



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT de GÉNIE ÉLECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Electrique

Option : Automatisation et contrôle du système industriel

Présenté par :

Mr : Meftah Mokhtar

Mr : Guerifid Belgacem

Sujet du mémoire

COMMANDE BACKSTEPPING D'UN
ROBOT SOUS-MARIN AUTONOME

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Me, Ogab Chahrazed
Mr, Hattab Abdellilah
Mr, Aced Mohammed Redha

Président
Rapporteur
Examineur

PROMOTION : 2015

Dédicace

*Avant tous, Nous remercions dieu le tout puissant de
m' avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail
Malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Nous dédions ce modeste travail :

À mes très chers parents,

À mes frères

À toutes ma famille

À toutes mes amis.

Meftah Mokhtar. & Guerifid Belgacem .

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr. Hattab abdellilah d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nos remercions également les membres du jury qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble des enseignants et nos collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

Meftah . Belgacem

Table des Matières

Introduction générale	1
1. Présentation des Véhicule sous-marins autonome AUV	3
1.1. Histoire des véhicules sous-marins	3
1.2. Application des véhicules sous-marins	4
1.3. Classification des engins sous-marins	5
1.3.1. Véhicules habités	5
1.3.2. Véhicules non-habités	6
1.3.2.1. Les poissons remorqués	6
1.3.2.2. Les ROV	7
1.3.2.3. Les AUV	8
1.3.2.4. Les UUV	9
1.3.2.5. Résumé des véhicules non-habités	9
1.4. Etat de l'art des AUV's	10
1.4.1. Actionneurs hydrodynamiques	10
1.4.2. Formes des véhiules autonomes Sous-marins	13
1.4.3. Classification des véhicules sous-marins autonomes AUV	14
1.4.3.1. Les AUVs grands fonds	14
1.4.3.2. Les AUVs côtiers	15
1.5. Conclusion	16
2. Modélisation de Robot sous-marin autonome de type torpille	19

AUV

2.1. Modélisation générale du véhicule sous-marin autonome	19
2.1.1. Conventions et hypothèses de base	19
2.1.2. Modèle Cinématique	21
2.1.3. Equation dynamique	24
2.1.3.1. Dynamique d'un corps rigide	24
2.1.4. Les efforts hydrodynamiques	27

2.1.4.1. Inertie et la masse d'eau ajoutées	27
2.1.5. Forces d'amortissement	29
2.1.6. Gravité et Flottabilité	30
2.1.7. Actionneurs hydrodynamiques	31
2.1.8. Perturbations	35
2.1.9. Relation générale de la dynamique	36
2.2. Modélisation du robot sous-marin autonome H160	37
2.2.1. Cinématique	38
2.2.2. Dynamique	38
2.2.2.1. Dynamique d'un corps rigide	38
2.2.2.2. Forces et moments extérieurs	39
2.2.2.3. Equations sans dimension	41
2.2.3. Découplage	45
2.2.4. Modèle en immersion	45
2.2.5. Modèle en Cap	47
3. Commande par backstepping du Robot sous-marin autonome	49
3.1. Introduction	49
3.2. Principe	49
3.3. Méthodes de lyapunov	49
3.3.1. Première méthode de lyapunov	50
3.3.2. Deuxième méthode de lyapunov	50
3.4. Méthode général de synthèse récursive par backstepping	50
3.5. Application à la commande d'un robot sous-marin autonome	55
3.5.1. La loi de commande en cap	55
3.5.2. la Loi de commande en immersion	58
3.6. Résultat de simulation	63
3.6.1. Simulation sans bruit	63
3.6.1.1. Cap du véhicule	64
3.6.1.2. Immersion du véhicule	66
3.6.2. Simulation avec bruit	69
3.6.2.1. Cap du véhicule	69
3.6.2.2. Immersion du véhicule	71

Conclusion général	75
Bibliographie	77
A Description du robot sous-marin autonome de type torpille H160	80
A.1 Description du robot	80
B Paramètres du robot sous-marin autonome de type torpille H160	83
B.1 Paramètres géométriques	83
B.2 Paramètres inertiels I_0	83
B.3 Calcul des paramètres hydrodynamiques	84
B.4. Modèles Numériques	86
B.2.1. Modèle en cap	86
B.2.2. Modèle en immersion	86
C. block de simulation	87
C.1 Blocs de la simulation de la commande par backstepping de la torpille	87
C.2 Commande backstepping	87
C.3 Système AUV	88

Introduction Générale

Si aujourd'hui traverser les océans peut s'effectuer sans peine, il n'en est 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 aux 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 de 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 les robots sous-marins télé opérés qui se caractérisent par un câble les reliant à un bateau en surface. Les véhicules sous-marins autonomes, quant à eux, ne nécessitent pas l'intervention d'un opérateur pour accomplir leur mission. Autonomes d'un point de vue énergétique et décisionnel, ils n'auront pas la même structure suivant qu'ils sont destinés à explorer les grands fonds ou à évoluer dans des zones proches de la cote. Le champ d'applications 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 et de l'exploitation des ressources énergétiques. Les communications sous-marines via des câbles ou le transport d'hydrocarbures (gaz, pétrole, . . .) par des pipelines génèrent de nouveaux besoins : la cartographie des fonds pour la pose des câbles ou 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 de véhicules sous-marins posent certaines difficultés. Les développements technologiques et scientifiques concernant ces robots sont récents, mais l'intérêt qu'ils suscitent se heurte encore aujourd'hui à des verrous scientifiques importants. Concernant les véhicules sous-marins autonomes, on peut définir quatre grandes problématiques. En premier lieu, l'énergie qu'ils sont capables d'embarquer reste faible au regard des distances à parcourir. En second lieu, le véhicule doit aussi être autonome du point de vue décisionnel et c'est là une des préoccupations majeures de plusieurs communautés de chercheurs. Un troisième point concerne le positionnement de l'engin. Le positionnement par balises acoustiques, ainsi que le recalage par système GPS sont des verrous technologiques se heurtant à la difficulté de communiquer sous l'eau. Enfin, certaines équipes de recherche se tournent vers la problématique de la navigation. Elles travaillent essentiellement sur les aspects de la modélisation, du contrôle et de la génération et du suivi de trajectoires.

Ce projet de fin d'études traite le problème général de la commande d'un Robot sous-marin autonome de type torpille. Il présente les techniques de commande backstepping, lois très adéquates pour le contrôle de ce type de système, le contenu de ce mémoire est le suivant :

- Dans le chapitre 1 nous donnons une classification des véhicules sous-marins afin de mieux situer notre étude. Finalement nous présentons un état de l'art des véhicules sous-marins.
- Le chapitre 2 nous permet de définir une équation générale du mouvement du véhicule sous-marin. Puis nous définirons un modèle simplifié de Robot, nous découplons l'immersion et le cap, afin d'obtenir une modélisation dans chaque plan.
- Dans le chapitre 3 nous développons une stratégie de commande backstepping et nous présentons les résultats des simulations avec cette commande, décrites dans la section précédente. Ces simulations sont faites en utilisant le modèle mathématique dans les deux plans du robot sous-marin autonome.
- Dans les annexes nous listons les paramètres du modèle mathématique de l'AUV. Et nous présentons une description de robot sous-marin autonome qui nous avons utilisé de notre mémoire. Ainsi que les blocs de simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK



Chapitre I

Présentation des Robots sous-marin autonome

Etat de l'art



Un véhicule **sous-marin** est un engin totalement autonome capable de se déplacer, dans les trois dimensions, sous la surface de la mer.

1.1. Histoire 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 Ier 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 sas 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.

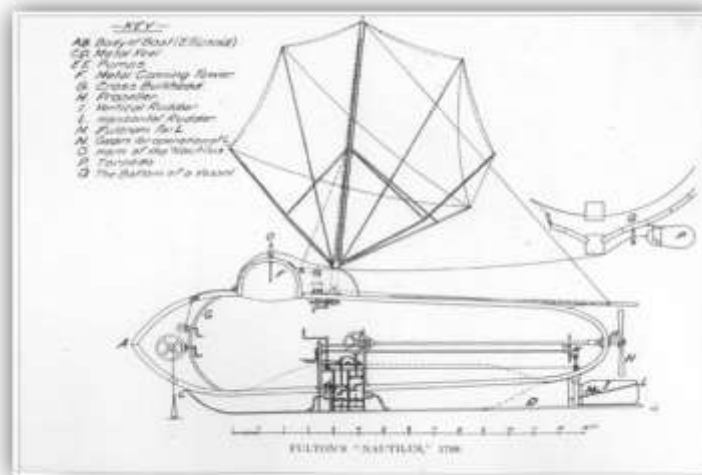


Figure 1.1 : Le Nautilus de Fulton

Le 28 juin 1856, en Espagne, Narcisse Monturiol plonge dans le port de Barcelone pour effectuer les premiers essais de l'*Ictíneo*, 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.

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 Laubeuf 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. Application des véhicules sous-marins

Les applications des drones sous-marins sont potentiellement très vastes. Elles vont de l'archéologie sous-marine, à la recherche géophysique et bio marine des profondeurs en passant par les applications dans les domaines de la recherche et de l'exploitation des ressources énergétiques. Les communications sous-marines via des câbles ou le transport de fluides (gaz, pétrole,...) par des pipelines, génèrent de nouveaux besoins : la cartographie des

fonds pour la pose des câbles ou des pipelines [01], mais aussi l'inspection de ces structures [02- 05]. On peut citer d'autres utilisations de ces engins comme l'inspection des réacteurs nucléaires [06], la mesure des pollutions sous la mer [07]. et les applications militaires comme par exemple la détection [08] et la destruction des mines ou encore la simple surveillance [09].

1.3. Classification des engins sous-marins

Il existe plusieurs types d'engins sous-marins [10,11] ont proposé une classification des véhicules sous-marins en considérant deux grands groupes :

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

Véhicules Non-Habités engin sous-marin non-habité (Unmanned Vehicles, en anglais).

1.3.1. Véhicules habités

Ces véhicules nous sont les plus familiers du fait qu'ils ont été les premiers à être conçus. On distingue deux catégories :

- 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'exploitation des grandes profondeurs. L'équipage de ce type d'engin est très réduit et ne peut résider longtemps dans ce véhicule.

Dans cette section nous donnons quelques exemples de submersibles (deux ou trois passagers) qui sont utilisés dans un cadre industriel ou scientifique.

Alvin : est le premier sous-marin léger de grande profondeur financé par la Marine américaine. Il a été mis à l'eau le 4 août 1964. Il peut plonger jusqu'à 4500 mètres. Il emporte 1 pilote et 2 scientifiques. En 1974 l'Alvin a découvert des sources hydrothermales et a permis de mettre en évidence l'existence d'une forme de vie autour de ces sources. Il a permis aussi de découvrir les premiers fumeurs volcaniques. La Figure 1.2(a), montre une photo de l'engin Alvin.

Mir : En décembre 1987, deux sous-marins habités, Mirs 1 et 2, sont livrés par la Finlande à l'URSS. Ils peuvent plonger jusqu'à 6000 m avec trois membres d'équipage (voir Figure 1.2 (b)). Trois principales expéditions seront réalisées avec ces appareils. La première est la

recherche de sources hydrothermales, le voyage d'exploration sur le Titanic et finalement l'expédition sur l'épave du sous-marin nucléaire Komsomolets.



Alvin, USA (a)



Mir, URSS (b)



Nautilus, FRANCE (c)

Figure 1.2 : Exemples des véhicules habités

Nautilus : Il a été conçu par l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) en 1984, il peut plonger jusqu'à 6000 m, avec trois passagers (voir Figure 1.2 (c)). Ses principales missions ont été la recherche des sources hydrothermales dans le Pacifique, les missions sur le Titanic et les interventions sur l'épave du Prestige.

1.3.2. Véhicules non-habités

Ce sont des véhicules qui se déclinent en plusieurs sous-catégories qui vont du simple engin tracté par un bateau à des véhicules totalement autonomes [10,12]. On les distingue par le degré d'autonomie tant énergétique que décisionnelle et par le fait qu'ils sont reliés à un engin de surface ou non et si un opérateur intervient dans la boucle de commande. Ces systèmes sont classifiés en quatre groupes : Les poissons remorqués, les véhicules télé-opérés, véhicules autonomes sous-marins et les UUV's. Ensuite nous parlerons de leurs caractéristiques principales.

1.3.2.1. Les poissons remorqués

Dénommés « Tow Fish » en anglais, il s'agit d'engins remorqués par un bateau grâce à un câble. Ce dernier transmet l'énergie et remonte les données vers l'utilisateur. La principale application des poissons remorqués est la cartographie sous-marine à partir d'images acoustiques, prises à l'aide d'un sonar latéral. Figure 1.3.



Figure 1.3 : Poisson remorqué commercial d'Edge Tech Marine, USA

1.3.2.2. Les ROV

Véhicules télé-opérés par un opérateur humain « Remotely Operated Vehicles » dans la littérature anglo-saxonne, ils sont reliés à la surface par un câble, par lequel sont transmis les commandes, l'énergie et les mesures des capteurs. Ils ont été introduits dans les années 70 et ont connu une forte croissance dans les années 90. Ils sont utilisés pour des missions d'intervention et d'inspection. La mission est limitée pour la longueur du câble appelé ombilical, ils se déplacent à faibles vitesses et avec une précision plus ou moins importante. Une photo d'un ROV est donnée sur la Figure (1.4).

Les principales caractéristiques des ROV's sont les suivantes [13] :

- Intégration d'un grand nombre d'actionneur, le rendant omnidirectionnel
- Ils peuvent réaliser un point fixe
- Manutention simple d'un véhicule compact
- Présence de cordon ombilical (câble de transmission et d'alimentation)

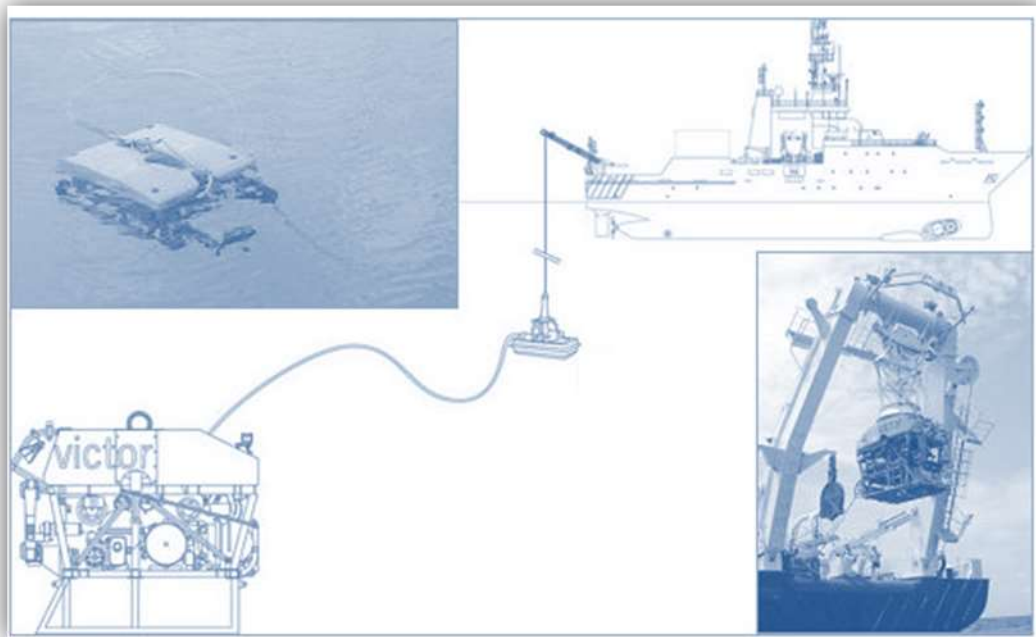


Figure 1.4 : Système ROV

1.3.2.3. Les AUV

Véhicule sous-marin autonome est un engin totalement autonome et capable (grâce à des capteurs et à un ordinateur embarqué) de déterminer sa position et de naviguer vers un objectif spécifique, « *Autonomous Underwater Vehicle* » dans la littérature anglo-saxonne. Ses principales applications sont l'exploration, le recueil de données et la surveillance. Les buts de leur mission sont donnés initialement par un opérateur. Ces véhicules sont réalisés pour effectuer des déplacements sur de longues distances, ils ont donc une forme fuselée qui minimise les effets de la résistance du fluide au déplacement, ce qui leur confère une direction d'évolution privilégiée. Un robot AUV est représenté sur la Figure (1.5), une liste détaillée des principaux engins sous-marins existant dans le monde est donnée dans [14].

Les caractéristiques de ces véhicules sont les suivantes :

- Hétérogénéité possible des actionneurs et leur nombre réduit
- Il existe un axe de déplacement privilégié
- Equipements nombreux (capteurs, ordinateurs, etc.)
- Véhicule libre (pas de lien physique avec l'extérieur)

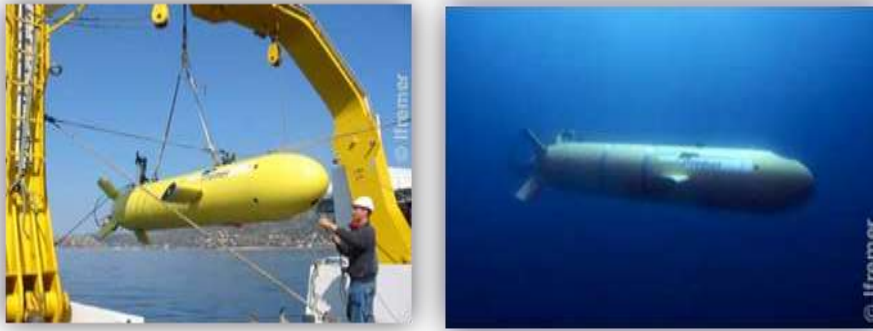


Figure 1.5 : Système AUV

1.3.2.4. Les UUV

Ce sont des véhicules très proches dans leur conception et leur équipement à ceux des AUV. La différence essentielle réside dans le fait qu'un opérateur intervient dans la boucle de commande du véhicule qui peut malgré, tout être en mesure de réaliser des tâches en mode robot. Ils sont utilisés pour l'intervention et l'inspection.

Ses caractéristiques sont [11] :

- Existence d'un lien acoustique entre la surface et l'engin, permettant la vérification et l'échange de données.
- Télé-opération depuis la surface par un opérateur.

Un exemple d'un système UUV (Untethered Underwater Vehicle, dans la littérature anglo-saxonne) est le robot Alistar d'ECA, France (Figure 1.6).

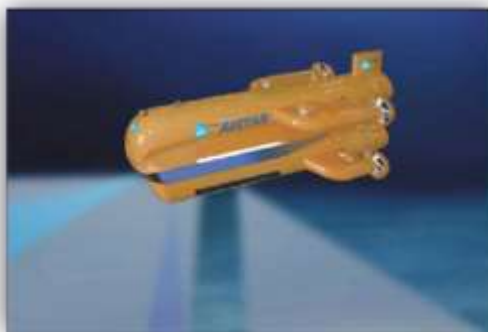


Figure 1.6 : Système UUV

1.3.2.5. 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 [11].

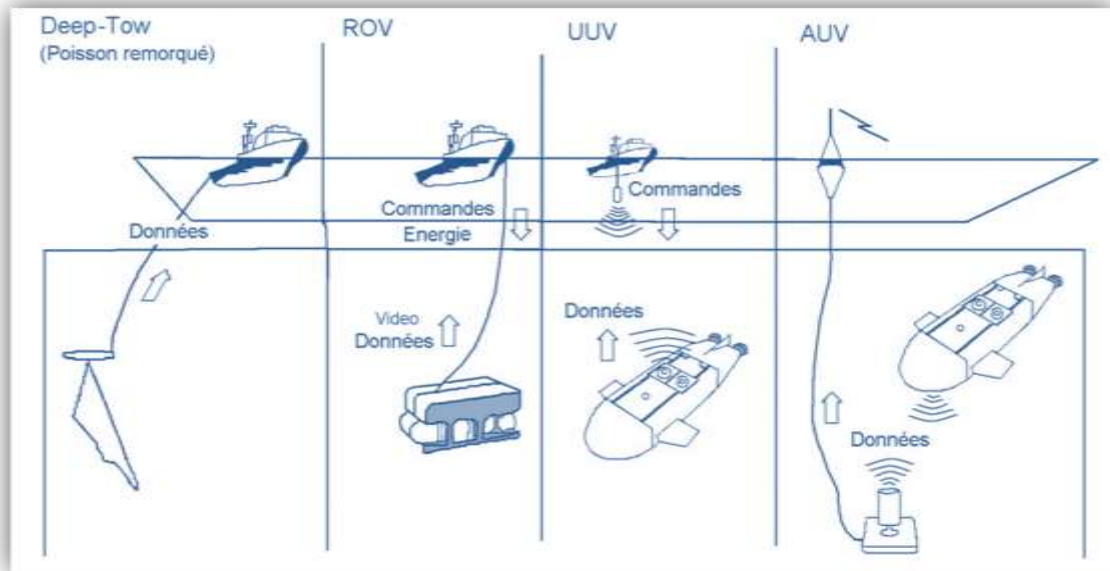


Figure 1.7 : Résumé des véhicules non-habités

1.4. Etat de l'art des AUV's

Nous allons parler de quelques caractéristiques supplémentaires des véhicules autonomes sous-marins. Ils sont de forme allongée que les permet d'avoir une meilleure pénétration dans l'eau, avec un ou deux propulseurs à l'arrière. Ils ont des actionneurs (surfaces mobiles, propulseurs, etc.) qui vont leur permettre de plonger et de changer de cap. Nous présenterons quelques propriétés des actionneurs et des formes utilisés par les AUV, car ils ont une influence directe sur la commande du système.

