



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
Mohamed Boudiaf
Faculté de Génie Électrique
Département d'Automatique



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

AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Intitulé :

Synthèse et implémentation d'une loi de
commande avancée sur un robot sous marin
d'observation.

Présenté par :

- M. RAHMOUN LOKMANE NOUR EL ISLEM
- M. KEBDANI OUSSAMA

Soutenue en : Juillet 2020

Devant le jury composé de :

Professor. Omari Abdelhafid	Président
Mr. Belherazem Adel	Examinateur
Mr. LAIDANI	Encadreur

Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier toute l'équipe pédagogique de l'université MOHAMED BOUDIAF d'ORAN et les intervenants professionnels responsables de notre formation. Nous remercions également le directeur de notre mémoire Mr LAIDANI. A pour ses conseils durant toute la période de réalisation du projet. Nous sommes très honoré que Monsieur Omari Abdelhafid et Monsieur Belherazem Adel ont accepté d'être nos jurys et examiner notre travail. Nos remerciements sont aussi adressés à nos parents pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Table des Matières

1 Etat de l'Art	3
1.1 Introduction	4
1.2 Classification des véhicules sous-marins	4
1.2.1 Les véhicules sous-marins habités	5
1.2.2 Les véhicules sous-marins non habité	7
1.2.3 Les UUVs (Unmanned Underwater Vehicles)	8
1.2.4 Le planeur (Glider)	9
1.2.5 Le Deep-Tow	10
1.2.6 Les véhicules sous-marins téléopérés (ROV)	11
1.2.7 Domaines d'utilisation des ROVs	11
1.3 Classification standard des ROVs [1]	12
1.4 classification des ROVs selon leur taille et capacité [2]	13
1.5 Remotly Operated Crawler ROC	17
1.5.1 Introduction	17
1.5.2 Définition du ROC	17
1.5.3 Différence entre le ROV et le ROC	17
1.5.4 Système de manoeuvre	18
1.5.5 Roc avec pneu	19
1.5.6 Roc avec ceinture	20
1.5.7 Roc omnie roue	22
1.6 conclusion	22
2 Modélisation mathématique du ROV	23
2.1 Introduction	24
2.2 Modélisation général d'un ROV	24
2.3 Définition des variables	24
2.3.1 Modèle cinématique	26
2.3.2 Modèle dynamique	27
2.3.3 Inertie et masses ajouté	30
2.4 Amortissement hydrodynamique	31
2.4.1 La détermination des coefficients d'amortissement hydrodynamique	32
2.4.2 Coefficients d'amortissement pour le mouvement longitudinal	33
2.4.3 Coefficients d'amortissement pour le mouvement latéral	34
2.4.4 Coefficients d'amortissement pour le mouvement vertical	34
2.4.5 Coefficients d'amortissement du roulis	35
2.4.6 Coefficients d'amortissement du tangage	36
2.4.7 Coefficients d'amortissement du Lacet	37

2.4.8	Détermination de la Matrice d'inertie du système et la matrice des forces de Coriolis et centrifuges	37
2.4.9	Force de gravité et de flottabilité	39
2.4.10	Matrice de configuration des propulseurs	40
2.4.11	Matrice d'inertie des masses ajoutées et matrice des forces et moments des masses ajoutées	41
2.5	Conclusion	42
3	Identification du propulseur sous-marin et comportement en boucle ouverte	43
3.0.1	Introduction	44
3.0.2	Arduino Uno	44
3.0.3	Esc	45
3.0.4	Moteur BLDC	46
3.0.5	HX711	46
3.0.6	Gauge de contrainte	47
3.0.7	Résultat Pratique :	48
3.0.8	PWM	49
3.1	Représentation du modèle sous Matlab Simulink	51
3.1.1	Conclusion	56
4	La commande du ROV	57
4.1	Introduction	58
4.2	Le PID	58
4.2.1	Introduction	58
4.2.2	Définition du contrôleur PID (proportionnel-intégral-dérivé)	58
4.2.3	Caractéristiques des contrôleurs P, I et D	59
4.3	Implémentation du PID dans simulink	59
4.3.1	Correcteur Vitesse	59
4.3.2	Correcteur position longitudinal nx	61
4.4	Le PID fractionnaire	64
4.4.1	Introduction	64
4.4.2	Le contrôleur fractionnaire $PI^{\lambda}D^{\mu}$	64
4.4.3	Critères de réglage du FOPID par algorithmes d'optimisations [3]	66
4.5	Water cycle algorithm (WCA)	66
4.6	Neural network algorithm (NNA)	67
4.7	Genetic algorithm (GA)	67
4.7.1	Comparaison entre les trois méthodes d'optimisation	67
4.8	Implémentation du $PI^{\lambda}D^{\mu}$ fractionnaire dans Simulink	69
4.8.1	Correcteur vitesse	69
4.8.2	Correcteur position	71
4.9	La commande par mode glissant	75
4.9.1	Introduction	75
4.9.2	Définition de la commande par mode glissant	75
4.9.3	Principe de fonctionnement [4]	75
4.9.4	Phénomène de réticence (Chattering)	76
4.9.5	Synthèse de la loi de commande	77

