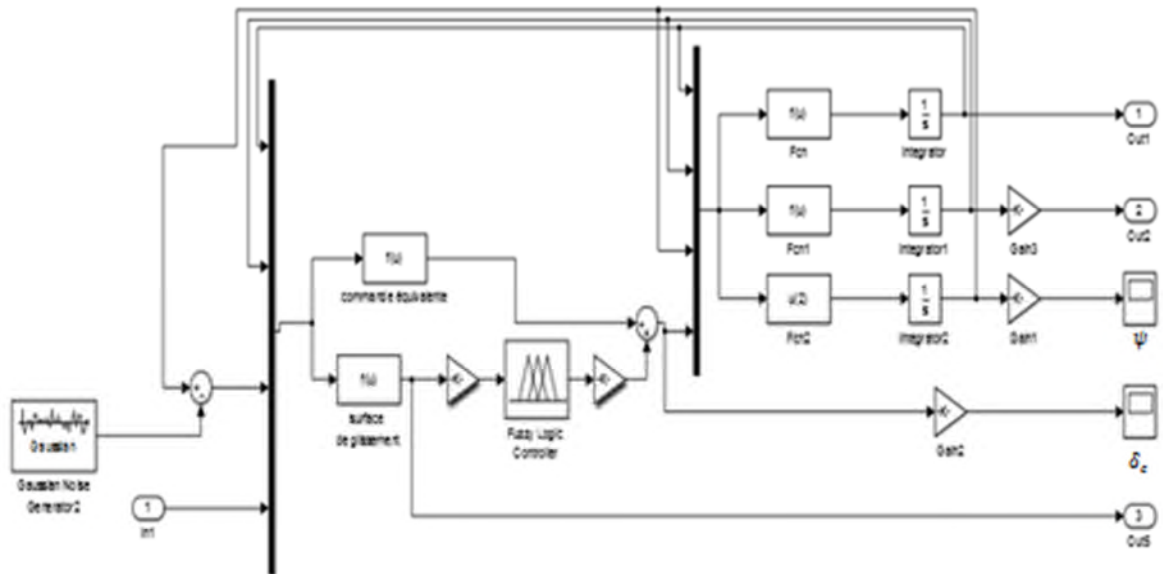
B.11 Fichier simulink de la commande par mode glissant flou dans le plan vertical sans bruit



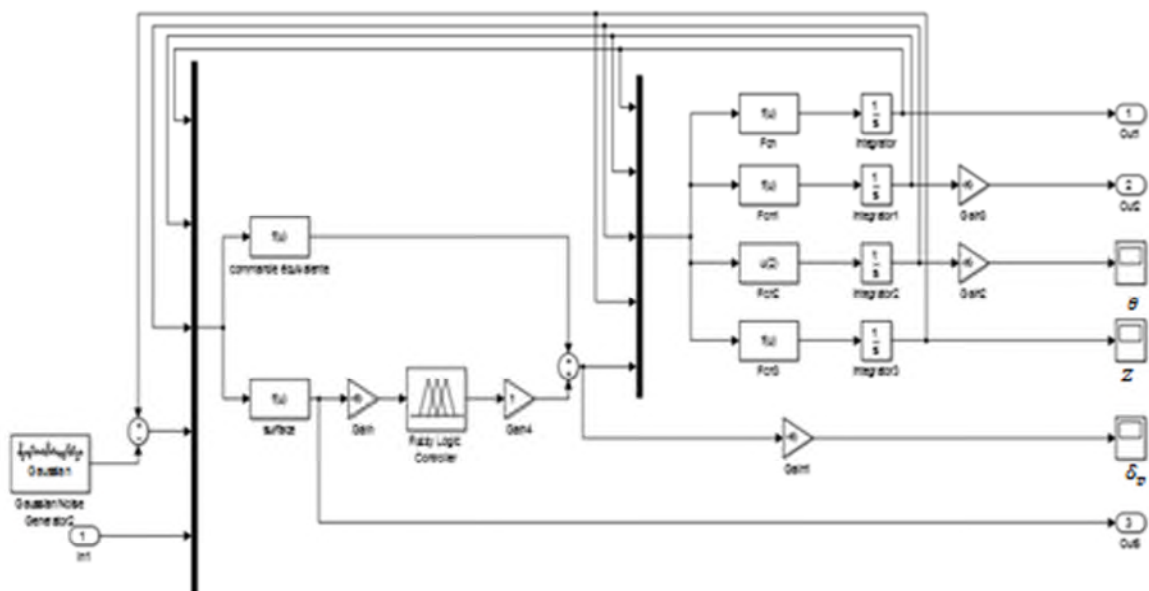
B.12 Fichier simulink de la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.