1.4.1. Actionneurs hydrodynamiques

Un actionneur hydrodynamique est un dispositif physique commandable qui permet d'agir sur l'état cinématique du véhicule. Ensuite nous décrirons de façon simplifiée les actionneurs hydrodynamiques que nous pouvons répartir en deux groupes [15].

1. Le groupe de ceux qui agissent par modification des caractéristiques d'un écoulement préalablement existant.
 - **Surfaces mobiles :** Toute surface en écoulement et en incidence par rapport à un fluide visqueux en mouvement est soumise à une force de portance orthogonale à la surface et une force de traînée parallèle à cette surface. Elles ont une faible

consommation d'énergie, mais afin de pouvoir agir, elles ont besoin que le robot soit en mouvement. Une photographie des surfaces mobiles est montrée dans la Figure 1.8.



Figure 1.8 : Surfaces mobiles de l'AUV Odyssey, MIT Etats-Unis.

Les surfaces mobiles sont appelées aussi *gouvernes*. Pour plus de détails sur ces actionneurs voir [16, 13].

2. Le groupe de ceux qui génèrent l'écoulement du fluide pouvant être initialement au repos, et généralement dénommé *propulseurs*. Il existe une grande variété de propulseurs, on citera les actionneurs suivants.
- **Les propulseurs à hélice** : Ils utilisent des pales fixes sur un arbre en rotation. Ils sont versatiles et très utilisés pour le déplacement des véhicules (voir Figure 1.9) [17-19].



Figure 1.9 : Propulseur à hélice

- **Les propulseurs magnéto hydrodynamiques** : Ils utilisent les propriétés de conductivité de l'eau de mer due à la présence de sels dissous. Ce moteur est basé sur un principe d'électromagnétisme assez simple : la loi de Laplace prévoit que lorsqu'un champ magnétique \mathbf{B} est disposé perpendiculairement à un courant électrique \mathbf{I} , l'interaction entre ce courant et ce champ donne naissance à une force électromagnétique \mathbf{F} , (voir Figure 1.10).

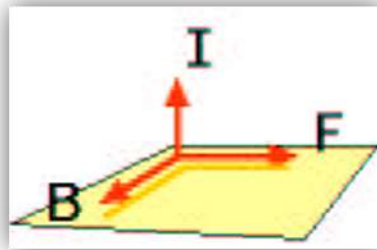


Figure 1.10 : La loi de Laplace

Les propulseurs magnéto hydrodynamiques ont besoin de moins de maintenance du fait qu'ils n'ont pas des composants mobiles. Ils sont actuellement à l'étude.

- **Les propulseurs par aile battante** : Ils fonctionnent sur l'un des principes de propulsion les plus anciens au monde, utilisé en particulier par les poissons, une aile est soumise à un mouvement couplé alternatif de translation et de rotation, la Figure 1.11 laisse voir ce principe. Ces systèmes permettent d'obtenir une propulsion plus grande avec moins d'effort. Quelques références bibliographiques de ces propulseurs sont [20, 21].



Figure 1.11 : Propulsion par aile battante

Tous les actionneurs ont leurs propres caractéristiques et ils sont utilisés en fonction du travail particulier à réaliser. Par exemple les ROV's utilisent les propulseurs à hélice afin de réaliser des travaux de placement et de positionnement. Dans ce cas il n'existe pas le problème énergétique du fait que l'énergie est fournie depuis la surface par un câble. Pour le cas des AUV's, plusieurs configurations sont possibles en fonction de leur forme et de l'application.

1.4.2. Formes des véhicules autonomes Sous-marins

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

- Forme cylindrique (Figure 1.12 (a)) ; ils sont pourvus d'un unique propulseur arrière, d'un gouvernail et de deux paires de barres de plongée horizontales situées à l'arrière, ou à l'arrière et l'avant.
- Forme parallélépipédique (Figure 1.12 (b)), ils possèdent deux propulseurs à l'arrière, et deux paires de surfaces mobiles situées à l'arrière et à l'avant, pour contrôler la plongée. Pour le changement dans le plan horizontal (cap), il existe deux possibilités.
 - ✓ Deux propulseurs latéraux un en avant et un autre en arrière.
 - ✓ Une ou deux paires de surfaces mobiles.
- Forme ellipsoïdale (Figure 1.12 (c)), 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.

Il faut remarquer que les formes précédentes vont influencer le mouvement du véhicule sous l'eau, surtout pour les manœuvres ou les AUV's n'utilisent pas leurs axes de déplacement privilégiés, tels que les trajectoires circulaires pour tourner. Dans le modèle mathématique, les paramètres qui vont changer par rapport aux formes sont les paramètres dits de masse ajoutée, de Coriolis et des forces d'amortissement (soit les matrices M_a , C_a et D , du modèle mathématique).

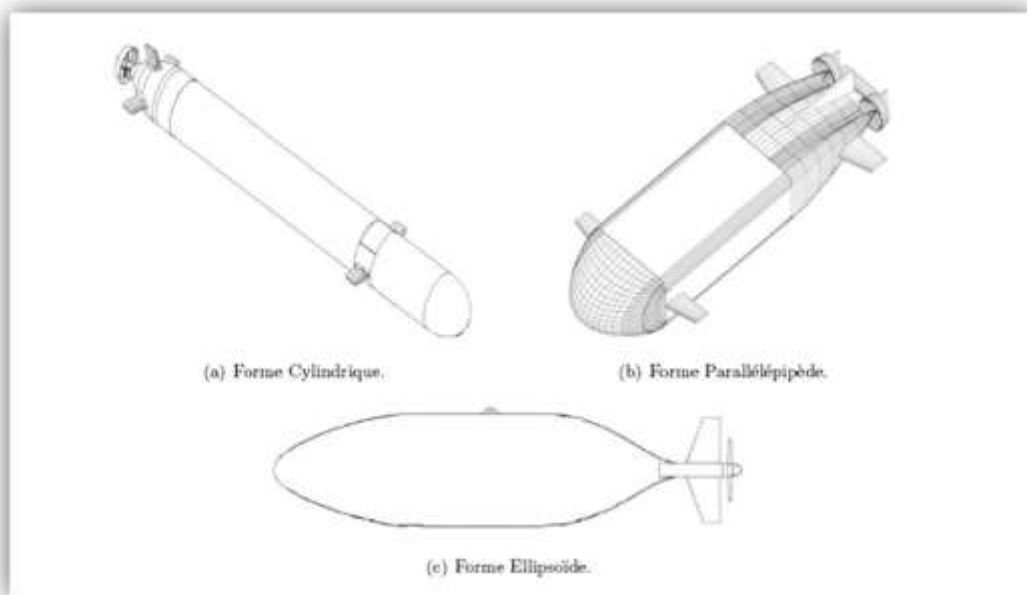


Figure 1.12 : Formes des AUV's avec un axe de déplacement privilégié

1.4.3. Classification des véhicules sous-marins autonomes AUV

Les véhicules sous-marins autonomes 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.

1.4.3.1. 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 Kongsberg Simrad (Norvège), l'Alistar 3000 d'Eca (France) et le véhicule Urashima de Jamstec (Japon) (Fig. 1.13).



(a) Hugin 3000, Norvège



(b) Alistar 3000, France



(c) Urashima, Japon

Figure. 1.13 : Photos d'AUVs grands fonds

	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 (nœuds)	4	4	4

aTableau 1.1 : Caractéristiques et performances des AUVs grands fonds

1.4.3.2. 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'Hydroid, le Gavia (Finlande) d'Hyfmind et le H160 (France) (Fig. 1.14) sont donnés à titre d'exemple dans le tableau 1.2.



(a) Remus, USA



(b) H160, France



(c) Gavia, Finlande

Figure 1.14 : Photos d'AUVs côtiers

	Remus	Gavia	H160
Longueur (m)	1.60	1.70	1.80
Diamètre (m)	0.19	0.20	0.20
Poids (kg)	37	44	57
Profondeur (m)	100	200	160
Vitesse (nœuds)	4	5	4

Tableau 1.2 : Caractéristiques et performances des AUVs petits fonds

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les véhicules sous-marin autonome, nous avons commencé par les classification des engins sous-marin en général (Figure 1.15), ainsi que les application des AUV dans le domaine industriels, applications militaires, applications scientifiques et l'environnement, nous avons parlé aussi sur la description des véhicules sous-marin autonome AUV.

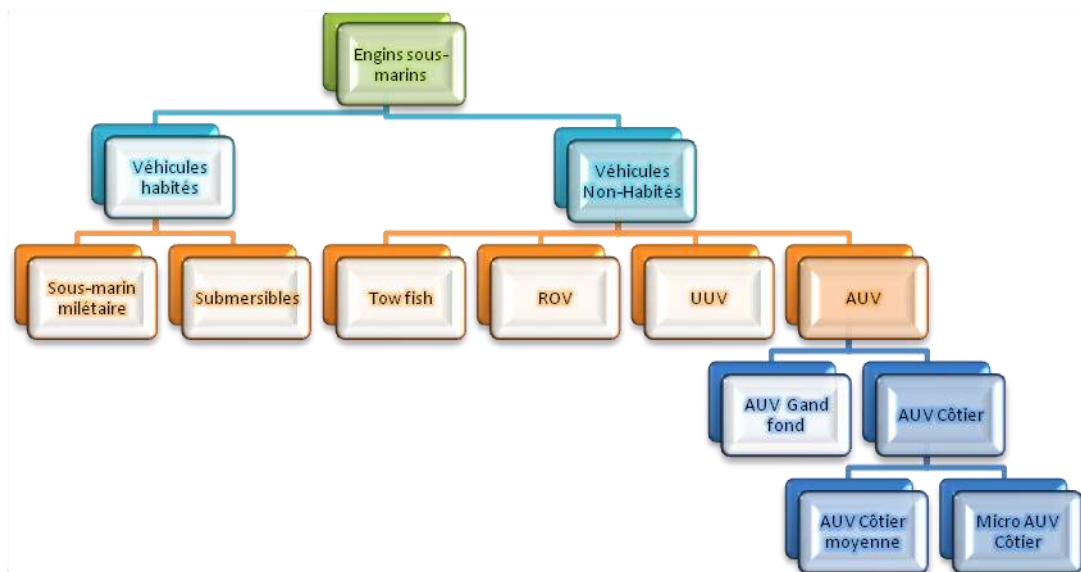


Figure 1.15 : Classification des engins sous-marins

- Micro véhicule sous-marin autonome Micro-AUV, sont des engins de petit taille (longueur : 15 cm, diamètre : 2 cm, poids : 300 g, profondeur : 50 m, vitesse : 3 nœuds) qui sont capable d'entrée et de navigué dans les endroits ou l'homme ne peut pas accéder, tel que les grottes sous-marines [22]. (voir figure 1.16)



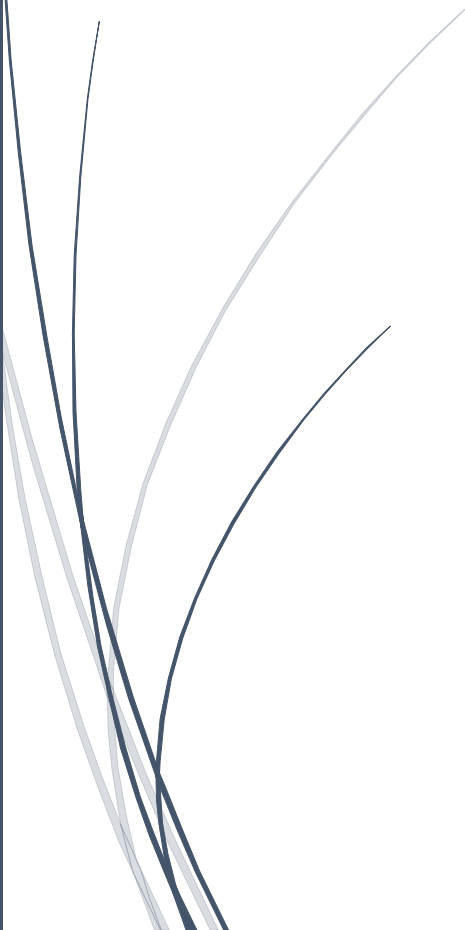
Figure 1.16 : Le Micro AUV « NanoSooker »



Chapitre II

Modélisation du Robot sous-marin autonome

Modèle mathématique



Ce chapitre est principalement consacré à la modélisation d'un véhicule sous-marin autonome de type torpille. Les équations du modèle décrivent les lois qui régissent le comportement du véhicule sous-marin dans l'espace (6 degrés de liberté). Elles modélisent ainsi deux aspects distincts : cinématique et dynamique.

2.1. Modélisation générale du véhicule sous-marin autonome

2.1.1. Conventions et hypothèses de base

Référentiels

La modélisation nécessite l'étape de définir des référentiels par rapport auxquels on décrira l'évolution de l'engin, comme le montre la figure 2.1.

On définit d'abord un repère absolu $R(0, x, y, z)$, 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 $R_v(C, X_v, Y_v, Z_v)$ 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 du haut vers le bas.

Le choix du point d'origine C de ce repère est stratégique. La SNAME¹ propose une méthode pour choisir son emplacement en fonction des caractéristiques géométriques de l'engin [17, 23].

¹ Society of Naval Architects and Marine Engineers

Par exemple, si l'engin comporte des plans de symétrie, le point d'origine C appartient à l'intersection de ces plans de symétrie. Si le centre de gravité ou de flottabilité du véhicule appartient à cette intersection, le point d'origine est confondu avec l'un de ces deux points.

Vocabulaire

Le *centre de gravité* d'un corps correspond au barycentre des particules qui composent le corps en question ; chaque particule étant pondérée par son poids propre. On l'appelle aussi centre de masse.

Le *centre de carène* est défini comme étant le centre de volume d'une carène (partie immergée de la coque d'un bateau), qui correspond au centre de gravité du volume d'eau déplacée. On l'appelle aussi centre de volume.

On peut également parler de *centre de poussée* en relation avec la Poussée d'Archimède.

Par abus de langage, on dit également *centre de flottabilité* en référence au terme anglais « *centre of buoyancy* ».

Dénomination des variables

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

➤ $\eta_1 = [x \quad y \quad z]^T$ les trois composantes de position.

➤ $\eta_2 = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$ 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 :

➤ $v_1 = [u \quad v \quad w]^T$ vitesses linéaires

➤ $v_2 = [p \quad q \quad r]^T$ vitesses angulaires

Ou v_1 est défini par ;

➤ u vitesse d'avancement

➤ v vitesse de glissement

➤ w vitesse de descente

Et v_2 est défini par :

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

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

- $\Gamma_1 = [X \quad Y \quad Z]^T$ les forces
- $\Gamma_2 = [K \quad M \quad N]^T$ les moments

La modélisation des robots 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.

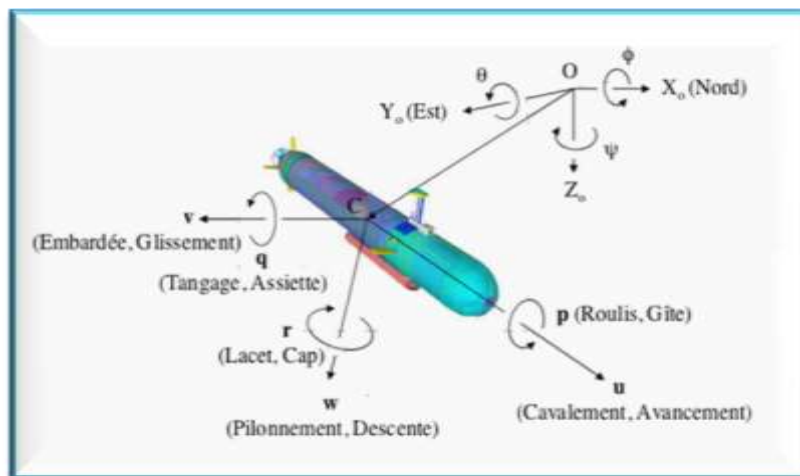


Figure 2.1 : Repères fixe et inertiel, Variables d'état.

2.1.2. Modèle Cinématique

L'orientation est décrite par le vecteur $\eta_2 = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$. Les angles sont définis comme suit ; les trièdres $R(x, y, z)$ et $R(X_v, Y_v, Z_v)$ étant initialement confondus, on passe de R à R_v par trois rotations successives, voir Figure 2.2 :

- Rotation ϕ autour de $0X_1$, angle de roulis (gîte), Figure 2.2 (c).
- Rotation θ autour de $0Y_1$, angle de tangage (assiette), Figure 2.2 (b).

- Rotation ψ autour de $0Z_1$, angle de lacet (cap), Figure 2.2 (a).

Transformation des vitesses linéaires

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

$$\dot{\eta}_1 = J_{c_1}(\eta_2)v_1$$

Ou $J_{c_1}(\eta_2)$ est la matrice de passage de $R(x, y, z)$ à $R_v(X_v, Y_v, Z_v)$, c'est une matrice de rotation orthogonale, de déterminant unité et ayant pour inverse sa transposée.

$$J_{c_1}(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \phi \cos \psi - \sin \psi \cos \phi & \sin \theta \cos \phi \cos \psi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \theta \cos \phi \sin \psi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Transformation des vitesses angulaires

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

$$\dot{\eta}_2 = J_{c_2}(\eta_2)v_2$$

Ou $J_{c_2}(\eta_2)$ est la matrice :

$$J_{c_2}(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \theta \neq \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (2.2)$$

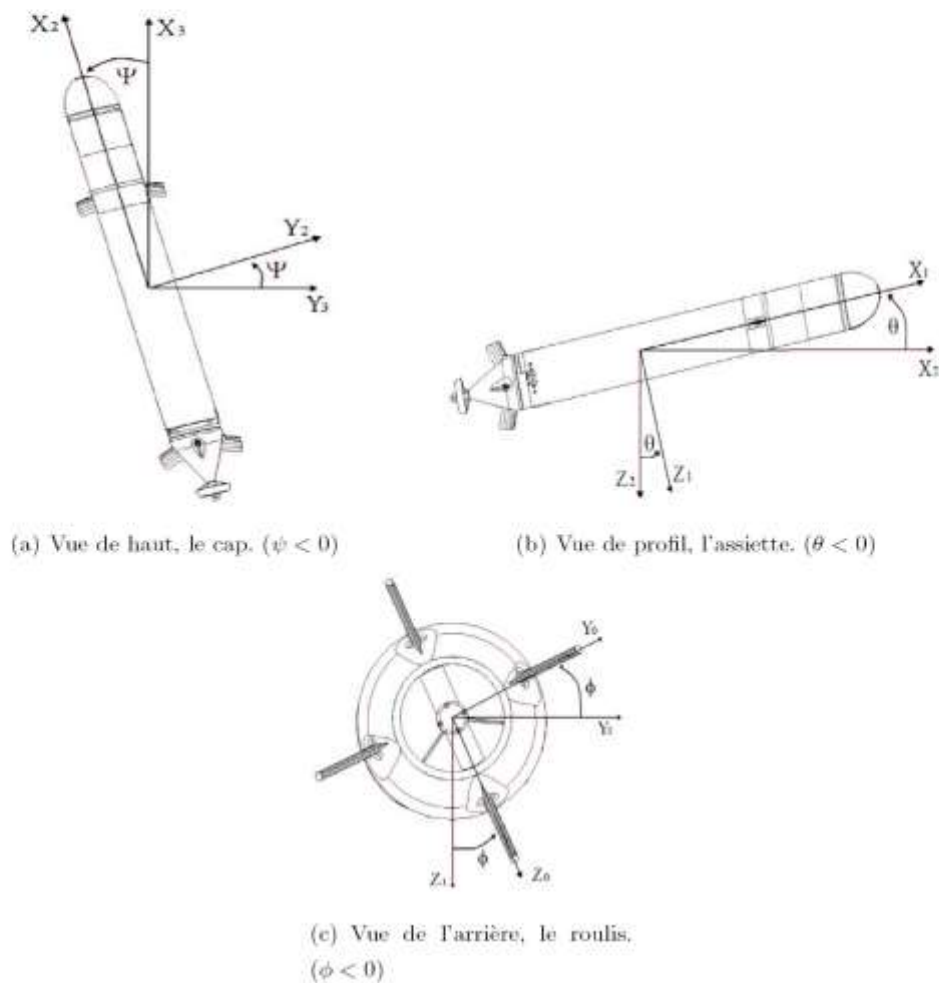


Figure 2.2 : Définition des angles de rotation.

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

$$\dot{\eta} = J_c(\eta_2)v = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{c_1}(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_{c_2}(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

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 $J_{c_1}(\eta_2)$ et $J_{c_2}(\eta_2)$ (3 rotations successives pour passer de R_0 à R_v), il pourra se référer à [24] ou encore à [17].

2.1.3. Equation dynamique

La dynamique d'un véhicule sous-marin consiste dans l'étude des mouvements engendrés par les effets de certaines actions de contrôle comme l'orientation des gouvernes, ou extérieures comme l'action de la houle lorsqu'il navigue au voisinage de la surface, ou encore les courants marins.

2.1.3.1. Dynamique d'un corps rigide

Les équations générales du mouvement d'un solide indéformable à 6 ddl traduisent les mouvements de translation et de rotation de ce solide. Elles sont basées sur le formalisme de Newton et Lagrange et elles sont établies en adoptant les conventions de (SNAME, 1950) [25, 26].