4.9.6	Solutions pour atténuer le phénomène de réticence	78
4.9.7	Conclusion	82
4.10	Test et analyse des lois de commande	83
4.10.1	Introduction	83
4.10.2	Incertitude des paramètres	83
4.10.3	Perturbation extérieur	85
A	Identification du propulseur sous-marin et comportement en boucle ouverte	89
B	Modélisation mathématique du ROV	92
C	La commande du ROV	94

Table des figures

1.1	Classification générale des véhicules sous- marins.	5
1.2	Sous-marin habité civile (A) [5]. et un sous-marin habité militaire (B) [6].	6
1.3	Le Nautile, sous-marin d'intervention, 1984 [7].	6
1.4	submersible chinois habité des eaux profondes [8].	7
1.5	Sous-marin des grands fonds avec bras robotisés [9].	7
1.6	les différents types des véhicules non habité. [4]	8
1.7	la nouvelle génération REMUS 100 AUV. [10]	8
1.8	Exemple d'un UUV militaire. [11]	9
1.9	Le déplacement du planeur en modifiant sa flottabilité [12].	10
1.10	Un planeur (Seaglider) à la surface entre les plongées [13]	10
1.11	Deep Tow EdgeTech's 2400. [14]	11
1.12	Sea dragon ROV d'inspection. [15]	11
1.13	schéma de la classification des ROVs.	13
1.14	Micro ROV. [16]	14
1.15	MINI ROV. [17]	14
1.16	ROV générale. [18]	15
1.17	ROV d'inspection polyvalente - ROHP II. [19]	15
1.18	ROV travail léger présenté par deep ocean. [20]	15
1.19	ROV de travail lourd. [21]	16
1.20	ROV de tranchée. [22]	16
1.21	Classification des ROCs selon selon la roue de chenille	18
1.22	The Little Benthic Crawler rov .[23]	19
1.23	The Little Benthic Crawler en mode attachement .[23]	19
1.24	ECA Hytec Roving BAT .[24]	20
1.25	les caractéristiques du ECA Hytec Roving BAT .[25]	21
1.26	Roving BAT montrant la fonction Auto Docking .[25]	21
1.27	The Omni-Crawler .[26]	22
2.1	Système de cordonné utilisé dans le ROV en cours de réalisation.	25
2.2	Rotation de coordonnées cartésiennes 3D (Euler). [27]	26
2.3	amortissement hydrodynamique de véhicule sous-marin pour des petites et grandes vitesses. [28]	32
2.4	Analyse CFD par solidworks.	33
2.5	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données de la force d'amortissement selon x.	33
2.6	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données de la force d'amortissement selon y.	34
2.7	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données de la force d'amortissement selon z.	35