B.13 Fichier simulink de la commande par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan vertical.

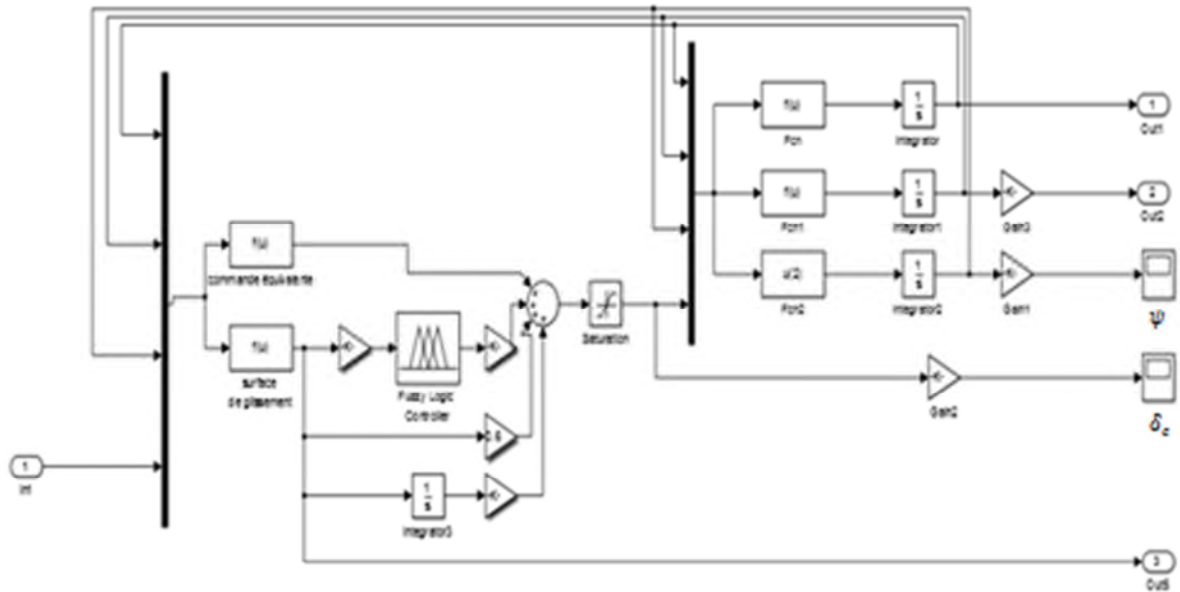


B.14 Fichier simulink de la commande par mode glissant flou avec bruit sur les capteurs dans le plan horizontal.