Soit G le centre de gravité du véhicule de coordonnées $\overrightarrow{CG} = [x_G \quad y_G \quad z_G]^T$ dans le repère véhicule, m la masse du véhicule, et $\Gamma_1 = [X \quad Y \quad Z]^T$ et $\Gamma_2 = [K \quad M \quad N]^T$ respectivement les forces et les moments qui s'appliquent sur le véhicule.

On obtient deux séries d'équations :

Equation des forces La dynamique en translation d'un corps rigide se traduit sous la forme suivante :

$$m \left(\dot{v}_1 + v_2 \wedge v_1 + \dot{v}_2 \wedge \overrightarrow{CG} + v_2 \wedge (\dot{v}_2 \wedge \overrightarrow{CG}) \right) = \Gamma_1 \quad (2.4)$$

Equation des moments Soit I_0 la matrice d'inertie du véhicule définie par :

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

Avec, les I_{ii} étant les moments d'inertie et les I_{ij} les produits d'inertie.

La dynamique en rotation d'un corps rigide s'écrit :

$$I_0 \dot{v}_2 + v_2 \wedge (I_0 v_2) + m \overrightarrow{CG} \wedge (\dot{v}_1 + v_2 \wedge v_1) = \Gamma_2 \quad (2.5)$$

Synthèse Si on développe les équations (2.4) et (2.5), on obtient :

$$\begin{aligned}
 m \left[\dot{u} - vr + wq - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q}) \right] &= X \\
 m \left[\dot{v} - wp + ur - y_G (r^2 + p^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (qp + \dot{r}) \right] &= Y \\
 m \left[\dot{w} - uq + vp - z_G (p^2 + q^2) + x_G (rp - \dot{q}) + y_G (rq + \dot{p}) \right] &= Z \\
 I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m \left[y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} - wp + ur) \right] &= K \\
 I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zy} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m \left[z_G (\dot{u} - vr + wq) - x_G (\dot{w} - uq + vp) \right] &= M \\
 I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m \left[x_G (\dot{v} - wp + ur) - y_G (\dot{u} - vr + wq) \right] &= N
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Simplification : La dynamique d'un sous-marin donnée dans (2.6) peut s'exprimer sous le forme [17] :

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

Ou M_{RB} : est la matrice d'inertie due à la dynamique du système, c'est une matrice symétrique qui s'exprime ainsi,

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

C_{RB} : Matrice des forces de Coriolis et des forces centrifuges qui s'appliquent au robot. C'est une matrice antisymétrique de dimension 6×6 et sa représentation est (2.8) :

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\left. \begin{array}{lll} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_{xx}p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}p & 0 \end{array} \right]$$

Ces paramètres sont donnés aux tableaux (B.2) et (B.3) de l'Annexe B.

La quasi-totalité des véhicules sous-marins présentent une symétrie par rapport à leur plan vertical conduisant aux simplifications numériques suivantes :

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

- $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2]^T$ est le vecteur des forces et moments qui s'appliquent sur le véhicule, qui peut être décomposé de la façon suivante :

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

Ou,

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, ...).

2.1.4. 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 dues aux frottements visqueux du fluide sur le corps, qui correspondent aux efforts de portance et de trainée.

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

2.1.4.1. 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 :

$$\Gamma_a = -(M_a \dot{v} + C_a(v)v) \quad (2.9)$$

Où

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

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

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 a deux plans de symétrie, un suivant $(XvYv)$ et l'autre suivant $(XvZv)$, nous avons alors :

$$M_a = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

C_a est la matrice de forces de Coriolis et des forces centrifuges hydrodynamiques, elle peut se mettre sous la forme :

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r$$

$$a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r$$

$$b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r$$

$$b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r$$

Pour une classe de sous-marins destinés à des déplacements à faible vitesse, certains termes (de couplage) deviennent négligeables [17], amenant à la forme suivante :

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Les valeurs numériques des éléments des équations (2.10) et (2.11) se trouvent au Tableau (B.4).

2.1.5. Forces d'amortissement

Portance et Traînée : Ce sont des forces qui s'exercent sur tout corps en incidence par rapport à un fluide visqueux en écoulement. L'angle d'incidence ζ est défini sur la figure 2.3

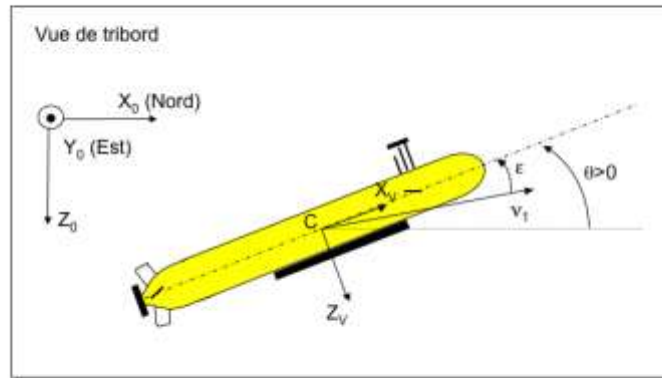


Figure 2.3 : Définition de l'angle d'incidence ε

Les efforts de portance et de traînée sont deux composantes des efforts de résistance de l'eau aux mouvements de l'engin. Les termes portance et traînée sont plutôt utilisés pour les actionneurs type ailerons ou gouvernes, et lorsqu'il s'agit du corps principal du véhicule hors actionneurs, on parlera alors des efforts d'amortissement. Le bilan des efforts dus aux amortissements peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma_{am} = (D_p + D_t(v))v \quad (2.12)$$

D_p : est la matrice de portance, définie négative et constante :

$$D_p = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

D_t : est la matrice de traînée, définie négative et non constante. L'effort résultant a une expression quadratique :

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_{uu} |u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{vv} |v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ww} |w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{pp} |p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{qq} |q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{rr} |r| \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Les valeurs des paramètres de la matrice précédente sont listes au Tableau (B.5).

2.1.6. Gravité et Flottabilité

A l'arrêt, l'engin est uniquement soumis à son poids et à sa flottabilité. Ces efforts dépendent des caractéristiques de l'engin et des propriétés du milieu aquatique.

Soit ρ la masse volumique de l'eau de mer, qui dépend de la salinité, de la pression et de la température. Soient Δ le volume de la torpille et F le centre de flottabilité du véhicule de coordonnées $\overline{CF} = [x_F \quad y_F \quad z_F]^T$ dans le repère véhicule. Soit g l'accélération de la pesanteur.

La poussée d'Archimède est la force qui s'exerce sur toute partie immergée d'un corps. Elle est égale à la force opposée au poids du volume de fluide déplacé $B = -\rho\Delta g$. Le poids du véhicule est égal à $W = mg$.

La figure 2.4 distingue les trois comportements possibles pour un solide immergé :

- (a) le solide remonte à la surface,
- (b) le solide est en équilibre hydrostatique,
- (c) le solide plonge.

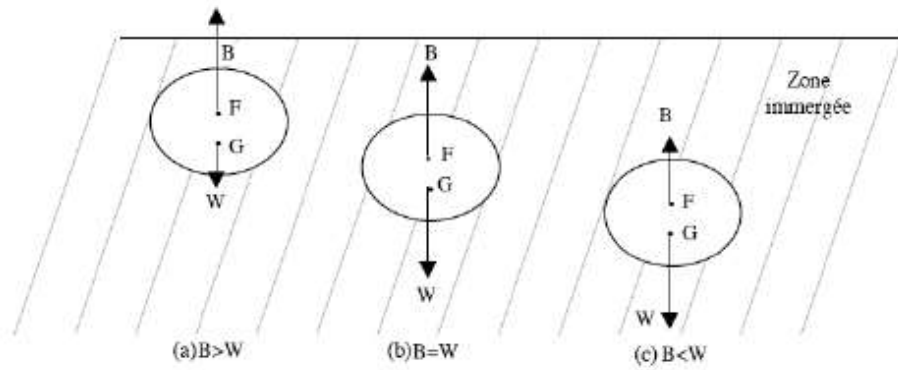


Figure 2.4 : Equilibre hydrostatique

Le vecteur des forces hydrostatiques Γ_g s'écrit alors :

$$\Gamma_g = g \begin{bmatrix} -(m - \rho\Delta) \sin \theta \\ (m - \rho\Delta) \cos \theta \sin \phi \\ (m - \rho\Delta) \cos \theta \cos \phi \\ (y_G m - y_F \rho\Delta) \cos \theta \cos \phi - (z_G m - z_F \rho\Delta) \cos \theta \sin \phi \\ -(z_G m - z_F \rho\Delta) \sin \theta - (x_G m - x_F \rho\Delta) \cos \theta \cos \phi \\ (x_G m - x_F \rho\Delta) \cos \theta \sin \phi + (y_G m - y_F \rho\Delta) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.1.7. Actionneurs hydrodynamiques

On peut répartir les actionneurs en deux groupes :

1. Ceux qui agissent par modification des caractéristiques d'un écoulement existant (surfaces mobiles : ailerons ou gouvernes),
2. Ceux qui génèrent l'écoulement de fluide qui peut être initialement au repos (propulseurs).

Concernant les surfaces mobiles, nous ne présentons ici que les effets dus à la portance et à la traînée, étant donné que les effets dus à la masse et à l'inertie d'eau ajoutée peuvent être négligés par rapport à ceux dus au corps principal.

Concernant les propulseurs, il en existe une grande variété, mais nous nous intéressons uniquement au propulseur du torpille : un propulseur à hélice.

Surfaces mobiles Le principe de fonctionnement repose sur celui déjà exposé dans le paragraphe 1.3.1. Toute surface en incidence par rapport à un fluide visqueux en écoulement est soumise à une force de portance F_P perpendiculaire à cette surface et une force de traînée F_T parallèle à celle-ci (figure 2.5).

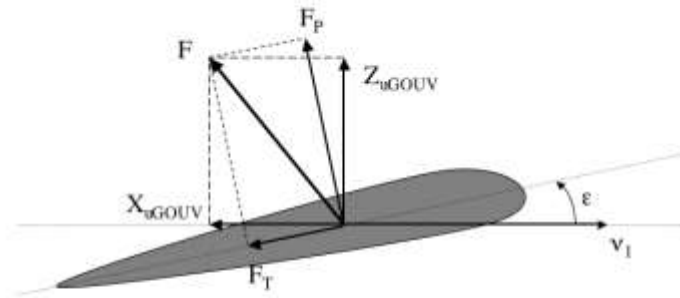


Figure 2.5 : Vue en coupe de la gouverne

On considère une aile mobile dont l'axe de rotation se trouve à une distance d_a de l'origine du repère véhicule. Avec l'hypothèse que la gouverne est fixée sur une surface perpendiculaire, les coefficients de portance et de traînée rapportés aux axes de l'aile sont définis par [16, 13] :

$$C_{z_s} = \frac{2\pi\lambda_{s_e} \left[1 - 3 \left(\frac{e_s}{c_s} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{s_e}^2}{\cos^2 \lambda_s} + 2 \right)} \cos \gamma_s + 2.6} (\varepsilon + \delta) + 2.1(\varepsilon + \delta)^3 \quad (2.16)$$

$$C_{x_s} = 0.01 - 0.7\lambda_{s_e} (\varepsilon + \delta)^2 \quad (2.17)$$

Ou

λ_{s_e} Est l'allongement effectif de l'aile : $\lambda_{s_e} = 2\lambda_s$, avec, l'allongement respectif λ_s :

$$\lambda_s = \frac{\text{envergure}}{\text{corde}} = \frac{b_s}{c_s}$$

b_s / c_s Désigne l'épaisseur relative de l'aile, dont une valeur usuelle 15%, γ_s est la flèche de l'aile, ε représente l'angle d'incidence du corps principal du véhicule,

δ Caractérise le braquage de l'aile, et est l'élément de commande.

En se rapportant aux axes du repère véhicule, nous obtenons les efforts de portance et de traînée (figure 2.6) :

$$\begin{aligned}
 X_{uGOUV} &= -0.5\rho S_s V_0^2 (C_{zs} \sin \delta + C_{xs} \cos \delta) \\
 Z_{uGOUV} &= -0.5\rho S_s V_0^2 (C_{zs} \cos \delta - C_{xs} \sin \delta) \\
 M_{uGOUV} &= Z_{uGOUV} (0.2c_s \cos \delta - d_{as}) + X_{uGOUV} (0.2c_s \sin \delta)
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Avec

ρ La masse volumique du fluide, S_s la surface de l'aile, définie par : $S_s = b_s \times c_s$

V_0 Le module de l'écoulement du fluide autour de l'aile,

$0.2c_s$ La distance du bord d'attaque de l'aile au point d'application de ses forces hydrodynamiques.

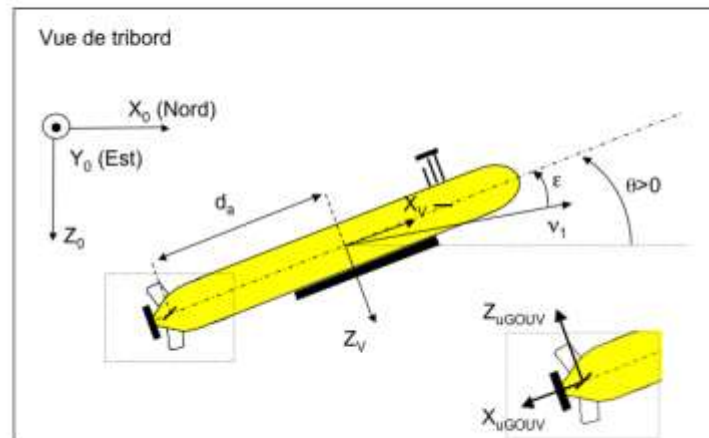


Figure 2.6 : Forces de portance Z_{uGOUV} et de traînée X_{uGOUV} rapportées au repère véhicule

Propulseur 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 du couple résistant Q générés dans le cas d'un propulseur à une hélice est [16] :

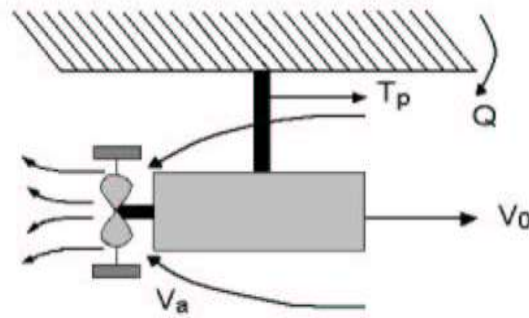


Figure 2.7 : Diagramme du propulseur d'AUV

$$\begin{aligned} X_{uPROP} = T_p &= \rho D_p^4 K_T (J_0) |n_p| n_p \\ K_{uPROP} = Q &= \rho D_p^5 K_Q (J_0) |n_p| n_p \end{aligned} \quad (2.19)$$

Ou

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 : $V_a = (1 - w_a) V_0$

Ou V_0 est la composante axiale de la vitesse de l'eau en amont du propulseur, et w_a 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 $K_T = Ct_0 + Ct_1 J_0 + Ct_2 J_0^2 + Ct_3 J_0^3$, ou les constantes Ct_i sont données dans le tableau (2.1).

K_Q est le coefficient de couple, qui est égal à $K_Q = Cq_0 + Cq_1 J_0 + Cq_2 J_0^2 + Cq_3 J_0^3$, ou les constantes Cq_i sont données dans le tableau (2.1).

i	Ct_i	Cq_i
0	0.50539000	0.090271
1	-0.088971	-0.013470
2	-0.29960	-0.023529
3	0.046836	-0.0020050

Tableau 2.1 : Coefficients de poussée et de couple

2.1.8. Perturbations

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

- *Non-additive*, par la modification des coefficients hydrodynamiques liés au milieu marin. Le principal coefficient hydrodynamique pouvant introduire des perturbations importantes est la masse volumique de l'eau de mer, ou de manière équivalente sa densité.

- *Additive*, par l'action d'un mouvement ou d'une force supplémentaire sur la dynamique initiale du véhicule. C'est le cas des courants marins, de la houle, et dans une moindre mesure pour les déplacements proches de la surface, le vent.

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

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

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. [17] propose, pour les besoins de simulation, un modèle simplifié des courants marins.

2.1.9. Relation générale de la dynamique

La modélisation dynamique d'un véhicule sous-marin de type torpille, dans le repère R_v , conduit aux équations générales suivantes :

$$\boxed{M\dot{v} = C(v)v + D(v)v + \Gamma_g + \Gamma_p + \Gamma_u} \quad (2.20)$$

avec,

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

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

ou, M_{RB} et M_a sont respectivement déterminés par les relations (2.7) et (2.10).

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

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

$C_{RB}(v)$ et $C_a(v)$ étant les matrices respectivement déterminées par les relations (2.8) et (2.11).

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

$$D(v) = D_p(v) + D_t(v)$$

$D_p(v)$ et $D_t(v)$ étant respectivement les matrices de portance et de traînée déterminées par les relations (2.13) et (2.14).

- Γ_g est le vecteur des forces et moments dus à l'action de la gravité et de la poussée d'Archimède, défini par (2.15).
- Γ_p regroupe les perturbations dus à l'environnement, tels les effets dus aux courants marins, la houle, ... Ces phénomènes sont décrits dans le paragraphe 2.1.3.

- Γ_u est le vecteur des forces et moments générés par les actionneurs du véhicule. Par hypothèse, nous admettrons qu'il est déterminé par l'addition des effets de chaque actionneur pris individuellement (cf. paragraphe 2.1.3).

Pour exprimer le modèle (2.20) du robot dans le référentiel absolu :

$$\boxed{M_\eta \ddot{\eta} = C_\eta(v, \eta) \dot{\eta} + D_\eta(v, \eta) \dot{\eta} + \Gamma_{\eta_g} + \Gamma_{\eta_p} + \Gamma_{\eta_u}} \quad (2.21)$$

Avec

$$\begin{aligned} M_\eta &= J_C^{-1}(\eta) M J_C^{-1}(\eta) \\ C_\eta(v, \eta) &= J_C^{-1}(\eta) [C(v) - M J_C^{-1}(\eta) \dot{J}_C(\eta)] J_C^{-1}(\eta) \\ D_\eta(\eta, v) &= J_C^{-1}(\eta) D(v) J_C^{-1}(\eta) \\ \Gamma_{\eta_g}(\eta) &= J_C^{-1}(\eta) \Gamma_g(\eta) \\ \Gamma_{\eta_p} &= J_C^{-1}(\eta) \Gamma_p \\ \Gamma_{\eta_u} &= J_C^{-1}(\eta) \Gamma_u \end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned} \dot{\eta} = J(\eta)v &\Leftrightarrow v = J^{-1}(\eta)\dot{\eta} \\ \ddot{\eta} = J(\eta)\dot{v} + \dot{J}(\eta)v &\Leftrightarrow \dot{v} = J^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)J^{-1}(\eta)\dot{\eta}] \end{aligned}$$

ou,

- η représente la position et l'orientation du véhicule $\eta = [\eta_1, \eta_2]^T$,
- V est le vecteur de la vitesse globale $v = [v_1, v_2]^T$,
- $J_C(\eta)$ est la jacobéennes de transformation du repère véhicule au repère inertiel.

2.2. Modélisation du robot sous-marin autonome H160

Dans la partie précédente (paragraphe 2.1), nous avons donné une description générale de la modélisation d'un véhicule sous-marin de type torpille. 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 la torpille H160, de découpler l'immersion et le cap, afin d'obtenir une modélisation dans chaque plan. Cette modélisation

est basée sur la linéarisation du modèle cinématique général (2.3) et sur des hypothèses simplificatrices.

Linéariser le modèle d'un engin sous-marin est une étape assez courante dans le domaine de la robotique sous-marine. En effet, [13, 27, 28] entre autres, ont proposé des modèles linéarisés et découplés basés sur des hypothèses parfois différentes de celles que nous allons citer.

2.2.1. Cinématique

Nous prenons l'hypothèse de petits mouvements effectués par le véhicule au voisinage d'une trajectoire rectiligne, et de petites perturbations autour de $\theta = 0, \phi = 0$ et $\psi = 0$.

On a alors, $u = V_s = \text{const}$ ou V_s représente la vitesse absolue de la torpille.

Si nous considérons les séries de Taylor pour les fonctions *sinus* et *cosinus* :

$$\begin{aligned}\sin(\theta) &= \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} + \dots \\ \cos(\theta) &= 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} + \dots\end{aligned}\tag{2.22}$$

et si nous linéarisons à l'ordre 1 les équations $\dot{\eta}_1 = J_{c_1}(\eta_2)v_1$ et $\dot{\eta}_2 = J_{c_2}(\eta_2)v_2$, on obtient :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u + (\theta\phi - \psi)v + (\theta + \psi\phi)w \\ \dot{y} &= \psi u + (\theta\phi\psi + 1)v + (\theta\psi - \phi)w \\ \dot{z} &= -\theta u + \phi v + w\end{aligned}\tag{2.23}$$

Et,

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= p + \theta\phi q + \theta r \\ \dot{\theta} &= q - \theta r \\ \dot{\psi} &= \phi q + r\end{aligned}\tag{2.24}$$

2.2.2. Dynamique

2.2.2.1. Dynamique d'un corps rigide

Si l'origine du repère véhicule est le centre de gravité, et que nous négligeons certains termes inertiels petits, les équations (2.6) deviennent :

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr + wq) &= X \\
 m(\dot{v} - wp + ur) &= Y \\
 m(\dot{w} - uq + vp) &= Z \\
 I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + (\dot{r} + pq)I_{xz} &= K \\
 I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + (p^2 - r^2)I_{zx} &= M \\
 I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + (qr - \dot{p})I_{zx} &= N
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Puis, si nous supposons de petits mouvements à une vitesse constante à travers une trajectoire horizontale et rectiligne de référence, nous avons :

- $\frac{v}{V_s}, \frac{w}{V_s}, \frac{\dot{v}}{V_s}, \frac{\dot{w}}{V_s}, p, q, r, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$, petits,
- $u = V_s = \text{const}$
- v^2, vw, vp, vr, \dots , considérés négligeables.