2.8	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données du moment d'amortissement du roulis.	35
2.9	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données du moment d'amortissement du tangage.	36
2.10	les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données du moment d'amortissement du lacet.	37
2.11	Paramètres géométriques des propulseurs verticaux F3 et F4.	40
2.12	Paramètres géométriques des propulseurs horizontaux F1 et F2.	40
3.1	La procédure de la caractérisation du propulseur	44
3.2	Description des entrées/sorties de la carte Arduino Uno. [29]	45
3.3	Vue réel d'un ESC	45
3.4	Vue réel du BLDC	46
3.5	Vue réel du HX711	46
3.6	Gauge de contrainte 5kg	47
3.7	Banc d'essai du test du propulseur.	47
3.8	Variation du Thrust(N) selon le signal PWM.	48
3.9	Signal pwm	50
3.10	Bloc d'entrée dans simulink	50
3.11	Variation du Force(N) selon le signal PWM.	51
3.12	Modèle générale du ROV.	52
3.13	Modèle du ROV réalisé	52
3.14	Modèle générale du ROV dans SIMULINK	53
3.15	vitesses linéaires et angulaires pour le test 1er cas.	54
3.16	vitesses linéaires et angulaires pour le test 2ème cas.	54
3.17	vitesses linéaires et angulaires pour le test 3ème cas.	55
3.18	vitesses linéaires et angulaires pour le test 4ème cas.	55
4.1	Un schéma fonctionnel d'un contrôleur PID dans une boucle de contrôle . [30]	58
4.2	Schéma bloc de la synthèse du régulateur vitesse Vx.	59
4.3	Réponses indicielles avec contrôleur vitesse.	60
4.4	Schéma bloc de la synthèse du régulateur position nx.	61
4.5	Réponses indicielles des positions par PID.	61
4.6	Modèle du ROV avec le bloc F to PWM	62
4.7	Relation entre force et PWM	62
4.8	Trajectoire selon x.	63
4.9	Trajectoire selon y.	63
4.10	Trajectoire selon z.	63
4.11	Vue 3d de la trajectoire selon x,y et z	64
4.12	Contrôleur PID et PID fractionnaire. [31]	65
4.13	Contrôleur PID à commande fractionnée (b) La convergence du contrôleur PID fractionnaire.[32]	65
4.14	Le water cycle algoritm. [33]	66
4.15	Comparaison entre les trois méthodes d'optimisation.	68
4.16	Schéma bloc de la synthèse du correcteur fractionnaire de la vitesse Vx.	69
4.17	les réponses de vitesse contrôlé par FOPID	70
4.18	Schéma bloc de la synthèse du correcteur fractionnaire de la position nx.	71
4.19	Réponses indicielles de la commande des positions par FOPID	71

4.20 Modèle du ROV avec bloc F vers PWM	72
4.21 Trajectoire selon x	73
4.22 Trajectoire selon y	73
4.23 Trajectoire selon z	73
4.24 Trajectoire selon x,y et z	74
4.25 Convergence du système glissant	76
4.26 Phénomène de la réticence (chattering) .[4]	76
4.27 fonction sat(s) et sign(s)	78
4.28 Position selon x avec chattering	78
4.29 Position selon x avec chattering éliminé	79
4.30 les réponses de position contrôlées par mode glissement	80
4.31 Trajectoire selon x	81
4.32 Trajectoire selon y	81
4.33 Trajectoire selon z.	81
4.34 Vue 3d de la trajectoire.	82
4.35 réponses obtenues par PID pour le 2ème scénario	83
4.36 réponses obtenues par FOPID pour le 2ème scénario	84
4.37 réponses obtenues par SMC pour le 2ème scénario	84
4.38 réponses obtenues par PID pour le 3ème scénario	85
4.39 réponses obtenues par FOPID pour le 3ème scénario	86
4.40 réponses obtenues par SMC pour le 3ème scénario	86
A.1 Modèle ROV avec entrée PWM	90
A.2 Design du ROV.	91
C.1 Modèle ROV avec SMC	95
C.2 Un organigramme pour l'algorithme d'optimisation WCA.[34]	96
C.3 Algorithme NNA. [35]	97
C.4 La procédure du Genetic Algorithme (GA).[36]	98