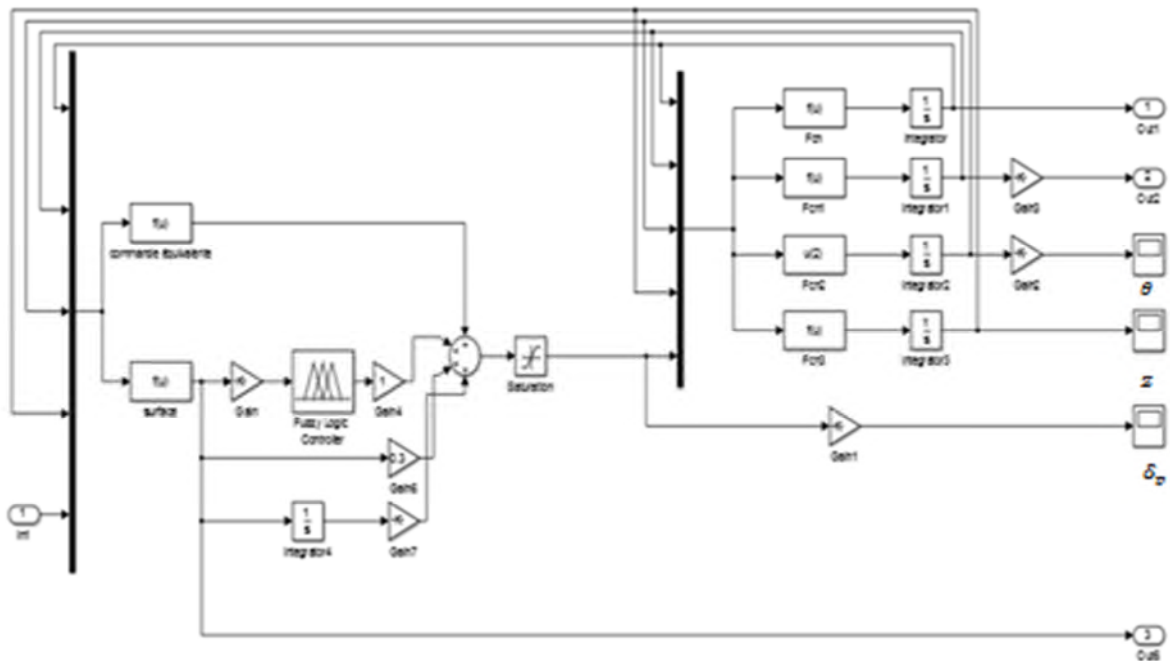


B.15 Fichier simulink de la commande par mode glissant flou avec bruit sur les capteurs dans le plan vertical.

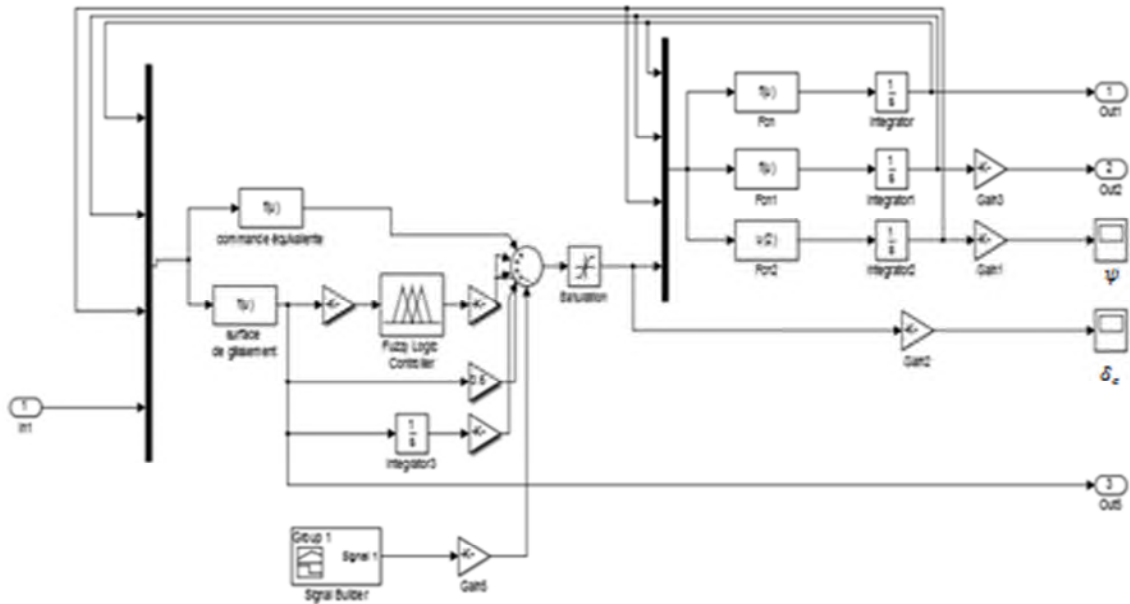
B.3 Résultats des simulations de la commande PI par mode glissant flou