Les équations (2.25) deviennent alors :

$$\begin{aligned}
 mu &= X \\
 m(\dot{v} + ur) &= Y \\
 m(\dot{w} - uq) &= Z \\
 I_{xx}\dot{p} &= K \\
 I_{yy}\dot{q} &= M \\
 I_{zz}\dot{r} &= N
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

2.2.2.2. Forces et moments extérieurs

Les forces et moments agissant sur le véhicule ont une composante hydrodynamique, hydrostatique et une due aux actionneurs. Nous négligeons dans notre modélisation la composante environnementale en ne considérant pas les perturbations dues aux courants marins, aux vagues ou encore au vent.

Pour simplifier le système assez complexe d'équations du mouvement on admet que les forces hydrodynamiques ne dépendent que des vitesses et de leurs dérivées.

- Les efforts hydrodynamiques sont composés par les effets dus à la masse et à l'inertie d'eau ajoutée, et les effets d'amortissement.

$$\begin{aligned}
 X_h &= X_{\dot{u}}\dot{u} \\
 Y_h &= Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}}\dot{v} \\
 Z_h &= Z_w w + Z_q q + Z_{\dot{w}}\dot{w} \\
 K_h &= K_v v + K_p p + K_r r + K_{\dot{v}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{r}}\dot{r} \\
 M_h &= M_w w + M_q q + M_{\dot{q}}\dot{q} \\
 N_h &= N_v v + N_r r + N_{\dot{r}}\dot{r}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Les forces Y_v , Z_w et moments M_w , N_v sont des forces de portance dues à l'angle d'incidence du sous-marin sur sa trajectoire.

- Les forces et moments Y_r , Z_q , M_q , N_r sont également des forces de portance dues aux vitesses angulaires, elles peuvent être considérées comme des forces d'amortissement.
- Les termes de la forme $Y_{\dot{v}}$, $Z_{\dot{w}}$, $M_{\dot{q}}$, $N_{\dot{r}}$ correspondent à des forces ou moments liés aux accélérations, c'est pourquoi elles sont désignées habituellement par les expressions "masses d'eau ajoutée" ou "inertie d'eau ajoutée".

Aux forces hydrodynamiques, il faut ajouter les forces et moments de gravité.

- Les efforts hydrostatiques pour un véhicule sous-marin parfaitement pesé, avec $a = z_G - z_F$ la distance métacentrique (distance entre le centre de gravité et le centre de flottabilité), sont :

$$\begin{aligned}
 X_g &= 0 \\
 Y_g &= 0 \\
 Z_g &= 0 \\
 K_g &= mag \phi \\
 M_g &= mag \theta \\
 N_g &= 0
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

- Les forces et moments dus aux actionneurs, avec δ_c et δ_i respectivement les angles d'inclinaison des gouvernes de cap et d'immersion, sont :

$$\begin{aligned}
 X_u &= 0 \\
 Y_u &= Y_{\delta_c} \delta_c \\
 Z_u &= Z_{\delta_i} \delta_i \\
 K_u &= 0 \\
 M_u &= M_{\delta_i} \delta_i \\
 N_u &= N_{\delta_c} \delta_c
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Le véhicule H160 possède deux paires de gouvernes de plongée : une située à l'avant de l'engin, l'autre à l'arrière. De ce fait, l'inclinaison des gouvernes d'immersion est décrite par le vecteur : $\delta_i = [\delta_{iav}, \delta_{iar}]^T$. δ_{iav} et δ_{iar} sont respectivement les angles d'inclinaison des gouvernes de plongée avants et arrières.

Finalement, les équations de mouvements décrivant le déplacement du véhicule sous-marin H160 réalisant une trajectoire rectiligne et horizontale sont :

$$\begin{aligned}
 m\dot{u} &= X_u \dot{u} = 0 \\
 m(\dot{v} + ur) &= Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\delta_c} \delta_c \\
 m(\dot{w} - uq) &= Z_w w + Z_q q + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\delta_i} \delta_i \\
 I_{xx} \dot{p} &= K_v v + K_p p + K_r r + K_{\dot{v}} \dot{v} + K_{\dot{p}} \dot{p} + K_{\dot{r}} \dot{r} - mag \phi \\
 I_{yy} \dot{q} &= M_w w + M_q q + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\delta_i} \delta_i - mag \theta \\
 I_{zz} \dot{r} &= N_v v + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta_c} \delta_c
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

2.2.2.3. Equations sans dimension

Dans les problèmes d'hydrodynamique, il est commode d'utiliser des nombres sans dimensions. Ceci permet, en effet, de comparer plus facilement les caractéristiques hydrodynamiques et dynamiques des véhicules sous-marins de forme différente ou opérante à vitesses différentes.

On choisit les nombres sans dimension suivants :

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{V_s}{L} t \\
 A &= \frac{\pi}{4} D^2 \\
 k_\Delta &= \frac{\Delta}{AL} = \frac{m}{\rho AL} \\
 k_i &= \frac{I}{\rho AL^3} \\
 \gamma &= \frac{ga}{V_s^2}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

avec :

- $\tau = 0$, le temps pour parcourir la longueur L du véhicule,
- A la surface de référence,
- D le diamètre de la torpille.

Les coefficients de forces :

$$C_x = \frac{X}{\frac{\rho}{2} A V_s^2} , \quad C_y = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} A V_s^2} , \quad C_z = \frac{Z}{\frac{\rho}{2} A V_s^2} \tag{2.32}$$

Les coefficients de moments :

$$C_K = \frac{K}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2} , \quad C_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2} , \quad C_N = \frac{N}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2} \tag{2.33}$$

Les coefficients des vitesses linéaires :

$$U = \frac{u}{V_s} , \quad V = \frac{v}{V_s} , \quad W = \frac{w}{V_s} \tag{2.34}$$

Les coefficients des accélérations linéaires :

$$\dot{U} = \frac{L}{V_s^2} \dot{u} , \quad \dot{V} = \frac{L}{V_s^2} \dot{v} , \quad \dot{W} = \frac{L}{V_s^2} \dot{w} \tag{2.35}$$

Les coefficients des vitesses angulaires :

$$P = \frac{p}{\tau} = p \frac{L}{V_s} , \quad Q = q \frac{L}{V_s} , \quad R = r \frac{L}{V_s} \tag{2.36}$$

Les coefficients des accélérations angulaires :

$$\dot{P} = \frac{dP}{d\tau} = \frac{L}{V_v} \frac{dP}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \frac{L^2}{V_s^2} \dot{p} \quad (2.37)$$

Le coefficient de volume :

$$k_\Delta = \frac{\Delta}{AL} = \frac{m}{\rho} \quad (2.38)$$

Le coefficient d'inertie :

$$k_i = \frac{I}{\rho AL^3} \quad (2.39)$$

A partir des définitions des nombres sans dimension (équations (2.32) et (2.33)), l'expression des efforts extérieurs appliqués sur la torpille (2.30) peut aboutir au système sans dimension suivant :

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_x &= X_u \dot{u} \\ \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_Y &= Y_v v + Y_r r + Y_p p + Y_{\delta_c} \delta_c \\ \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_Z &= Z_w w + Z_q q + Z_r r + Z_{\delta_i} \delta_i \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_K &= K_v v + K_p p + K_r r + K_{\dot{v}} \dot{v} + K_{\dot{p}} \dot{p} + K_{\dot{r}} \dot{r} - mag \phi \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_M &= M_w w + M_q q + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\delta_i} \delta_i - mag \theta \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_N &= N_v v + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta_c} \delta_c \end{aligned} \quad (2.40)$$

Puis, en utilisant les équations (2.34) à (2.39), le système (2.40) devient:

$$\begin{aligned}
 C_X &= C_{X_U} \dot{U} \\
 C_Y &= C_{Y_V} V + C_{Y_R} R + C_{Y_{\dot{V}}} \dot{V} + C_{Y_{\delta_c}} \delta_c \\
 C_Z &= C_{Z_W} W + C_{Z_Q} Q + C_{Z_{\dot{W}}} \dot{W} + C_{Z_{\delta_i}} \delta_i \\
 C_K &= C_{K_V} V + C_{K_P} P + C_{K_R} R + C_{K_{\dot{V}}} \dot{V} + C_{K_P} \dot{P} + C_{K_R} \dot{R} + k_1 \\
 C_M &= C_{M_W} W + C_{M_Q} Q + C_{M_{\dot{Q}}} \dot{Q} + C_{M_{\delta_i}} \delta_i + k_2 \\
 C_N &= C_{N_V} V + C_{N_R} R + C_{N_{\dot{R}}} \dot{R} + C_{N_{\delta_c}} \delta_c
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

avec, par exemple, pour le moment suivant l'axe y :

$$C_{M_w} = \frac{M_w}{\frac{\rho}{2} AL V_S}, C_{M_q} = \frac{M_Q}{\frac{\rho}{2} AL V_S}, C_{M_{\dot{q}}} = \frac{M_{\dot{Q}}}{\frac{\rho}{2} AL^3}, C_{M_{\delta_i}} = \frac{M_{\delta_i}}{\frac{\rho}{2} AL V_S^2} \tag{2.42}$$

et

$$k_2 = \frac{-mga\theta}{\frac{\rho}{2} AL V_S^2} = \frac{-m\gamma\theta}{\frac{\rho}{2} AL} = -2k_{\Delta}\gamma\theta, \quad k_1 = -2k_{\Delta}\gamma\phi \tag{2.43}$$

Au final, à partir de (2.26) et (2.41), les équations de mouvements sans dimension décrivant le déplacement du robot sous-marin H160 réalisant une trajectoire rectiligne et horizontale sont :

$$\begin{aligned}
 u = V_S &= const \\
 (2k_{\Delta} - C_{Y_V}) \dot{V} &= C_{Y_V} V + (C_{Y_R} - 2k_{\Delta}) R + C_{Y_{\delta_c}} \delta_c \\
 (2k_{\Delta} - C_{Z_W}) \dot{W} &= C_{Z_W} W + (C_{Z_Q} - 2k_{\Delta}) Q + C_{Z_{\delta_i}} \delta_i \\
 (2k_{ix} - C_{K_P}) \dot{P} &= C_{K_V} V + C_{K_P} P + C_{K_R} R + C_{K_{\dot{V}}} \dot{V} + C_{K_R} \dot{R} - 2k_{\Delta}\gamma\phi \\
 (2k_{iz} - C_{M_Q}) \dot{Q} &= C_{M_W} W + C_{M_Q} Q + C_{M_{\delta_i}} \delta_i - 2k_{\Delta}\gamma\theta \\
 (2k_{iz} - C_{N_R}) \dot{R} &= C_{N_V} V + C_{N_R} R + C_{N_{\delta_c}} \delta_c
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

2.2.3. Découplage

Du fait de la symétrie de forme du sous-marin par rapport à son plan vertical, on sent intuitivement qu'une évolution dans un plan vertical ne peut induire aucune force hydrodynamique dans le plan horizontal [16], ni de couple autour de l'axe longitudinal Ox (le centre de gravité étant dans le plan de symétrie). Il en résulte que les mouvements dans le plan vertical ne conduisent à aucun couplage ni dans le plan latéral ni autour de l'axe longitudinal. Une telle évolution augmente simplement la traînée et conduit à un ralentissement du sous-marin plus ou moins important selon la courbure de la trajectoire.

Par contre, les mouvements dans le plan latéral (xOy) conduisent à des forces de couplage dans le plan longitudinal (xOz) et autour de l'axe Ox .

Lorsque le véhicule est en giration sous l'action des gouvernes de cap, il apparaît des forces hydrodynamiques verticales qui modifient la dynamique en immersion du sous-marin. On dit qu'il y a couplage giration-plongée. La réciproque n'est pas vraie, une évolution dans le plan vertical sous l'action des barres de plongée n'a que très peu d'influence sur la tenue de cap, ou du fait du faible roulis.

Dans les paragraphes suivants, nous découplons la dynamique du véhicule afin d'obtenir un modèle de la torpille respectivement dans les plans de plongée et de cap.

2.2.4. Modèle en immersion

Hypothèses

Si nous considérons uniquement la dynamique découplée du véhicule 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, tangage et roulis (v, r, p) et nous négligeons les autres variables ne faisant pas parties du plan de plongée.

Modèle linéarisé

La vitesse u est supposée constante ($u = V_s = const$), et on considère que la position x peut être découplée du système. D'après les propositions du paragraphe précédent, les équations cinématiques (2.23) et (2.24), et les équations dynamiques (2.44), le modèle en immersion devient :

$$\begin{aligned}
 (2k_{\Delta} - C_{Z_w})\dot{W} &= C_{Z_w}W + (C_{Z_Q} - 2k_{\Delta})Q + C_{Z_{\delta_i}}\delta_i \\
 (2k_{iz} - C_{M_{\dot{Q}}})\dot{Q} &= C_{M_w}W + C_{M_Q}Q + C_{M_{\delta_i}}\delta_i - 2k_{\Delta}\gamma\theta \\
 \dot{\theta} &= q \\
 \dot{z} &= \dot{w} - \theta V_s
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

En effectuant le passage à des équations avec dimension, on abouti à :

$$\begin{aligned}
 \dot{w} &= \frac{C_{Z_w}}{(2k_{\Delta} - C_{Z_w})L}V_s W + \frac{(C_{Z_Q} - 2k_{\Delta})}{(2k_{\Delta} - C_{Z_w})}V_s q + \frac{C_{Z_{\delta_i}}}{(2k_{\Delta} - C_{Z_w})L}V_s^2 \delta_i \\
 \dot{q} &= \frac{C_{M_w}}{(2k_{iy} - C_{M_{\dot{Q}}})L^2}V_s W + \frac{C_{M_Q}}{(2k_{iy} - C_{M_{\dot{Q}}})L}V_s q - \frac{2k_{\Delta}\gamma}{(2k_{iy} - C_{M_{\dot{Q}}})L^2}V_s \theta + \frac{C_{M_{\delta_i}}}{(2k_{iy} - C_{M_{\dot{Q}}})L^2}V_s^2 \delta_i \\
 \dot{\theta} &= q \\
 \dot{z} &= \dot{w} - \theta V_s
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

En notation matricielle, les équations (2.46) deviennent :

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}V_s & a_{12}V_s & 0 & 0 \\ a_{21}V_s & a_{22}V_s & a_{23}V_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_{43}V_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}V_s^2 & b_{12}V_s^2 \\ b_{21}V_s^2 & b_{22}V_s^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{iav} \\ \delta_{iar} \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

avec,

- δ_{iav} étant l'angle d'inclinaison des gouvernes de plongée avants, et
- δ_{iar} étant celui des gouvernes de plongée arrière.

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

2.2.5. Modèle en cap

Hypothèses

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

Si nous envisageons uniquement un déplacement du véhicule 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 pas les variables ne faisant pas partie du plan horizontal.

Modèle linéarisé

La vitesse u est supposée constante ($u = V_S = const$), et on considère que la position (x, y) peut être découplée du système.

D'après les propositions du paragraphe 2.2.4, les équations cinématiques (2.23) et (2.24), et les équations dynamiques (2.44), le modèle en cap devient :

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} 2k_{\Delta} - C_{Y_V} \end{pmatrix} \dot{V} &= C_{Y_V} V + \begin{pmatrix} C_{Y_R} - 2k_{\Delta} \end{pmatrix} R + C_{Y_{\delta_c}} \delta_c \\
 \begin{pmatrix} 2k_{iz} - C_{N_R} \end{pmatrix} \dot{R} &= C_{N_V} V + C_{N_R} R + C_{N_{\delta_c}} \delta_c \\
 \dot{\psi} &= R
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

En effectuant le passage à des équations avec dimension, on aboutit à :

$$\begin{aligned}
 \dot{v} &= \frac{C_{Y_V}}{(2k_{\Delta} - C_{Y_V})L} V_S v + \frac{(C_{Y_R} - 2k_{\Delta})}{(2k_{\Delta} - C_{Y_V})} V_S r + \frac{C_{Y_{\delta_c}}}{(2k_{\Delta} - C_{Y_V})L} V_S^2 \delta_c \\
 \dot{q} &= \frac{C_{N_V}}{(2k_{iz} - C_{N_R})L^2} V_S v + \frac{C_{N_R}}{(2k_{iz} - C_{N_R})L} V_S r + \frac{C_{N_{\delta_c}}}{(2k_{iz} - C_{N_R})L^2} V_S^2 \delta_c \\
 \dot{\psi} &= R
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

En notation matricielle, le système d'équations (2.48) devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}V_s & c_{12}V_s & 0 \\ c_{21}V_s & c_{22}V_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1V_s^2 \\ d_2V_s^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c \quad (2.50)$$

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



Chapitre III

Commande Backstepping du Robot sous-marin autonome

Technique de commande robuste



3.1 Introduction

La technique du backstepping est une méthode de commande relativement récente des systèmes non linéaire, elle permet, de manière séquentielle et systématique, par le choix d'une fonction de Lyapunov, de déterminer la loi de commande du système.

Son principe est d'établir d'une manière constructive la loi de commande du système non linéaire. En considérant quelques variables d'état comme étant des commandes virtuelles est leur concevoir des lois de commande intermédiaires [29], [30].

3.2 Principe

Depuis quelques années, beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. La technique du backstepping fait partie de ces nouvelles percées dans ce domaine [31-44] Elle propose une méthode de synthèse systématique destinée à la classe des systèmes non linéaires ayant une forme triangulaire. Elle est basée sur la décomposition du système entier de commande, qui est généralement multi variable (MIMO) et d'ordre élevé en une cascade de sous-systèmes de commande du premier ordre. Pour chaque sous système, une loi de commande dite virtuelle est calculée. Cette dernière servira comme référence pour le sous-système suivant jusqu'à l'obtention de la loi de commande pour le système complet. Par ailleurs, cette technique a l'avantage de conserver les non linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande, contrairement aux méthodes de linéarisation. La détermination des lois de commande qui découle de cette approche est basée sur l'emploi des fonctions de Lyapunov de commande (CLF).

3.3. Méthodes de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaire s'appuie sur deux approches possibles. La première vise à linéariser le système à commander, afin de profiter des techniques consacrées aux systèmes linéaires. La deuxième approche consiste à trouver une Fonction de Commande de Lyapunov garantissant certaines performances pour le système en boucle fermée. De telles fonctions peuvent être très difficiles à trouver pour un système non linéaire d'ordre élevé. La technique du backstepping permet de réduire avantageusement cette complexité.

L'analyse de la stabilité dans le cadre de l'utilisation du Backstepping est basée sur les méthodes Lyapunov qui constituent un outil très puissant pour tester et trouver des conditions suffisantes à la stabilité des systèmes dynamiques, sans avoir à résoudre explicitement les

équations différentielles les décrivant.

3.3.1. Première méthode de Lyapunov

Cette méthode permet d'analyser la stabilité, d'un système à partir de l'étude de la stabilité locale par linéarisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre. Cette méthode est d'une importance limitée, car elle ne permet d'étudier que la stabilité locale et ne donne pas d'information sur le domaine de stabilité global [45]. De plus, dû aux approximations du premier degré (linéarisation), il n'est pas possible de tenir compte de tous les types de phénomènes non-linéaires. En fait, l'étude locale est surtout intéressante pour justifier ou non la poursuite de l'étude de la stabilité. Si on trouve que le système linéarisé est instable, le système non linéaire le sera nécessairement aussi.

3.3.2. Deuxième méthode de Lyapunov

Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans un système. Le principe de cette méthode consiste à analyser la stabilité du système, sans même résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent. La stabilité dépend uniquement de l'étude des variations (signe de la dérivée) de l'énergie, ou d'une fonction qui lui est équivalente, le long de la trajectoire du système.

L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur d'état x consiste alors à chercher une fonction $V(x)$ (représentative de l'énergie) de signe défini, dont la dérivée dV/dt est semi-définie et de signe opposé dans le même domaine.

3.4. Méthode générale de synthèse réursive par backstepping

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que l'indique la représentation suivante :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2, \\
 \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3, \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u,
 \end{aligned} \tag{3.01}$$

Avec $x = [x_1 x_2 \dots x_n] \in R^n, u \in R;$

Afin d'illustrer la procédure récursive de la méthode backstepping, on considère que la sortie du système $y = x_l$ désire suivre le signal de référence y_{ref} . Le système étant d'ordre n , la mise en œuvre s'effectue en n étapes.