Liste des tableaux

1.1	comparaison entre ROC et ROV [37]	17
1.2	Avantages et Désavantages selon le type de chenille de roue.[37]	18
2.1	les coefficients d'amortissement du mouvement longitudinal.	34
2.2	les coefficients d'amortissement du mouvement latéral.	34
2.3	les coefficients d'amortissement du mouvement vertical.	35
2.4	les coefficients d'amortissement du roulis.	36
2.5	les coefficients d'amortissement du tangage.	36
2.6	les coefficients d'amortissement du lacet.	37
2.7	Coordonnées du centre de flottabilité et de gravité	39
3.1	Signal PWM et son équivalent en Kg et en N.	49
3.2	Scénarios pour ROV en Boucle Ouverte.	53
4.1	Caractéristiques des contrôleurs P, I et D	59
4.2	Comparaison entre GA, WCA et NNA	68
4.3	Résultats obtenus par les trois contrôleurs	85
B.1	Paramètres hydrodynamiques	93
B.2	Moments et inerties	93
B.3	Centre de gravité et de flottabilité	93

Introduction générale

Il n'y a aucun doute sur l'accélération du rythme des développements et des découvertes scientifiques qui ravageraient les constantes admises et les faits établis, d'une manière qui changerait les caractéristiques des phénomènes futurs. À mesure que les défis augmentent et que leur nature change, affectant les individus, les sociétés et les nations ; les centres de recherche ont tendance à anticiper les caractéristiques des développements et les futurs défis.

Parmi les problèmes rencontrés dans notre siècle l'augmentation de la consommation des ressources énergétiques et la diminution des ressources d'eau ce qui à entraîner l'augmentation des nombres de barrages, pour différentes raisons (production électrique, eau potable, aquaculture ...).

Les barrages et les structures marines en général nécessitent de l'entretien et de l'inspection ce que conduit à l'augmentation des recherches dans le domaine des drones sous-marins.

Les drones ont d'abord été conçus pour inspecter les fonds marins, les réseaux et structures sous-marines ou les zones difficiles d'accès. Ils permettent :

- la réalisation de photographie sous-marine (photos et vidéos).
- L'inspection des portes, canalisations, bateaux de plaisance, industries de l'eau (châteaux d'eau, barrages, ponts, barrages, canalisations, etc.), aquaculture.
- Utilisé dans les recherches archéologiques sous-marines.
- l'inspection des débris, l'environnement est autant de domaines qui constituent le besoin d'inspection sous-marine.

Les drones sont utilisés aussi pour l'observation telle que:

- L'exploration des lacs, rivières et eaux côtières.
- Le teste de la sécurité de l'eau avant qu'un plongeur n'entre dans l'eau lors de missions.

Généralement les drones sous-marins peuvent être classifié selon leur degré d'autonomie parmi ces drones on a les AUVs et les ROVs. Les véhicules sous-marins télécommandés (ROV) qui sont exploités par un opérateur humain à distance, et les véhicules sous-marins autonomes (AUV) fonctionnent de manière autonome via une intervention humaine directe.

Tenu de la grande diversité climatique de la répartition inégale des ressources en eau au niveau national, l'Algérie doit relever de nombreux défis pour répondre aux besoins palliés les manques dans certaines régions et prévenir les risques d'inondations. C'est pour cela l'Algérie à investir dans le développement des barrages cela implique la nécessité du développement des robots sous-marin par les universités algériennes. Par exemple avec un sous-marin équipé d'un échosondeur il va permet d'actualiser les capacités des barrages et comprendre le phénomène de vase cela va permet de gagner le temps et l'argent.

Notre but principal dans cette mémoire est de construire un véhicule (robot) sous-marin pour des missions de surveillance (Observation Class ROV). Il doit être à faible

coût (low-cost), de petite taille (Small Size) avec des performances élevées (High performances). Il doit être aussi hybride : téléopéré et autonome (ROV and AUV).

Notre robot sous-marin est caractérisé par:

- Il peut atteindre 100 mètres de profondeur,
- 1 ou 2 caméras de haute définition (Full Hd),
- Petite taille et Poids léger,
- Système embarqué (électronique) : Raspberry Pi, Arduino, contrôleur électroniques de vitesse (ESC), capteurs de profondeur, ...
- Système mécanique : Châssis (PEHD, PMMA), propulseurs (with BLDC), étanchéité du système embarqué.

La réalisation de ce projet est effectuée dans le laboratoire AVCIS (salle 8114) par une équipe divisée sur trois groupes :

- Un électromécanicien pour l'étude et la conception mécanique.
- Le deuxième groupe pour l'instrumentation et la programmation .
- Le troisième groupe pour La commande.