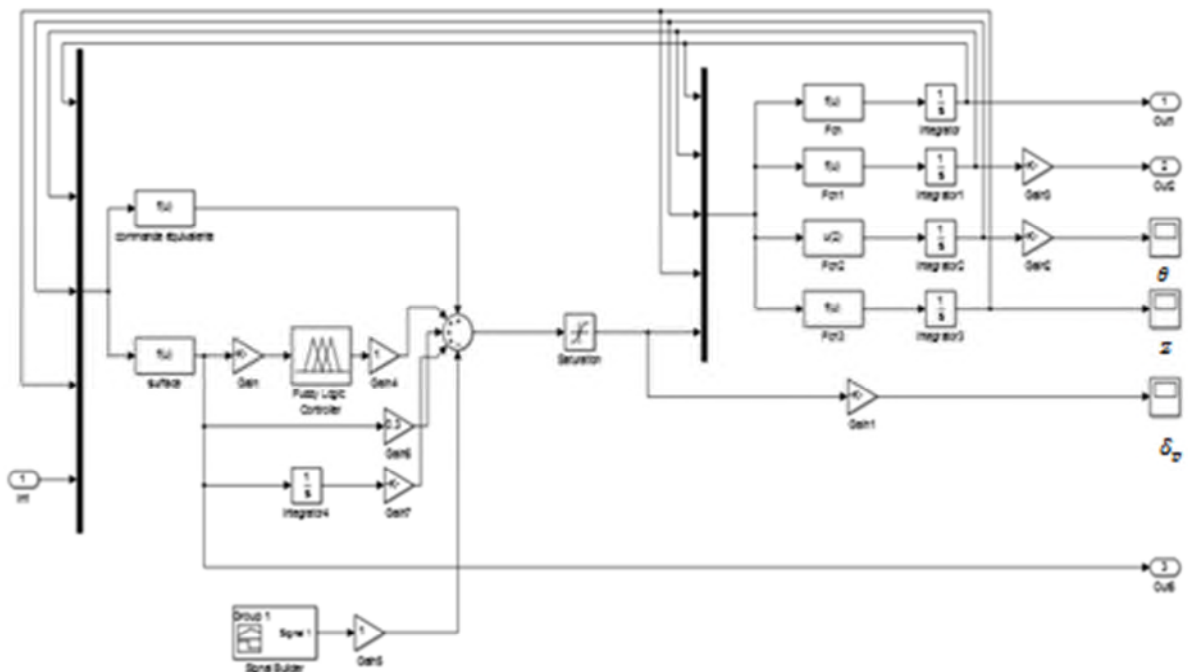
B.16 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant flou dans le plan horizontal.



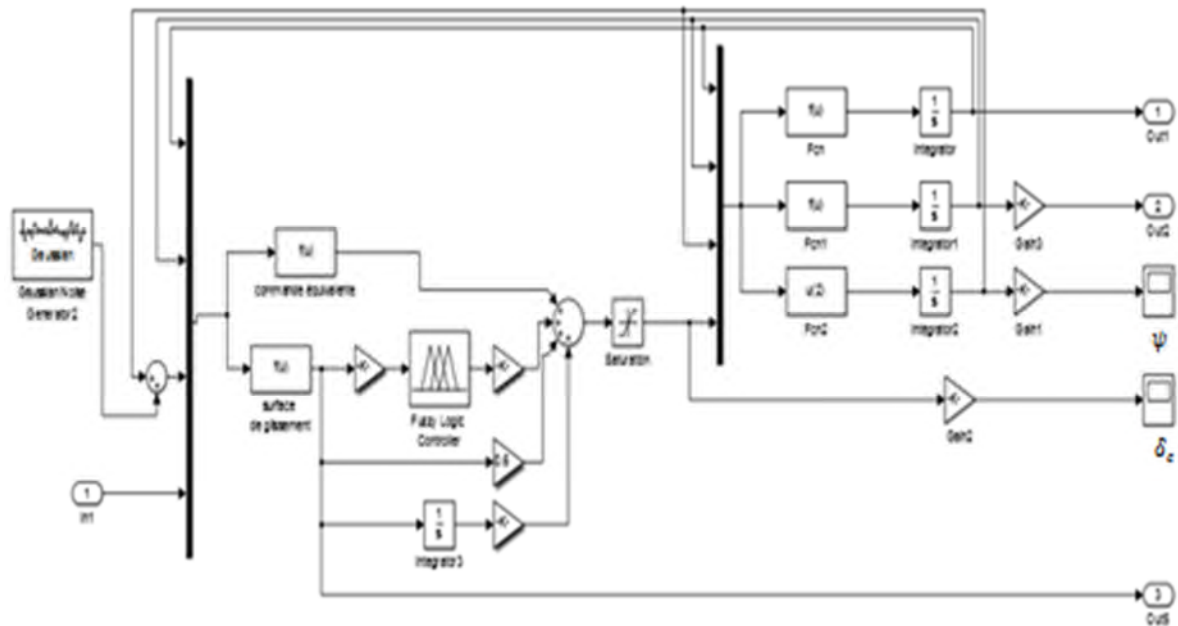
B.17 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant flou dans le plan vertical.