Etape 1 :

On commence par la première équation du système (3.01), où x_2 sera considérées comme une commande virtuelle intermédiaire. La première référence désirée est notée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 - y_{ref} \tag{3.02}$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \tag{3.03}$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 \\
 \dot{e}_1 &= f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0
 \end{aligned} \tag{3.04}$$

pour un tel système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \tag{3.05}$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 \\ \dot{V}_1 &= e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \end{aligned} \quad (3.06)$$

Un choix judicieux de x_2 rendrait V_1 négative et assurerait la stabilité pour la dynamique de (3.04). Pour cela, prenons : $x_2 = \alpha_1$ telle que :

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 = -k_1 e_1 \quad (3.07)$$

Où $k_1 > 0$ est une constante de conception. Ainsi, la loi de commande pour le système (3.04) sera donnée par

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad (3.08)$$

Ce qui implique

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.09)$$

Etape 2 :

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous-système précédent (3.04) :

$$(x_2)_d = \alpha_1 \quad (3.10)$$

D'où l'erreur de régulation :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (3.11)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{e}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Pour le système (3.12), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2}e_2^2$$

$$v_2 = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2]$$
(3.13)

Dont la dérivée est :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1]$$
(3.14)

Le choix de x_3 qui stabilisera la dynamique du système (3.12), et rendra V_2 négative est : $x_3 = a_2$ telle que :

$$f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 = -k_2 e_2$$
(3.15)

Où $k_2 > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (3.12) sera donnée par :

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_1(x_1, x_2)} [-k_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2)]$$
(3.16)

Avec

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{g_0(x_1)[-k_1 \dot{e}_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)]\dot{g}_0(x_1)}{g_0^2(x_1)}$$
(3.17)

Un tel choix implique que :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0$$
(3.18)

Etape n :

De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera (3.20)

$$(x_n)_d = \alpha_n - 1 \quad (3.19)$$

D'où l'erreur de régulation

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (3.20)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_n &= \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} \\ \dot{e}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Pour le système (3.21), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$\begin{aligned} v_n &= v_1 + v_2 + \dots + \frac{1}{2}e_n^2 \\ v_n &= \frac{1}{2}[e_1^2 + \dots + e_n^2] \end{aligned} \quad (3.22)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{V}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n \\ \dot{V}_n &= -k_1 e_1^2 + \dots + e_n [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1}] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier.

Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} = -k_n e_n \quad (3.24)$$

Où $k_n > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} [-k_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n)] \quad (3.25)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (3.26)$$

3.5. Application à la commande d'un robot sous-marin autonome

3.5.1 . la loi de commande en cap :

la loi de commande en cap s'applique à l'angle δ_c , l'angle d'inclinaison des barres du gouvernail.

Pour une vitesse V_s donnée, le modèle d'évolution du véhicule dans le plan horizontal peut être écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} V_s & c_{12} V_s & 0 \\ c_{21} V_s & c_{22} V_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 V_s^2 \\ d_2 V_s^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c \quad (3.27)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= r \\ \dot{r} &= v \\ \dot{v} &= 0.5428r - 1.081v + u \end{aligned} \quad (3.28)$$

On appliquant la commande backstepping sur le modèle (3.28)

L'objectif de la commande est d'atteindre la convergence des erreurs vers zéro réalisant ainsi la stabilité et l'équilibre

Du système ce qui permet à sa sortie y de suivre une référence $y_r = y_r(t)$

Etape 1 :

On définit première variable de l'erreur e_1 tel que :

$$e_1 = \psi - \psi d \quad (3.29)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{\psi} - \dot{\psi}d \\ \dot{e}_1 &= r - \dot{\psi}d \end{aligned} \quad (3.30)$$

On choisit première fonction de Lyapunov v_1 tel que :

$$v_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (3.31)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (3.32)$$

Pour que \dot{V}_1 soit négative il faut que $\dot{V}_1 \leq -\alpha_1 e_1^2$

$$\begin{aligned} e_1 \dot{e}_1 &\leq -\alpha_1 e_1^2 \\ \dot{e}_1 &\leq -\alpha_1 e_1 \\ r - \dot{\psi}d &\leq -\alpha_1 e_1 \\ r &= -\alpha_1 e_1 + \dot{\psi}d \end{aligned} \quad (3.33)$$

Etape 2 :

On définit deuxième variable de l'erreur e_2 tel que

$$e_2 = r - rd \quad (3.34)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{r} - \dot{r}d \\ \dot{e}_2 &= v - \dot{r}d \end{aligned} \quad (3.35)$$

On choisit deuxième fonction Lyapunov v_2 tel que

$$v_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (3.36)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 \\ \dot{V}_2 &= -\alpha_1 e_1^2 - \alpha_2 e_2^2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

pour que \dot{V}_2 soit négative il faut que $\dot{V}_2 \leq -\alpha_2 e_2^2$

$$\begin{aligned} e_2\dot{e}_2 &\leq -\alpha_2 e_2^2 \\ \dot{e}_2 &\leq -\alpha_2 e_2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

En replace l'équation (3.35) dans l'équation (3.38) nous obtentions l'équation

Suivant :

$$v = -\alpha_2 e_2 + \dot{r}d \quad (3.39)$$

Etape 3 :

On définit troisième variable de l'erreur e_3 tel que

$$e_3 = v - \dot{r}d \quad (3.40)$$

Nous compensons l'équation (3.39) dans l'équation (3.40) en trouve l'équation

Suivant :

$$e_3 = v + (\alpha_2 + \alpha_1)r + \alpha_2\alpha_1\psi - \alpha_2\alpha_1\psi d - (\alpha_2 + \alpha_1)\dot{\psi}d - \ddot{\psi}d \quad (3.41)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= \dot{v} - \dot{r}d \\ \dot{e}_3 &= 0.5428r - 1.081v + u + (\alpha_2 + \alpha_1)v + \alpha_2\alpha_1r - \alpha_2\alpha_1\dot{\psi}d - (\alpha_2 + \alpha_1)\ddot{\psi}d - \ddot{\psi}d \end{aligned} \quad (3.42)$$

On choisit troisième fonction de Lyapunov v_3 tel que

$$v_3 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 \quad (3.43)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_3 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \quad (3.44)$$

Pour que \dot{V}_3 soit négative il faut que $\dot{V}_3 \leq -\alpha_3 e_3^2$

$$\begin{aligned} e_3 \dot{e}_3 &\leq -\alpha_3 e_3^2 \\ \dot{e}_3 &\leq -\alpha_3 e_3 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Nous compensons les équations (3.41) et (3.42) dans (3.45) afin de l'obtenir la loi

De commande U :

$$\begin{aligned} U = & (-\alpha_3 + 1.081 - \alpha_2 - \alpha_1)v + (-\alpha_3 \alpha_2 - \alpha_3 \alpha_1 - 0.5428 - \alpha_2 \alpha_1)r - \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 \psi + \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 \psi d + \\ & (\alpha_3 \alpha_2 + \alpha_3 \alpha_1 + \alpha_2 \alpha_1) \dot{\psi} d + (\alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1) \ddot{\psi} d + \ddot{\psi} d \end{aligned} \quad (3.46)$$

3.5.2 La loi de commande en immersion :

A.2.1 modèle en immersion

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} v_s & \alpha_{12} v_s & 0 & 0 \\ \alpha_{21} v_s & \alpha_{22} v_s & \alpha_{23} v_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \alpha_{43} v_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} v_s^2 & b_{12} v_s^2 \\ b_{21} v_s^2 & b_{22} v_s^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{iav} \\ \delta_{iar} \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.47)$$

δ_{iav} Étant l'angle d'inclinaison des gouvernes de plongée avant

δ_{iar} Étant celui des gouvernes de plongée arrière

$$\begin{aligned}
 \dot{z} &= \theta \\
 \dot{\theta} &= q \\
 \dot{q} &= w \\
 \dot{w} &= -0.1049\theta + 0.1627q - 1.1lw + u
 \end{aligned}
 \tag{3.48}$$

On appliquant la commande backstepping sur le modèle (3.46)

Etape 1 :

On définit première variable de l'erreur e_1 tel que

$$e_1 = z - zd \tag{3.49}$$

Sa dérivée est

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_1 &= \dot{z} - \dot{z}d \\
 \dot{e}_1 &= \theta - \dot{z}d
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

On choisit la premier fonction de lyapunov v_1 tel que

$$v_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \tag{3.51}$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 \tag{3.52}$$

Pour que \dot{V}_1 soit négative il faut que : $\dot{V}_1 \leq -\alpha_1 e_1^2$

$$\begin{aligned}
 e_1\dot{e}_1 &\leq -\alpha_1 e_1^2 \\
 \dot{e}_1 &\leq -\alpha_1 e_1
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

Nous compensons les équations (3.49) et (3.48) dans l'équation (3.52)

En trouve l'équation suivant :

$$\theta = -\alpha_1 z + \alpha_1 z d + \dot{z}d \tag{3.54}$$

Etape 2 :

On définit deuxième variable de l'erreur e_2 tel que

$$\begin{aligned} e_2 &= \theta - \theta d \\ e_2 &= \theta + \alpha_1 z - \alpha_1 z d - \dot{z} d \end{aligned} \quad (3.55)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= q + \alpha_1 \dot{\theta} - \alpha_1 \dot{z} d - \ddot{z} d \\ \ddot{e}_2 &= w + \alpha_1 q - \alpha_1 \ddot{z} d - \ddot{z} \dot{d} \end{aligned} \quad (3.56)$$

On choisit la deuxième fonction de Lyapunov v_2 tel que

$$v_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (3.57)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_2 = -\alpha_1 e_1^2 - \alpha_2 e_2^2 \quad (3.58)$$

Pour que \dot{V}_2 soit négative il faut que $\dot{V}_2 \leq -\alpha_2 e_2^2$

$$\begin{aligned} e_2 \dot{e}_2 &\leq -\alpha_2 e_2^2 \\ \dot{e}_2 &\leq -\alpha_2 e_2 \end{aligned} \quad (3.59)$$

On remplace les équations (3.54) et (3.55) dans l'équation (3.59)

Nous obtenons l'équation suivante :

$$q = -(\alpha_2 + \alpha_1)\dot{\theta} - \alpha_2 \alpha_1 \dot{z} + \alpha_2 \alpha_1 z \dot{d} + (\alpha_2 + \alpha_1)\ddot{z} d + \ddot{z} \dot{d} \quad (3.60)$$

Étape 3 :

On définit troisième variable de l'erreur e_3 tel que

$$\begin{aligned} e_3 &= q - q d \\ e_3 &= q + (\alpha_2 + \alpha_1)\dot{\theta} + \alpha_2 \alpha_1 \dot{z} - \alpha_2 \alpha_1 z \dot{d} - (\alpha_2 + \alpha_1)\ddot{z} d - \ddot{z} \dot{d} \end{aligned} \quad (3.61)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_3 = w + (\alpha_2 + \alpha_1)q + \alpha_2\alpha_1\theta - \alpha_2\alpha_1\dot{z}d - (\alpha_2 + \alpha_1)\ddot{z}d - \ddot{z}d \quad (3.62)$$

On choisit troisième fonction de Lyapunov v_3 tel que

$$v_3 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 \quad (3.63)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_3 = -\alpha_1e_1^2 - \alpha_2e_2^2 - \alpha_3e_3^2 \quad (3.64)$$

Pour que \dot{V}_3 soit négative il faut que $\dot{V}_3 \leq -\alpha_3e_3^2$

$$\begin{aligned} e_3\dot{e}_3 &\leq -\alpha_3e_3^2 \\ \dot{e}_3 &\leq -\alpha_3e_3 \end{aligned} \quad (3.65)$$

Nous compensons les équations (3.61) et (3.62) dans l'équation (3.63)

En trouve l'équation suivant :

$$\begin{aligned} w &= (-\alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1)q + (-\alpha_3\alpha_2 - \alpha_3\alpha_1 - \alpha_2\alpha_1)\theta - \alpha_3\alpha_2\alpha_1z + \\ &\alpha_3\alpha_2\alpha_1\dot{z}d + (\alpha_3\alpha_2 + \alpha_3\alpha_1 + \alpha_2\alpha_1)\dot{z}d + (\alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1)\ddot{z}d + \ddot{z}d \end{aligned} \quad (3.66)$$

Etape 4 :

On définit quatrième variable de l'erreur e_4 tel que

$$\begin{aligned} e_4 &= w - \dot{w}d \\ e_4 &= w - (-\alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1)q - (-\alpha_3\alpha_2 - \alpha_3\alpha_1 - \alpha_2\alpha_1)\theta + \alpha_3\alpha_2\alpha_1z \\ &- \alpha_3\alpha_2\alpha_1\dot{z}d - (\alpha_3\alpha_2 + \alpha_3\alpha_1 + \alpha_2\alpha_1)\dot{z}d - (\alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1)\ddot{z}d - \ddot{z}d \end{aligned} \quad (3.67)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_4 &= -0.1049\theta + 0.1627q - 1.1lw + u - (-\alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1)w - (-\alpha_3\alpha_2 - \alpha_3\alpha_1 \\ &- \alpha_2\alpha_1)q + \alpha_3\alpha_2\alpha_1\theta - \alpha_3\alpha_2\alpha_1\dot{z}d - (\alpha_3\alpha_2 + \alpha_3\alpha_1 + \alpha_2\alpha_1)\dot{z}d - (\alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1) \\ &\ddot{z}d + \ddot{z}d \end{aligned} \quad (3.68)$$

On choisit quatrième fonction de Lyapunov v_4 tel que

$$v_4 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{1}{2}e_4^2 \quad (3.69)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_4 = -\alpha_1 e_1^2 - \alpha_2 e_2^2 - \alpha_3 e_3^2 - \alpha_4 e_4^2 \quad (3.70)$$

Pour que \dot{V}_4 soit négative il faut que $\dot{V}_4 \leq -\alpha_4 e_4^2$

$$\begin{aligned} e_4 \dot{e}_4 &\leq -\alpha_4 e_4^2 \\ \dot{e}_4 &\leq -\alpha_4 e_4 \end{aligned} \quad (3.71)$$

Nous compensons les équations (3.65) et(3.66) dans l'équation (3.68)

Afin d'obtenir la loi de commande U en immersion comme suit :

$$\begin{aligned} U = & -\alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 z + (-\alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 - \alpha_4 \alpha_3 \alpha_1 - \alpha_4 \alpha_2 \alpha_1 + 0.1049 - \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1) \theta \\ & + (-\alpha_4 \alpha_3 - \alpha_4 \alpha_2 - \alpha_4 \alpha_1 - 0.1627 - \alpha_3 \alpha_2 - \alpha_3 \alpha_1 - \alpha_2 \alpha_1) q + (-\alpha_4 + 1.11 \\ & - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1) w + \alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 z d + (\alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 + \alpha_4 \alpha_3 \alpha_1 + \alpha_4 \alpha_2 \alpha_1 + \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1) \\ & \dot{z} d + (\alpha_4 \alpha_3 + \alpha_4 \alpha_2 + \alpha_4 \alpha_1 + \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1) \dot{z} \dot{d} + (\alpha_4 + \alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1) \\ & \ddot{z} d + \ddot{z} \dot{d} \end{aligned} \quad (3.72)$$

3.6. Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons nos résultats de simulation sur les lois de commande Backstepping. Ces simulations sont réalisées en utilisant un simulateur basé sur le modèle mathématique à 6ddl du véhicule H160 présenté en annexe A.

Dans un premier temps, nous avons réalisé des simulations sans prendre en compte l'environnement. Puis, dans une deuxième phase, nous avons bruité les données issues des capteurs.

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 les angles d'inclinaison des gouvernes avants et arrières, respectivement δ_{iav} et δ_{iar} .

La mission du véhicule consiste en une simple ligne droite d'une durée de 200s.

3.6.1. Simulations sans bruit

Les paramètres utilisés pour les simulations sont :

- Le cap désiré : $\psi_d = 30^\circ$
- Vitesse de lacet désirée : $r_d = 0$
- vitesse de glissement : $v_d = 0$
- La profondeur désirée : $z_d = 10m$
- Le tangage désiré : $\theta_d = 0^\circ$
- Vitesse de tangage désirée : $q_d = 0$
- Vitesse de descente désirée : $w_d = 0$
- La vitesse absolue du véhicule : $v_s = 1.5m / s$

3.6.1.1. Cap du véhicule

En ce qui concerne le cap du robot, les résultats de simulation devant cette loi de commande est donné sur les figures (3.1), (3.2), (3.3). Nous pouvons remarquer que notre robot suive bien son cap désiré, et avec une vitesse de glissement et vitesse de cap nulles dans le régime permanent. Ainsi que l'inclinaison de gouvernes de cap revient à son état initial après que le robot attient son cap désiré.