Notre tâche dans cette mémoire et de faire une synthèse et une implémentation d'une loi commande pour un robot sous-marin d'observation.

Dans ce manuscrit on va faire une étude en utilisant trois lois de commande le PID ensuite le PID fractionnaire et enfin le mode glissant.

Après l'interprétation des résultats on va choisir la meilleure loi de commande pour l'implémenter dans notre ROV.

Cette mémoire est structurée sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre est un état de l'art sur les sous-marins en détaillant les différents types des drones sous-marins.
- Le deuxième chapitre est une modélisation mathématique du notre modèle.
- Dans le troisième chapitre on va faire un test réel du propulseur dans un banc d'essai et on va commencer les simulations sur Matlab du notre modèle en boucle ouverte.
- Le quatrième chapitre est consacré pour la commande on va introduire un contrôleur PID en déterminant leurs paramètres par le tune ensuite par les méthodes d'optimisation. Après l'interprétation des résultats on va introduire le contrôleur généralisé du PID qui est le PID fractionnaire.
Enfin on va introduire la commande par mode glissant.

Chapitre 1

Etat de l'Art

1.1 Introduction

Dans ce chapitre on va établir un état de l'art sur les différents véhicules sous-marins, on les définit d'une façon généralisée en précisant ses classifications. Se chapitre se conclut par les robots sous- marin téléopéré ce qui est notre sujet majeur d'étude.

1.2 Classification des véhicules sous-marins

Le développement des robots sous-marin est devenu un travail révolutionnaire qui occupe différents domaines dans notre vie. Avec la croissance d'opérations sous-marines dans le domaine d'inspection de la structure des barrages et l'exploitation minière et pétrolière sous-marine, la robotique se développe rapidement. L'augmentation de l'exploration et la surveillance de la sécurité des lacs, des rivières et de la mer tant dans les applications commerciales que scientifiques, ont conduit de grandes entreprises et centres de recherche à investir dans le développement de véhicules sous-marins [38]. Les ROVs d'observation sont utilisé pour explorer les lacs, les rivières et les eaux côtières. Ils sont souvent utilisés pour tester la sécurité de l'eau avant qu'un plongeur n'entre dans l'eau lors de missions. Pouvant être équipés de sonars et de capteurs personnalisés, ce sont des véhicules polyvalents [39].

On peut classer les véhicules sous-marins dans deux classes principales:

- Les sous-marins habités.
- Les sous-marins non habité.

Le schéma de la Fig. 1.1 résume cette classification en citant les différents types de ses sous-marins:

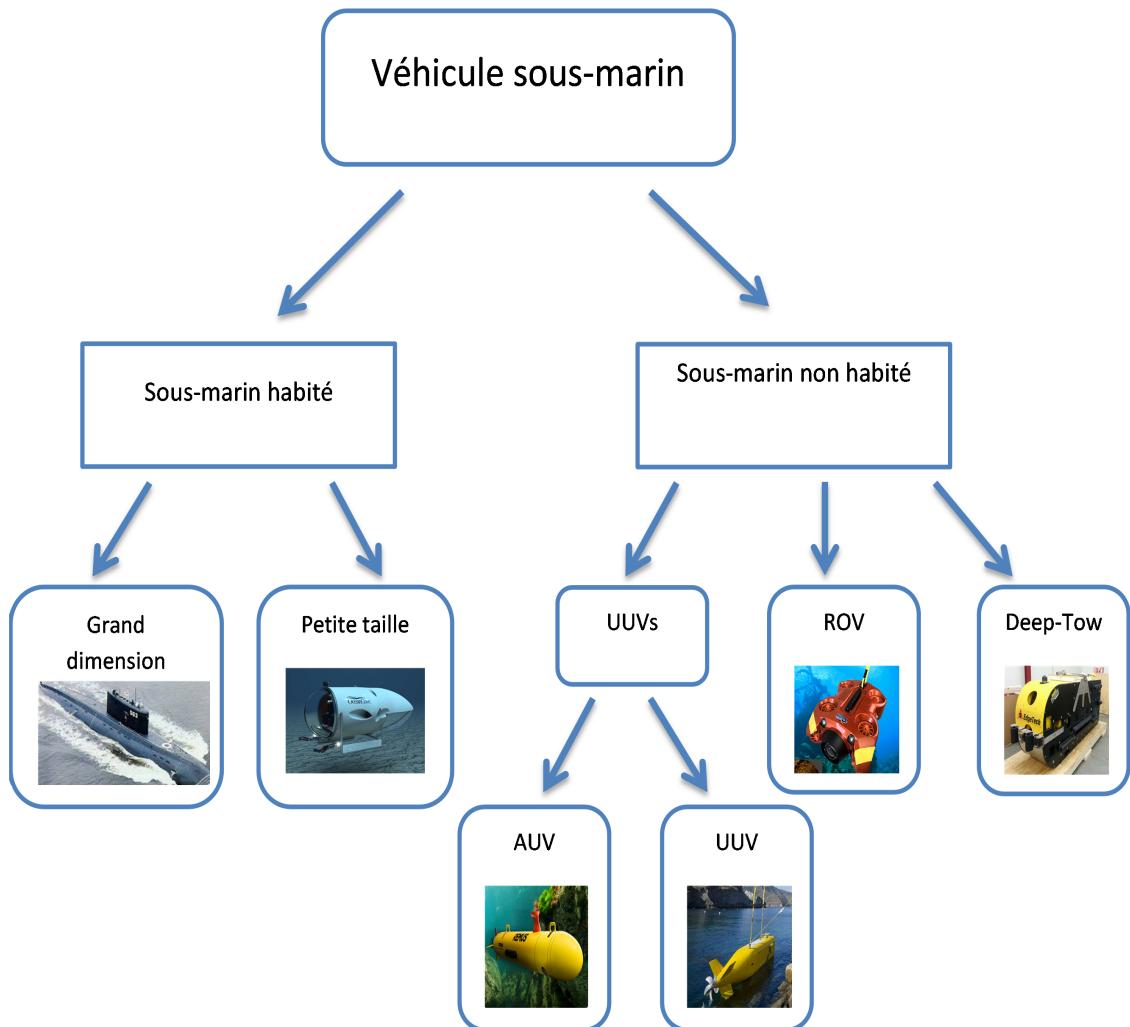


Figure 1.1 – Classification générale des véhicules sous- marins.

Nous allons maintenant passer à une présentation détaillée des différents types des véhicules sous- marins, on va commencer par les véhicules sous-marins habités ensuite les non habité.

1.2.1 Les véhicules sous-marins habités

On a 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 (Fig. 1.2A). Cette catégorie comprend les sous-marins militaires (Fig. 1.2B).



(A)



(B)

Figure 1.2 – Sous-marin habité civile (A) [5]. et un sous-marin habité militaire (B) [6].

— Les submersibles, qui sont de petite taille destinées à l'exploration des grandes profondeurs. L'équipage de ce type d'engin est réduit (2 à 3 personnes) et la quantité en oxygène est limitée. Par exemple, le nautile a été conçu par l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) en 1984 [40].

**Figure 1.3** – Le Nautile, sous-marin d'intervention, 1984 [7].

La figure (Fig.1.3) expose le nautile, c'est un sous-marin habité conçu pour l'observation et l'intervention jusqu'à des fonds de 6000 mètres. Il contient un propulseur axial orientable. Une propulsion auxiliaire avec deux propulseurs verticaux et un propulseur transversal à l'avant et l'autre à l'arrière. Son autonomie peut atteindre 5 heures [7].



Figure 1.4 – submersible chinois habité des eaux profondes [8].

La figure (Fig. 1.5) présente le Cyclops, il sera le premier sous-marin pouvant explorer les grands fonds dont la coque est uniquement composée de fibre de carbone et de verre. Il disposera également de deux bras robotisés [9].

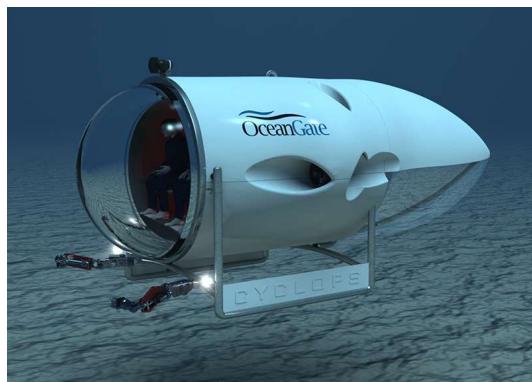


Figure 1.5 – Sous-marin des grands fonds avec bras robotisés [9].