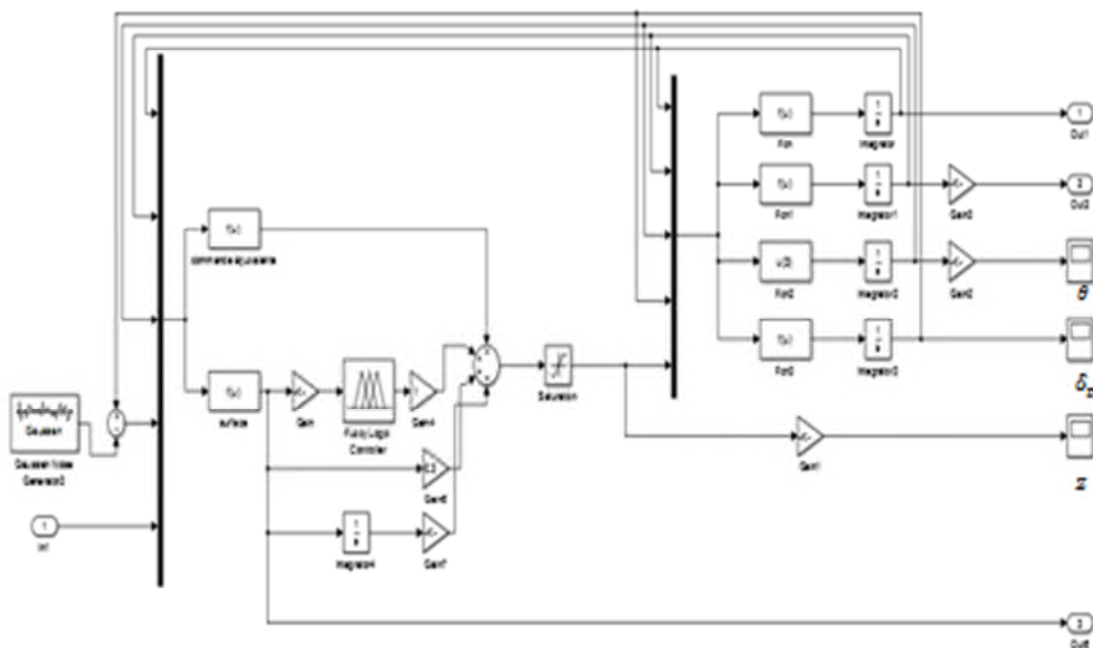
B.18 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.



B.19 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant Flou avec perturbation d'entrée dans le plan horizontal.



B.20 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan horizontal.



B.21 Fichier simulink de la commande PI par mode glissant Flou avec bruits sur les capteurs dans le plan horizontal.

الملخص

تتمحور مذكرة التخرج حول موضوع التحكم في الروبوت تحت المائي عن النظام المنزلق الغامض، قمنا بإنشاء معادلة عامة للحركة الحركية و الديناميكية ، دراستنا تهتم بتطبيق قوانين تحكم شديدة على الروبوت، قمنا بدراسة المراقب المنزلق ، إشارة التحكم المتحصل عليها بالنظام المنزلق تظهر تغيرات عنيفة نتيجة لظاهرة التردد. وللتقليل من آثار هذه الظاهرة قمنا باستعمال التهجين بين المنطق الضبابي و النظام المنزلق. لإظهار النتائج القياسية و فعالية الأنظمة المقترحة قمنا بتنفيذ المحاكاة على الروبوت.

كلمات مفتاحية

التحكم في الروبوتات تحت المائية ، التحكم بالنظام المنزلق ، منطق ضبابي الي تحت الماء.

Résumé

Ce travail de fin d'études aborde le sujet de la commande par mode glissant flou d'un Robot sous-marin autonome. Nous avons établi une équation générale du mouvement cinématique et dynamique du robot. Notre étude s'intéresse dans l'application des lois de commande robuste pour un engin sous-marin autonome. Nous avons étudiés le contrôleur par mode glissant (SMC). Le signal de commande obtenu par le SMC, présente des variations brusques dues au phénomène de broutement. Afin de réduire les effets de broutement, nous avons utilisé une hybridation, entre la logique floue et le mode glissant. Différentes simulations ont été effectuées pour montrer la performance et l'efficacité des méthodes proposées.

Mot-clé : Commande des AUV's, Commande en Mode Glissant, Logique Floue Robotique mobile sous-marine.