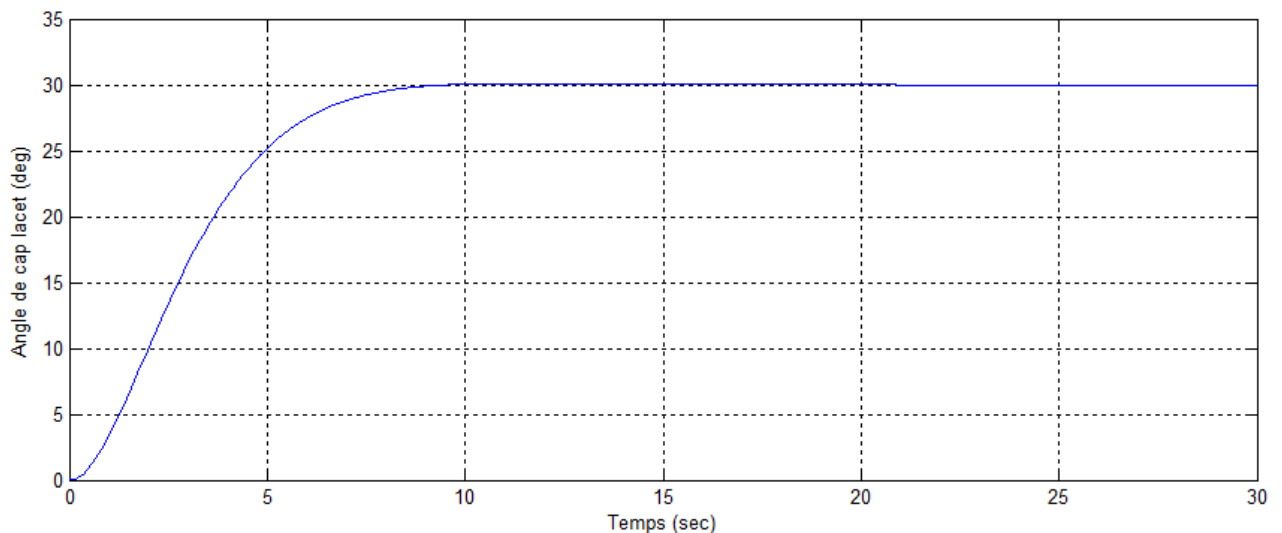


Figure 3.1 : Cap de véhicule

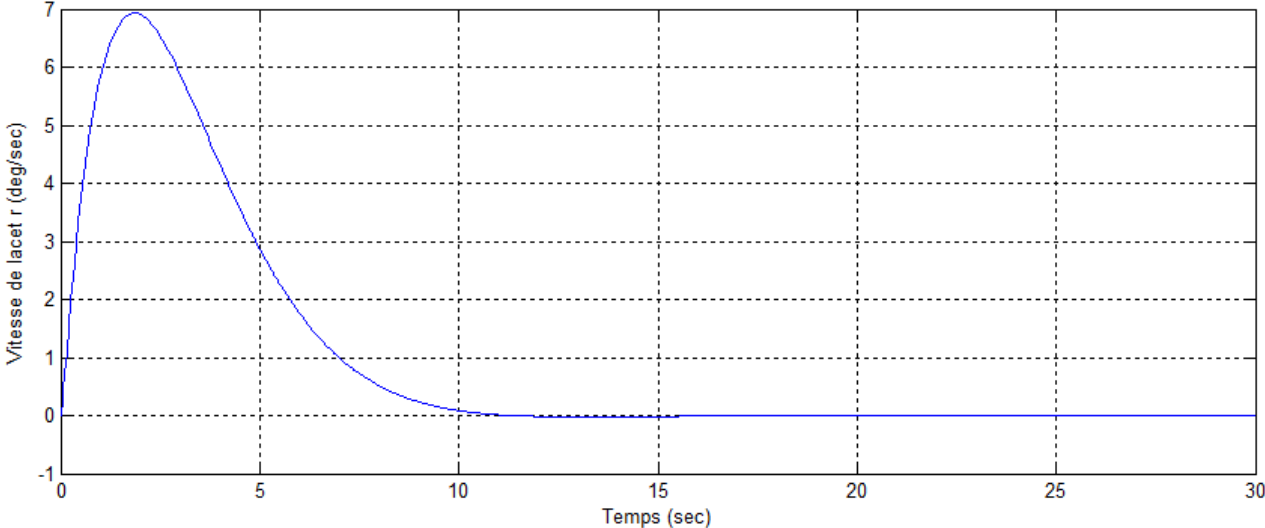


Figure 3.2 : Vitesse de lacet

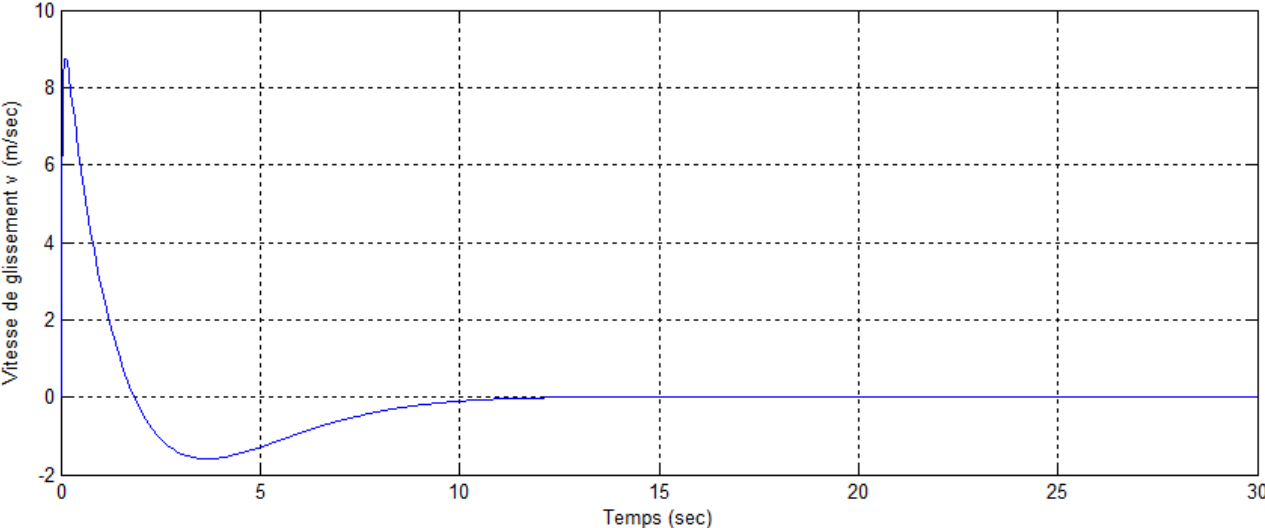


Figure 3.3 : Vitesse de glissement

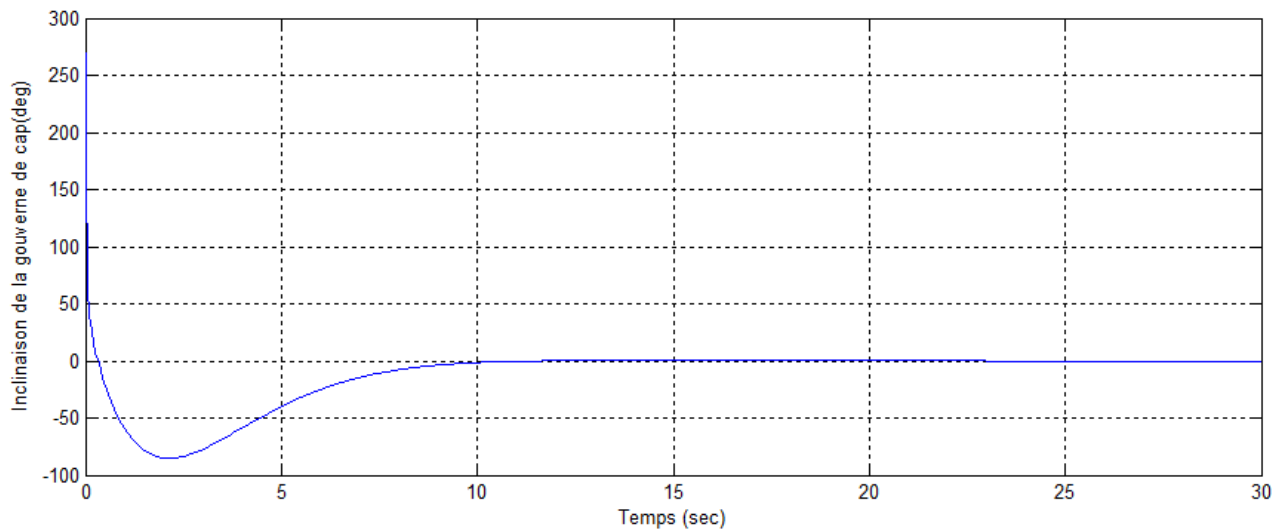


Figure 3.4 : Inclinaison de la gouverne de cap

3.6.1.2. Immersion du véhicule

La torpille arrive à sa profondeur désirée z_d en 80s environ (figure 3.5) avec un angle de tangage θ quasi nul (figure 3.6). La figure 3.9 nous montre que les gouvernes avants et arrières gèrent respectivement l'immersion et le tangage du véhicule. En effet, tant que la profondeur désirée z_d n'est pas atteinte, les gouvernes avants sont saturées. Nous pouvons remarquer aussi que la vitesse de descente w (figure 3.8) et la vitesse de tangage q (figure 3.7) sont nulles dans le régime permanent.

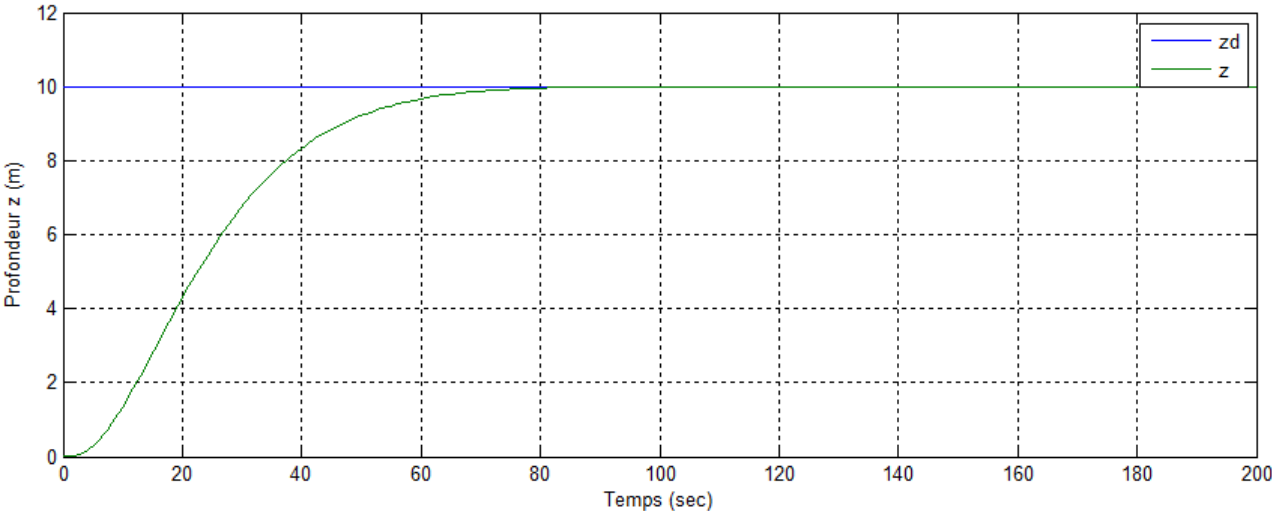


Figure 3.5 : Profondeur $z(m)$

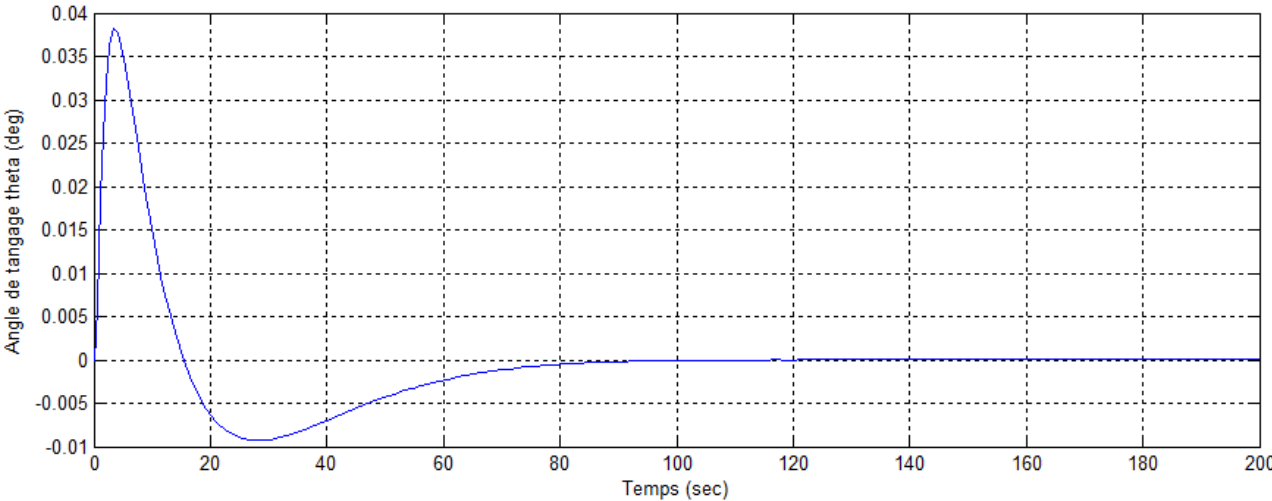


Figure 3.6 : Angle de tangage

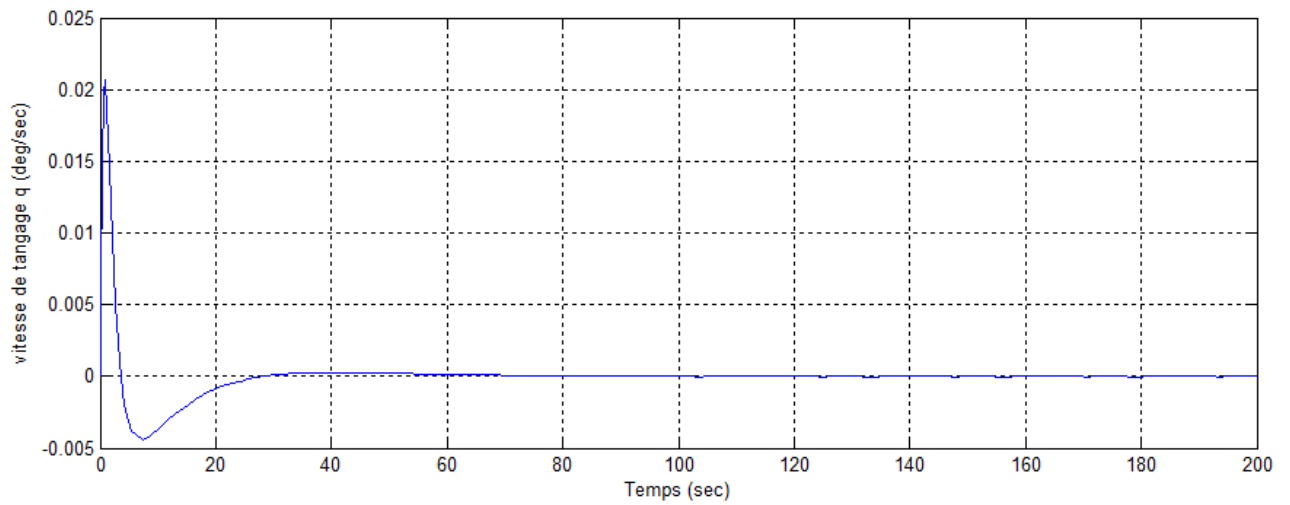


Figure 3.7 : vitesse de tangage q

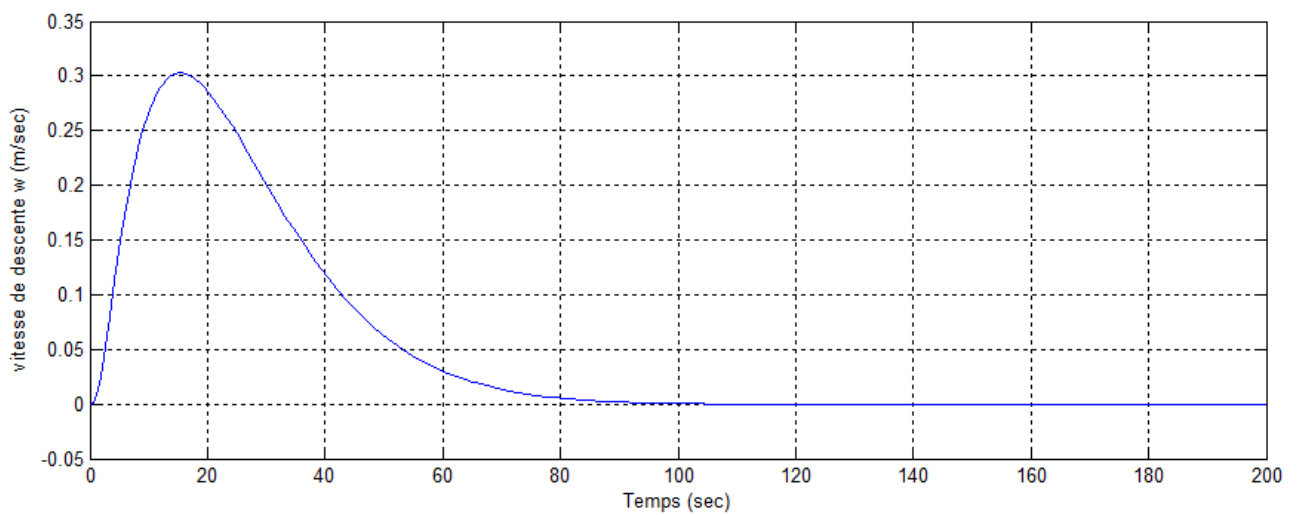


Figure 3.8 : vitesse de descente w

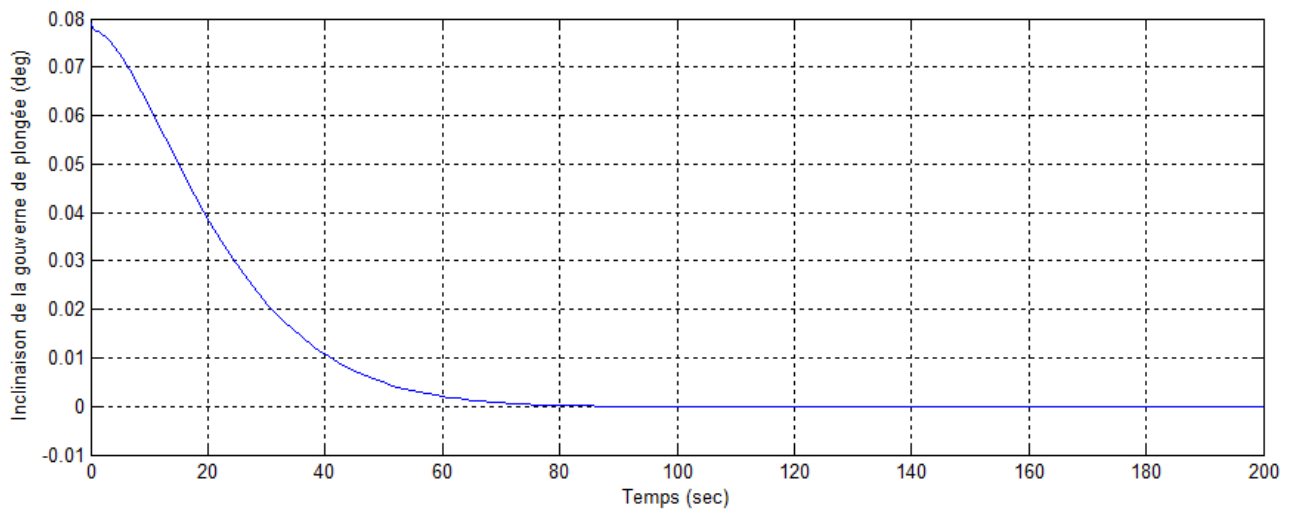


Figure 3.9 : Inclinaison de la gouverne de plongée

3.6.2. Simulation avec bruit

Les conditions pour les simulations bruitées sont identiques à celles de la section précédente. Nous ajoutons maintenant aux simulations du bruit sur les capteurs. Les mesures des capteurs sont soumises à des bruits gaussiens d'écarts :

- Profondeur (z) $0.1 m$
- Angle de tangage (θ) 0.5°
- Vitesse angulaire (q) $0.5^\circ/s$
- Vitesse angulaire (r) $0.2^\circ/s$
- Vitesse linéaire (v) $0.3m/s$
- Vitesse linéaire (w) $0.5m/s$
- Angle de cap (ψ) 0.5°

3.6.2.1. Cap du véhicule

Nous ne bruitons pas les mesures des capteurs pour le plan vertical du véhicule. Nous privilégions la réaction de la torpille dans le plan de cap. Donc, la figure 3.10 nous montre un cap Ψ et un angle d'inclinaison des gouvernes δ_c constants (figure 3.13). Et la vitesse linéaire et angulaire (figure 3.11 et 3.12). Donc le comportement du robot est acceptable devant les perturbations dans le plan horizontal.