1.2.2 Les véhicules sous-marins non habité

Tout type de véhicule capable de fonctionner sous l'eau sans équipage humain. Ceux-ci peuvent tomber dans deux classifications, les véhicules sous-marins télécommandés (ROV), qui sont exploités par un opérateur humain à distance, et les véhicules sous-marins autonomes (AUV), qui fonctionnent de manière autonome via une intervention humaine directe. Cette dernière classification est considérée comme un type de robot. Selon le type de liaison avec la surface on peut définir l'autonomie de ce robot, on peut distinguer trois catégories de ces véhicules: les véhicules reliés par un câble à la surface, ceux reliés par un lien acoustique et enfin les véhicules complètement autonomes [41]. La figure (Fig. 1.6) nous présentons les différentes classifications des véhicules sous-marins non habité selon le niveau d'autonomie.

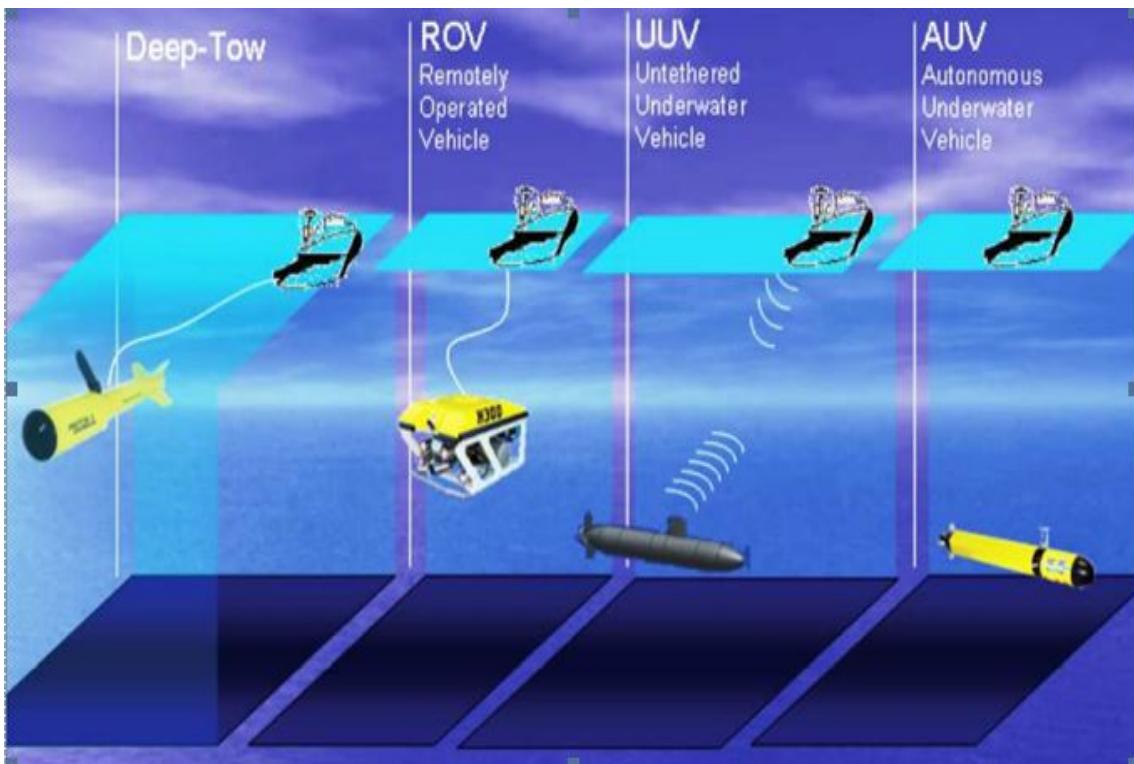


Figure 1.6 – les différents types des véhicules non habité. [4]

1.2.3 Les UUVs (Unmanned Underwater Vehicles)

Ses engins non habité sans classifier selon le degré d'autonomie, Il existe deux types des UUVs :

Les véhicules sous-marins autonomes (AUV)

C'est un engin qui connaît sa position et naviguent vers un objectif défini. On établit une liste des opérations à réaliser et on les programme préalablement. Les opérateurs n'interviennent pas en fonctionnement nominal, l'engin est totalement autonome [42].