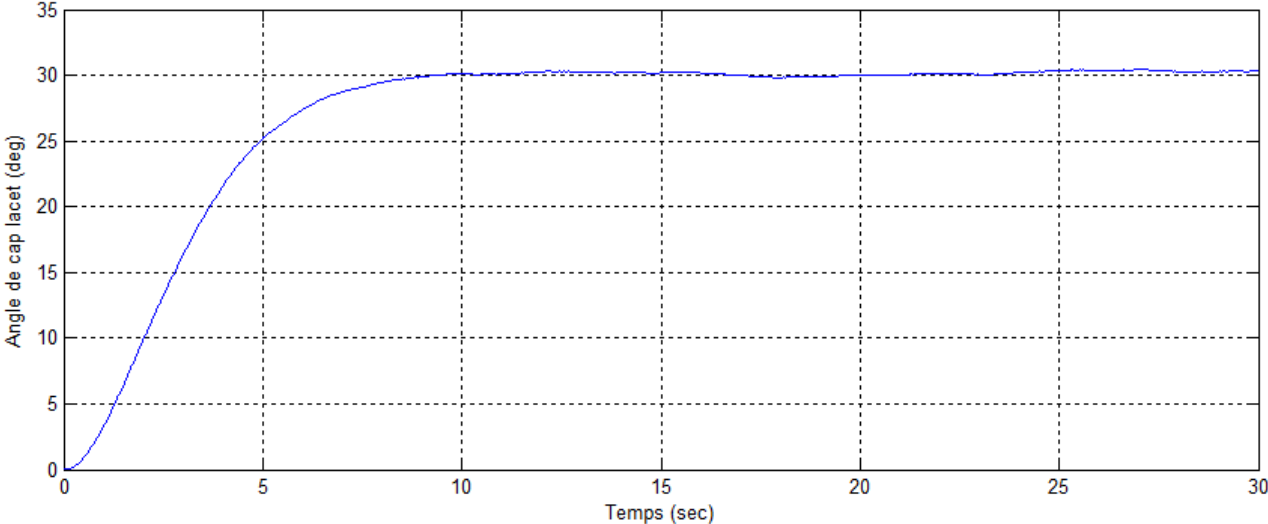


Figure 3.10 : Cap avec bruit

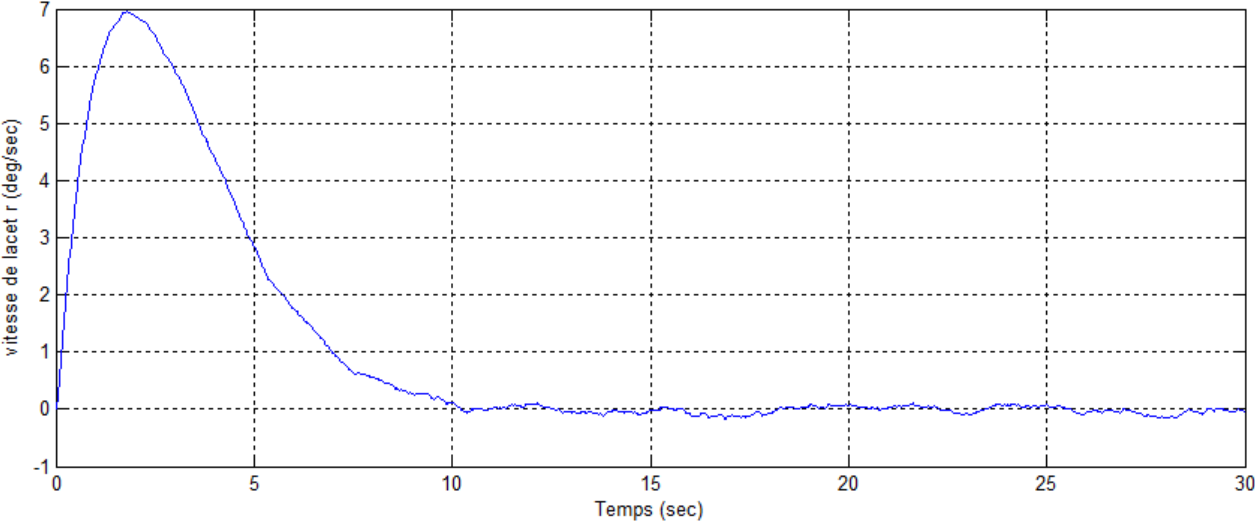


Figure 3.11 : Vitesse de lacet avec bruit

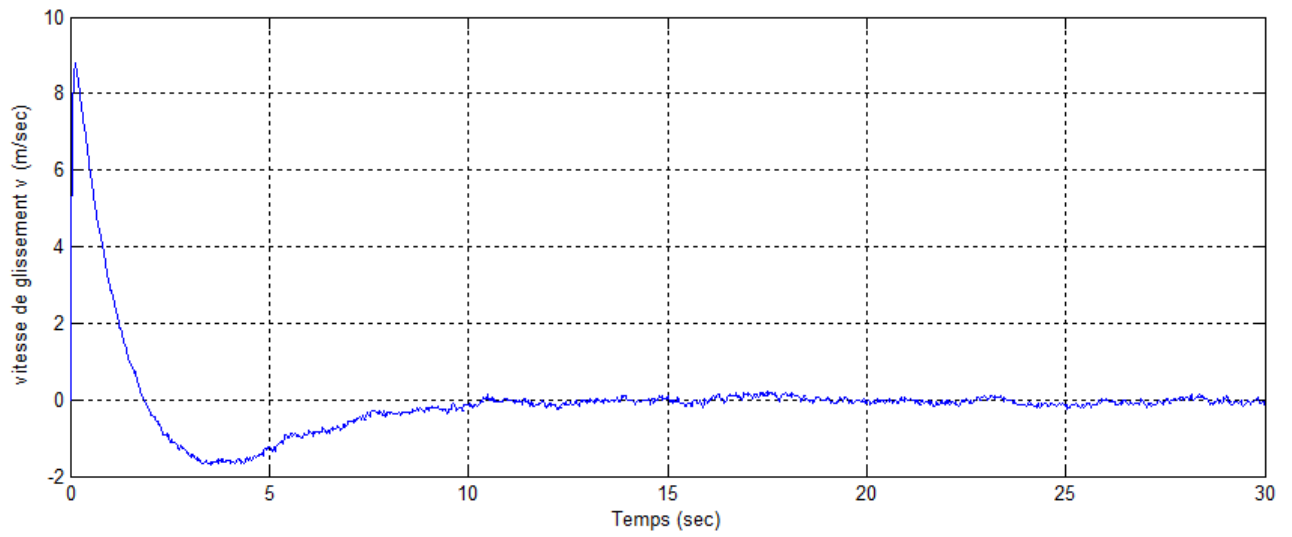


Figure 3.12 : Vitesse de glissement avec bruit

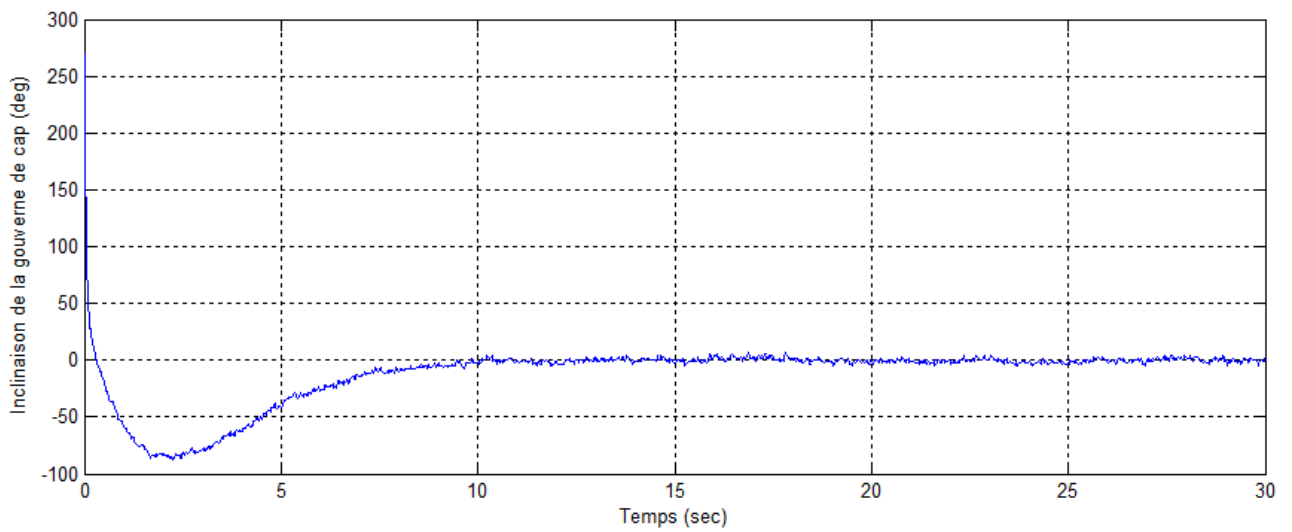


Figure 3.13 : Inclinaison de la gouverne de cap avec bruit

3.6.2.2. Immersion du véhicule

Nous ne bruitons pas les mesures des capteurs pour le plan horizontal du véhicule. Nous

privilégions la réaction de la torpille dans le plan de plongée. Donc, la figure 3.14 nous montre un profondeur z et un angle d'inclinaison des gouvernes δ_p constants (figure 3.18). Et la vitesse linéaire et angulaire (figure 3.16 et 3.17), ainsi que angle de tangage (figure 3.15). Donc le comportement du robot est acceptable devant les perturbations dans le plan vertical.

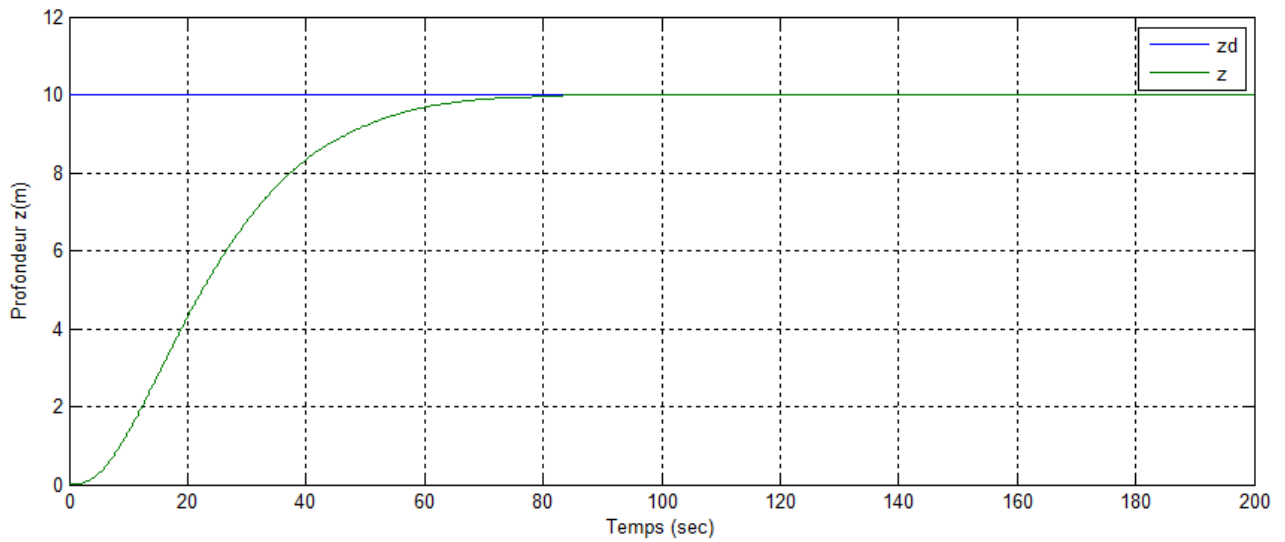


Figure 3.14 : profondeur avec bruit $z(m)$

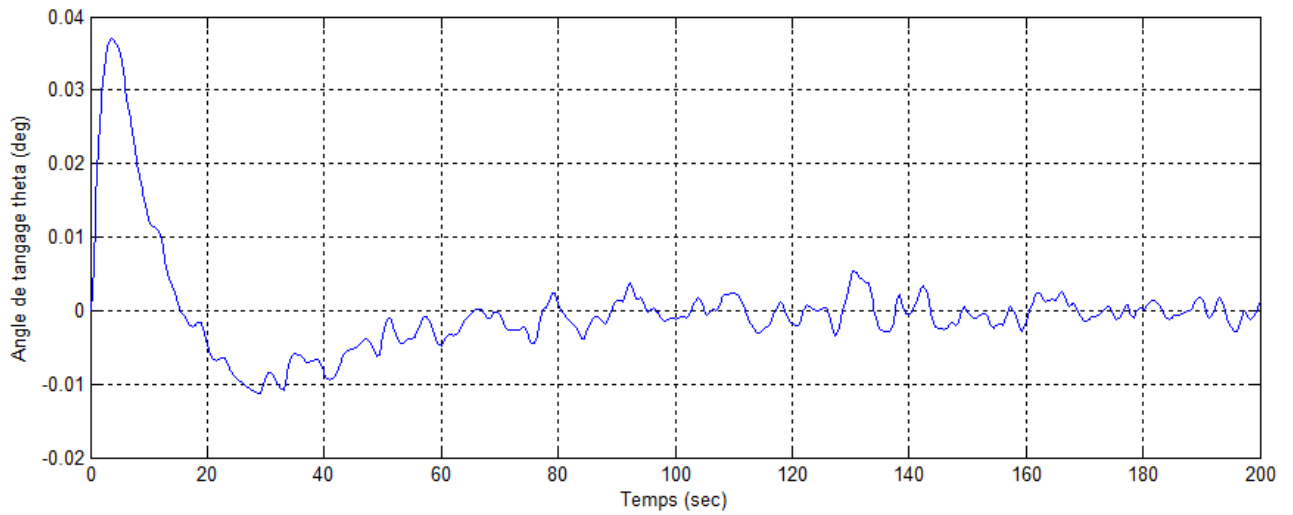


Figure 3.15 : Angle de tangage avec bruit

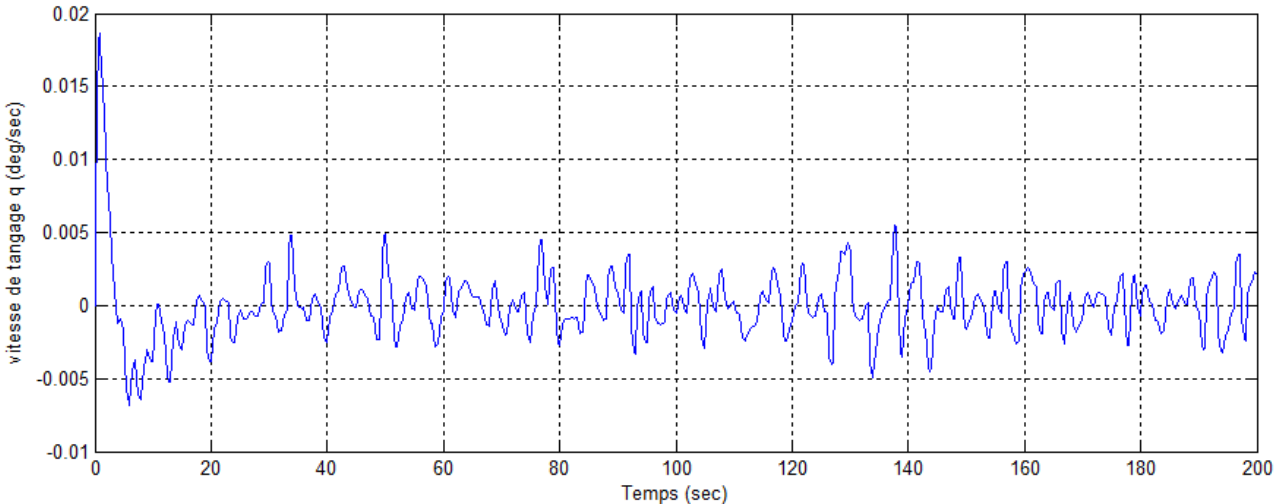


Figure 3.16 : Vitesse de tangage avec bruit

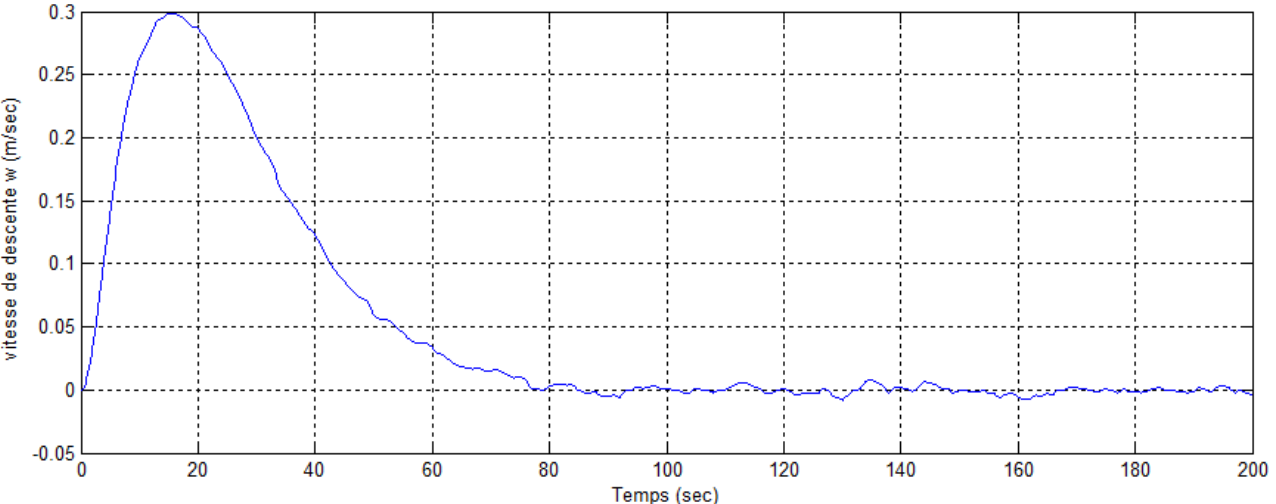


Figure 3.17 : Vitesse de descente avec bruit

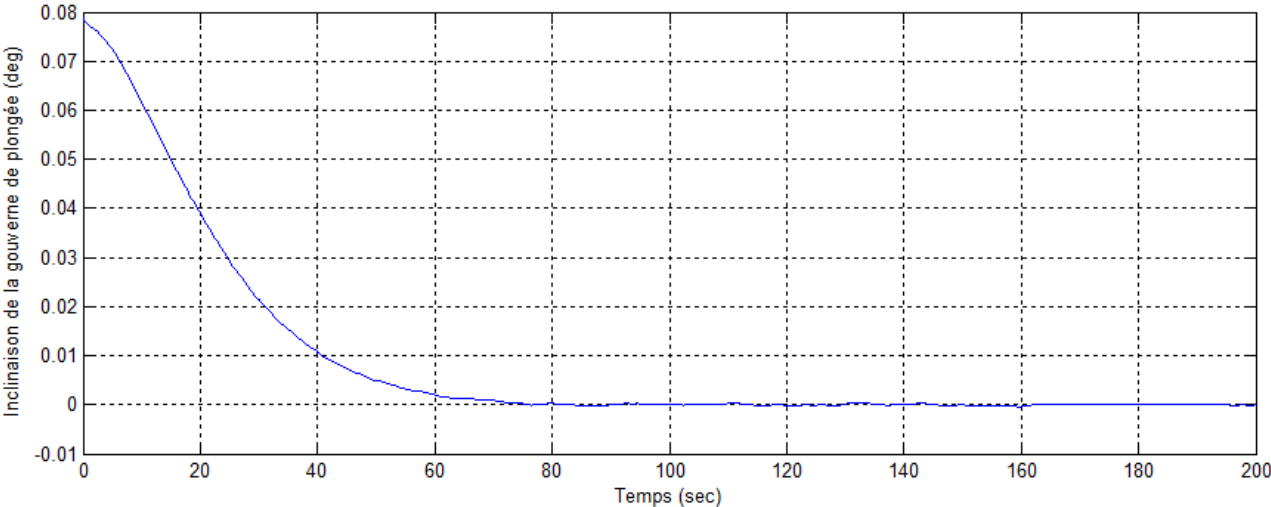


Figure 3.18 : Inclinaison de la gouverne de plongée avec bruit

Conclusion générale

Cette étude se situe dans le domaine de la commande des robots sous-marins autonome. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux méthodes les plus utilisées au niveau de l'industrie et des instituts de recherche. Cette méthode est la commande Backstepping.

Les incertitudes paramétriques et les perturbations sont les principales difficultés dans le contrôle des systèmes sous-marins autonome. Des nombreuses solutions ont été développées par les chercheurs de façon à être robustes vis à vis de ces problèmes. La plupart d'entre elles sont basées sur des méthodes PID et commande par régime glissant d'ordre un. Les commandes Backstepping 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. Dans le chapitre 03 les propriétés de la commande Backstepping ont été développées. Les techniques Backstepping ont démontré leur efficacité pour la commande des véhicules sous-marins.

L'objectif principal de ce mémoire est l'utilisation des techniques Backstepping, pour la commande de robot sous-marine autonome. Ces techniques sont efficaces pour la commande de ces systèmes. Dans les prochaines années le recours aux backstepping pour la commande de ces véhicules sera généralise du fait de leur efficacité et de leur relative simplicité d'implémentation.

Perspectives

En particulier les techniques de backstepping méritent d'être validées expérimentalement sur mer. Du fait que son comportement en simulation a été acceptable, et de que cette approche est une idée originale pour la commande des véhicules sous-marins.

Les perspectives que nous pourrions lister sont :

- Concevoir un algorithme de génération de trajectoires sous contraintes dynamiques.
- Pendant les simulations les valeurs désirées dominées avec l'indice d sont des échelons. Ce fait est dû aux besoins des trajectoires pour les missions du véhicule. Des résultats intéressants pourraient être obtenus, si on utilise des trajectoires désirées en fonction du temps.
- Utiliser un modèle non-linéaire moins simplifié, afin d'exploiter des forces de dissipation (forces d'amortissement) qui ont pour rôle une stabilisation naturelle de l'appareil.

Références bibliographiques

- [01] R. George, L. Gee, A. Hill, J. Thomson, and P. Jeanjean. Mapping the gulf of mexico with the hugin. *Underwater Magazine*, September / October, 2002
- [02] J. Kojima, Y. Kato, K. Asakawa, and N. Kato. Experimental results of autonomous underwater vehicle 'aqua explorer 2' for inspection of underwater cables. *MTS/IEEE OCEANS*, 1998.
- [03] A. Balasuriya and T. Ura. Underwater cable following by twin-burger 2. *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001.
- [04] J. O. Hallset. A prototype autonomous underwater vehicles for pipelines inspection. *MTS/IEEE OCEANS*, 1991.
- [05] J. Evans, Y. Petillot, P. Redmond, M. Wilson, and D. Lane. Autotracker : *Auv* embedded control architecture for autonomous pipeline and cable tracking. *MTS/IEEE OCEANS*, 2003.
- [06] J. Sup-Yoon, K. Yong-Park, Y. Soo-Park, W. Zin-Oh, and H. Suck-Cho. *Underwater wall-climbing robot design for decontamination of nuclear research reactor*. *World Automation Congress*, 1998.
- [07] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Baccou, and V. Creuze. *The odyssey of taipan exploring the ocean at goats 2000*. *GOATS 2000*. Saclantcen, La Spezia, 2000.
- [08] C. V. Alt. Remus 100 transportable mine countermeasurpackage. *MTS/IEEE OCEANS*, 2003.
- [09] P. E. Hagen and N. Størkersen. *The hugin 1000 autonomous underwater vehicle for military applications*. *MTS/IEEE OCEANS*, 2003.
- [10] F. Hover. *Autonomous underwater vehicles (auv's)*. Draft of Maneuvering Committee, 23rd. *Int. Towing Tank Conference*, Venice, Italy, 2002.
- [11] L. Fournet. *Positionnement d'engins autonomes grands fonds état de l'art et perspectives*. Technical report, Conservatoire national des arts et métiers école supérieure des géomètres et topographes, 2002.
- [12] J. Yuh. *Underwater robotic vehicles, design and control*. Editor Junku Yuh, Albuquerque New Mexico USA, 1995
- [13] 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, Thèse de l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, 1995.
- [14] R. L. Wernli. *Auv's the maturity of the technology*. *MTS/IEEE OCEANS*, 1999.
- [15] H. Kermorgan. *Les actionneurs pour véhicules sous-marins*. Technical Report 000.5.00.106, ECA, France, 1992.
- [16] M. Aucher. *Dynamique des sous-marins*. Sciences et techniques de l'armement, 1981.
- [17] T. I. Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Ltd, 1994

- [18] D. R. Yoerger, J. G. Cooke, and J-J. E. Slotine. *The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design*. IEEE journal of Oceanic Engineering, 15(3), 1990.
- [19] J. Healey, S. Rock, S. Cody, D. Miles, and J. Brown. *Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles*. IEEE journal of Oceanic Engineering, 20(4), 1995.
- [20] M. Sfakiotakis, D. Lane, and B. Davies. *Review of fish swimming modes for aquatic locomotion*. IEEE journal of Oceanic Engineering, 24(2), 1999.
- [21] K. Morgansen, V. Duindam, R. Mason, J. Burdick, and R. Murray. *Non-linear control methods for planar carangiform robot fish locomotion*. Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
- [23] SNAME. *Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid*. Technical Report No. I-5, Technical and research bulletin, The society of naval architects and marine engineers, New York, 1994.
- [24] W. Khalil and E. Dombre. *Modélisation identification et commande des robots*. 2^e édition. Hermes Science, 1999.
- [25] J. P. Perez. *Mécanique*. Masson, 1995.
- [26] J. Yuh. *Modeling and control of underwater robotic vehicles*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(6), 1990.
- [27] T. Prestero. *Verification of a six-degree of freedom simulation model for the remus autonomous underwater vehicle*. Master's thesis, Master thesis in mechanical engineering at Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [28] S. Ziani-Cherif. *Contribution à la modélisation, l'estimation des paramètres dynamiques et la commande d'un engin sous-marin*. PhD thesis, Thèse de docteur de l'Ecole Centrale de Nantes, 1998.
- [29] S. Chaouch and M-S. Naït-Saïd ; " Backstepping control design for position and speed tracking of DC motors " Asian journal of information technology, Medwell journals, 2006.
- [30] J.J. Slotine ; "Applied nonlinear control", Prentice Hall, 1991.
- [31] Yang Jun-hua, Wu Jie, Hu Yue-ming, "Backstepping method and its applications to nonlinear robust control", Control and Decision, Vol. 17 (suppl), pp. 641-653, 2002.
- [32] M.R Jovanovic, B. Bamieh, "Architecture Induced by Distributed Backstepping Design", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 52, Issue 1, pp. 108 – 113, January 2007.
- [33] Chiman Kwan, F. L. Lewis, "Robust Backstepping Control of Nonlinear Systems Using Neural Networks", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, Vol. 30, Issue. 6, pp. 753-766, November 2000.
- [34] Li Yahui, Liu Guozhong, Zhuang Xianyi and Qiang Sheng, "Adaptive backstepping control for induction motor based on neural networks and dynamic surface technique", Proceedings of IEEE Conference on Control Applications, , Vol. 2, pp. 826- 831, June 23-25, 2003
- [35] Z. C. Ji, Y. X. Shen, "Backstepping Position Control for Induction Motor based on Neural Network ", Proceedings of the 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications,

pp. 1- 5 , May 24-26, 2006 . IEEE Conference on Control Applications, , Vol. 2, pp. 826- 831, June 23-25, 2003.

[36] J. Soltani , R. Yazdanpanah, “Robust Backstepping Control of Induction Motor Drives Using Artificial Neural Networks”, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Power Electronics and Motion Control, Vol. 2, pp. 1-5, Aug 14-16, 2006.

[37] Hualin Tan and Jie Chang, “Field Orientation and Adaptive Backstepping for Induction Motor Control”, Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2357 – 2363, Oct 3-7, 1999.

[38] Sang Woo Nam, M. Nasir Uddin, “ Development of an Adaptive Backstepping Based Nonlinear Control of an Induction Motor Incorporating Iron Loss with Parameter Uncertainties”, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1662-1666, May 2006, Ottawa, Canada.

[39] Yaolong Tan, Jie Chang, and Hualin Tan, “Adaptive Backstepping Control and Friction Compensation for AC Servo With Inertia and Load Uncertainties”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, Issue. 5, October 2003.

[40] M. Nasir Uddin and Sang Woo Nam, “Adaptive Backstepping Based Online Loss Minimization Control of an IM Drive”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007 .

[41] Arbin Ebrahim and Gregory Murphy, “Adaptive Backstepping Control of a Speed- Sensorless Induction Motor under Time-Varying Load Torque and Rotor Resistance Uncertainty”, 39th Southeastern Symposium on System Theory, Mercer University Macon, GA, 31207, March 4- 6, 2007.

[42] Hou-Tsan Lee, Li-Chen Fu, Feng-Li Lian, “Sensorless Adaptive Backstepping Speed Control Of Induction Motor”, Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, Manchester Grand Hyatt Hotel San Diego, December 13-15, 2006, CA, USA.

[43] Yaolong Tan, Jie Chang, Hualin Tan, and Jun Hu, “Integral Backstepping Control and Experimental Implementation for motion system”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications Anchorage, September 25-27, 2000, Alaska, USA.

[44] Jen-te Yu, Jie Chang, “A New Adaptive Backstepping Design for Motion Control Systems”, The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (IECON '03). Vol. 1, pp. 140- 144, November 2-6, 2003.

[45] Abder Rezak Benaskeur, “ Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires ”, Thèse Ph.D, Université de Laval, 2000.

Annexe A

Description de robot sous-marin autonome de type torpille H160

Le robot autonome sous-marin H160 a été développé en collaboration par la société Eca-Hytec et par le Lirmm. C'est un véhicule de type torpille de petite taille et de faible coût dédié aux applications en eaux peu profondes, jusqu'à 160 mètres (Spiewak et al.,2006). Le véhicule mesure 1,80m de long pour un diamètre de 20cm et un poids de 50kg (Figure.A.1). Grâce à sa petite taille, les essais en mer demandent une logistique réduite au minimum à 2 personnes et un bateau à moteur. Le prototype est capable de réaliser une mission d'au moins 3 heures tout en maintenant sa vitesse à 3 nœuds. Sa flottabilité positive permet à la torpille de remonter à la surface après chaque fin de mission. Elle possède un propulseur arrière, une paire de gouvernes de cap et 2 paires de gouvernes de plongée situées à l'avant et à l'arrière du véhicule. Le véhicule H160 est alimenté par une batterie 48V/16Ah de type NiMH, dispose d'un moteur à courant continu 230W et de 4 servomoteurs 30N.cm pour le contrôle des gouvernes.

La capacité de la torpille à plonger de la surface tout en maintenant son angle de tangage quasi nul, grâce à sa paire de gouvernes de plongée avant, constitue la principale caractéristique de cet engin.

D'un point de vue matériel, ce robot dispose :

- Carte PC embarquée à base de Pentium III cadencé à 1.26 GHz
- Carte Wifi à 11 Mbits/s
- Carte Radio longue distance travaillant à 869.4 MHz
- Recalage en surface par GPS
- Mesure de la profondeur grâce à 2 capteurs de pression

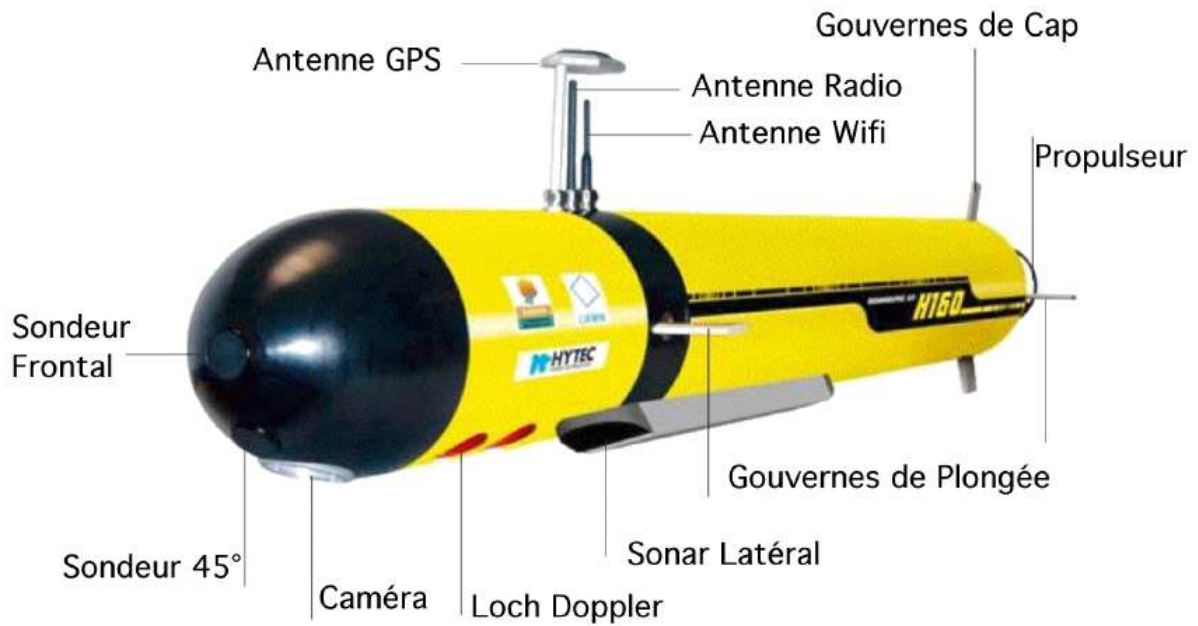


Figure A.1 : Vue générale du H160

- Mesure des angles d'inclinaison à l'aide d'un inclinomètre TCM2 et d'un magnétomètre 3 axes
- Loch Doppler RDI (mesure des vitesses linéaires par rapport au fond ou à l'eau)
- Modem acoustique de portée 2 – 3 km à 100 bits/s
- Mesure de la distance au fond à l'aide de 3 sondeurs (Murata).
- Sonar latéral
- Caméra digitale
- Capteur CTD (Conductivity Temperature Depth)
- Récupération en cas de perte à l'aide d'un goniomètre détectant la direction de signaux ultrasonores émis par un pinger fixé à l'arrière du véhicule



Figure A.2 : les essais du H160 en mer

Annexe B

Paramètres de Robot sous-marin autonome de type torpille H160

B.1. paramètres géométriques

Paramètres	Valeur	Unités	Description
r	0.10	m	Rayon
l	1.70	m	Longueur
m	50.7	Kg	Masse
V_{fl}	0.0508	m ³	Volume du solide

Tableau B.1 : Paramètres géométriques

B.2. Paramètres inertiels I_0 :

Paramètres	Valeur	Unités
x_G	-0.3558	m
y_G	+0.0007	m
z_G	+0.0175	m

Tableau B.2 : Centre de gravité

Paramètres	Valeur	Unités	Paramètres	Valeur	Unités	Paramètres	Valeur	Unités
I_{xx}	0.3034	Nms ²	I_{yy}	10.9004	Nms ²	I_{zz}	10.9004	Nms ²
I_{xy}	0.0000	Nms ²	I_{yx}	0.0000	Nms ²	I_{zx}	0.0000	Nms ²
I_{xz}	0.0000	Nms ²	I_{yz}	0.0000	Nms ²	I_{zy}	0.0000	Nms ²

Tableau B.3 : Paramètres inertiels

B.3. Calcul des paramètres hydrodynamique

Paramètre	Valeur	Unités	Description
$X_{\dot{u}}$	-5.07	Kg	Masse ajoutée
$Y_{\dot{v}}$	-50.07	Kg	Masse ajoutée
$Z_{\dot{w}}$	-50.07	Kg	Masse ajoutée
$K_{\dot{p}}$	-0.3034	Kgm ² /rad	Masse ajoutée
$M_{\dot{q}}$	-18.01905	Kgm ² /rad	Masse ajoutée
$N_{\dot{r}}$	-18.01905	Kgm ² /rad	Masse ajoutée

Tableau B.4 : Paramètres Masse ajoutées

Paramètres	Valeur	Unités	Paramètres	Valeur	Unités
X_{uu}	-4.00	Kg/m	Z_{uw}	-40.7502	Kg/m
Y_{vv}	-350.0	Kg/m	Z_{uq}	-37.3271	Kg/rad
Z_{ww}	-350.0	Kg/m	M_{uw}	10.2801	Kg
K_{pp}	-2.0	Kg.m ² /rad ²	M_{uq}	-34.1917	Kg.m/rad
M_{qq}	-200.0	Kg.m ² /rad ²	Y_{uv}	-40.7502	Kg/m
N_{rr}	-200.0	Kg.m ² /rad ²	Y_{ur}	+37.3271	Kg/rad
			N_{uv}	-10.2801	Kg
			N_{ur}	-34.1917	Kg.m/rad

Tableau B.5 : Paramètres des forces d'amortissements

Paramètre	Valeur	Unités	description
WW	510.8067	N	pois
BB	497.3670	N	Poussée d'Archimède

Tableau B.6 : Paramètres de pois et poussée d'Archimède

Paramètre	Valeur	Unités
x_B	-0.3454	m
y_B	+0.0003	m
z_B	+0.0031	m

Tableau B.6 : Paramètres de flottabilité

paramètre	valeur	unités	description
ρ	1025	Kg.m ³	Densité de l'eau de mer
g	9.81	m.seg ²	gravité

Tableau B.7 : Paramètres physique

Paramètre	valeur	unités	discription
S_s	0.004	m ²	Surface gouverne $S_s = b_s c_s$
λ_{s_e}	4.0278	m	Allongement effective de l'aile
γ_s	0.3490	m	Flèche de l'aile
e_s / c_s	5.5406	m	Epaisseur relative de l'aile
d_a	-0.80017	m	Distance de l'origine

Tableau B.8 : Paramètres de gouvernes

paramètre	valeur	unités	description
D_p	0.1	m	Diamètre de l'hélice
Ct_0	0.50539		constante
Ct_1	-0.088971		constante
Ct_2	-0.22960		constante
Ct_3	0.046836539		constante

Cq_0	0.090271		constante
Cq_1	-0.01347		constante
Cq_2	-0.023529		constante
Cq_3	-0.002005		constante

Tableau B.10 : Paramètres du propulseur

B.4. Modèles Numériques

Les modèles sont calculés pour une vitesse $V_S = 1.5m/s$.

B.2.1. Modèle en cap

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}V_S & c_{12}V_S & 0 \\ c_{21}V_S & c_{22}V_S & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1V_S^2 \\ d_2V_S^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c \quad (\text{B.1})$$

Coefficients	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	D_1	D_2
Valeur	-0.188	-0.328	-1.041	-0.533	0.208	-0.583

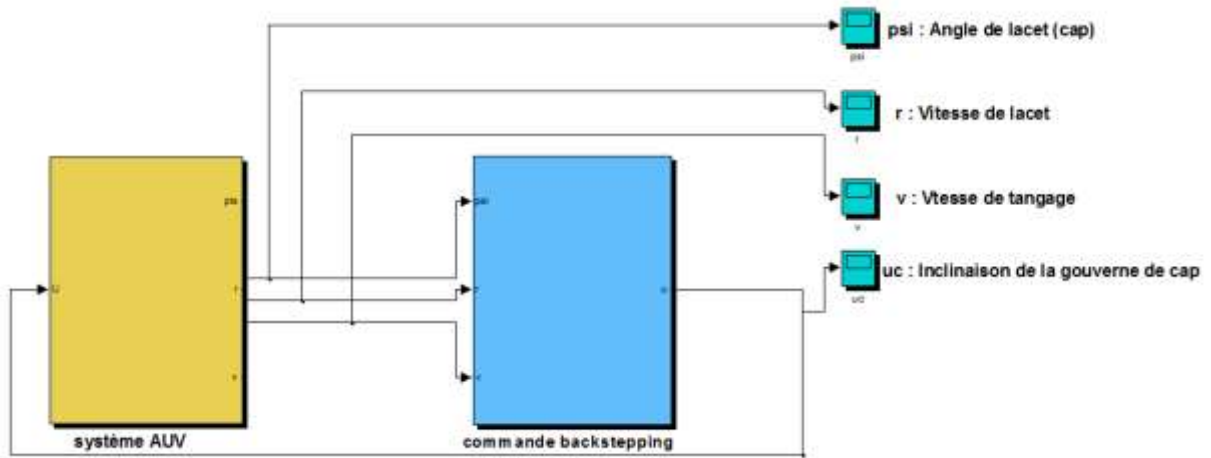
Tableau B.11 : Paramètres géométrique de cap

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}V_S & a_{12}V_S & 0 & 0 \\ a_{21}V_S & a_{22}V_S & a_{23}V_S & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_{43}V_S & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}V_S^2 & b_{12}V_S^2 \\ b_{21}V_S^2 & b_{22}V_S^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{lav} \\ \delta_{lar} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

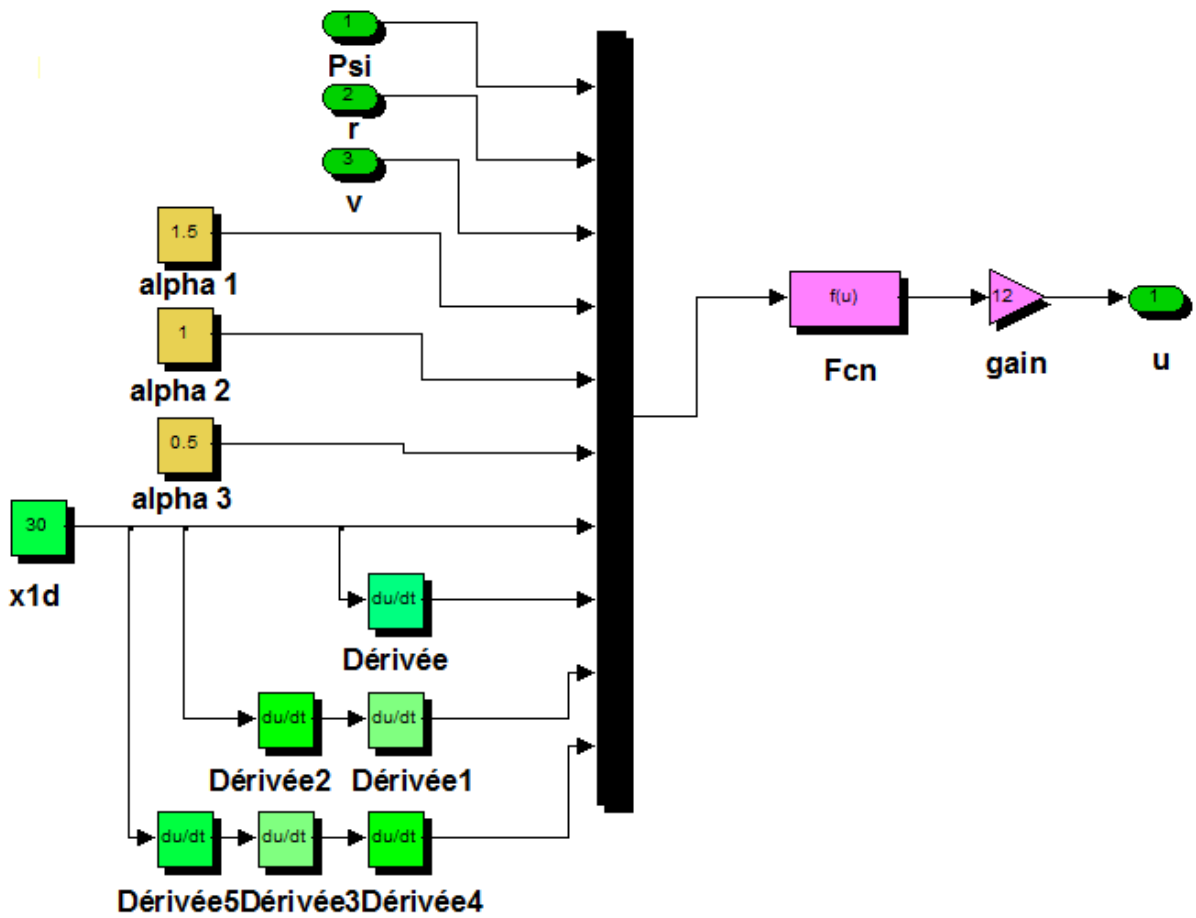
Coefficients	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{43}	B_{11}	B_{12}	B_{21}	B_{22}
Valeur	-0.118	0.328	1.042	-0.554	-0.248	1.5	0.044	-0.088	-0.293	-0.583

Tableau B.12 : Paramètres géométrique d'immersion

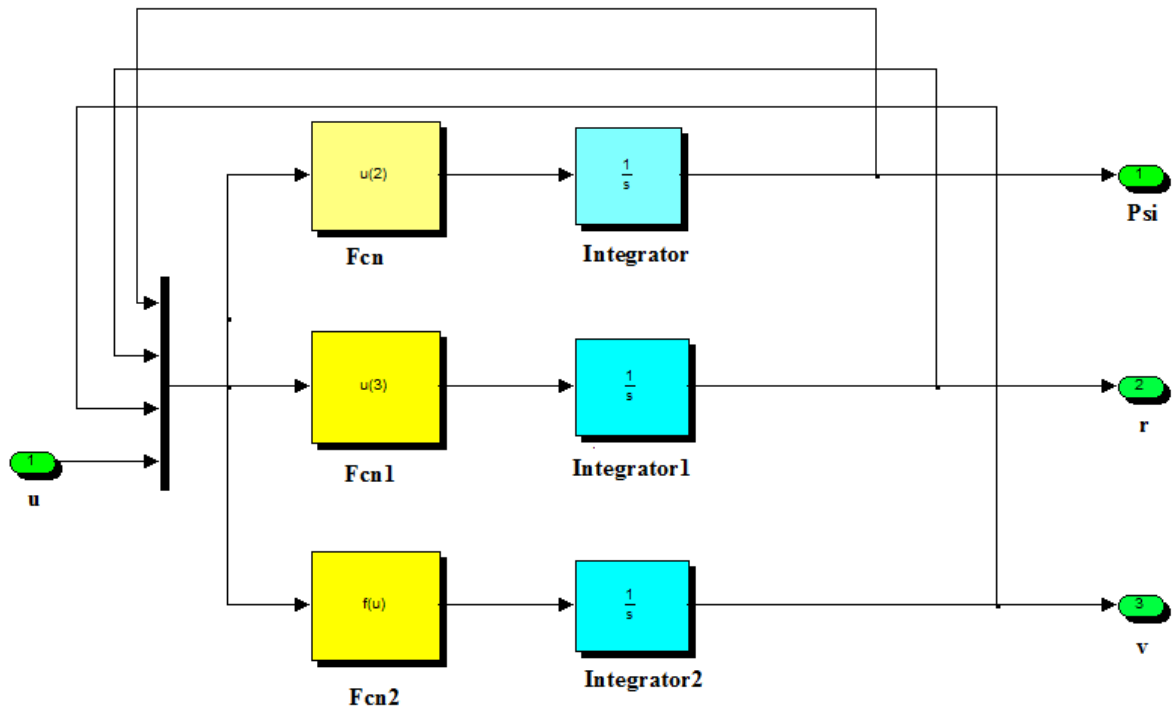
Annexe c



C.1 : Blocs de la simulation de la commande par backstepping de la torpille



C.2 : Commande backstepping



C.3 : Système AUV

« *Commande Backstepping d'un Robot Sous-marin Autonome* »

Ce travail de fin d'études aborde le sujet de la modélisation et la commande d'un robot sous-marin autonome. Nous présentons un état de l'art des véhicules sous-marins autonome est leurs applications. Nous établissons une équation générale du mouvement cinématique et dynamique, ensuite nous définissons les modèles dans les deux plans vertical et horizontal. Afin de commander le robot en plongée et en cap, nous proposons une loi de commande de type backstepping. Cette approche est employée pour la commande des systèmes sous-marins, au vue de ses propriétés de robustesse sur les incertitudes paramétriques et les perturbations. Afin d'évaluer la méthodologie de commande, des simulations sur le robot sont effectuées pour le mouvement dans les deux plans.

Mots-Clés : Commande des véhicules autonomes sous-marins, commande backstepping