Figure 1.7 – la nouvelle génération REMUS 100 AUV. [10]

les UUVs (Untethered Underwater Vehicle)

Ces véhicules ont le même principe de fonctionnement comme les AUV la seule différence c'est le type de liaison avec la surface. Il existe un lien acoustique avec la surface permettant la vérification et l'échange des données. En cas de problèmes, l'opérateur peut intervenir pour que le système soumette une configuration d'urgence, impliquant son retour en surface [42].



Figure 1.8 – Exemple d'un UUV militaire. [11]

1.2.4 Le planeur (Glider)

Les planeurs sont un type de véhicule sous-marin robotisé utilisé pour mesurer des paramètres océanographiques tels que les niveaux de chlorophylle, la température et la salinité, qui sont ensuite transmises au rivage. Ce sont des outils très efficaces pour recueillir des données de l'océan et transportent une grande variété d'instruments. [12]

Principe de fonctionnement du planeur

Un planeur utilise une pompe interne pour modifier sa flottabilité, lui permettant de se déplacer de haut en bas dans l'eau, alors que les véhicules robotiques conventionnels ou les véhicules sous-marins autonomes (AUV, tels que Autosub) sont entraînés par hélice. Le mouvement des poids interne d'avant en arrière permet au planeur de s'incliner pour plonger ou grimper dans la colonne d'eau. Comme un planeur aérien se déplaçant verticalement dans les airs, les planeurs sous-marins utilisent la portance générée par les ailes se déplaçant dans l'eau pour convertir la force verticale en mouvement vers l'avant[12].

La figure (Fig. 1.9) montre le principe du déplacement du planeur dans l'eau.

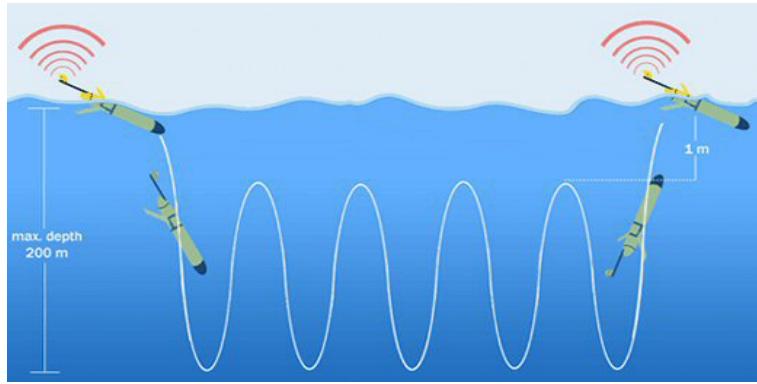


Figure 1.9 – Le déplacement du planeur en modifiant sa flottabilité [12].

Les planeurs sont équipés d'une boussole intégrée, qu'ils utilisent pour suivre un parcours. Les planeurs se déplacent très lentement, généralement à moins d'un mile par heure, mais peuvent maintenir cette vitesse pendant des mois. Les planeurs existent depuis environ 20 ans sous une forme ou une autre, conçus et construits par des universités et des instituts de recherche. Aujourd'hui, ils sont fabriqués et vendus par des entreprises aux États-Unis. La flotte de planeurs du NOC comprend des planeurs de deux fabricants: les planeurs Slocum de Teledyne Webb Research Corporation et les Seagliders de Kongsberg Underwater Technology Inc. Pour monter et descendre, le planeur ne modifie pas sa masse, mais en pompant un fluide (de l'huile dans ce cas) d'un réservoir interne vers une vessie souple externe, afin d'augmenter son volume. La densité d'un planeur dépend à la fois de sa masse et de son volume; en pompant de l'huile dans et hors de la vessie, le planeur est capable de se rendre alternativement plus dense et plus léger que l'eau environnante - le planeur peut descendre à une profondeur préprogrammée puis flotter vers la surface (voir Fig. 1.10) [12].



Figure 1.10 – Un planeur (Seaglider) à la surface entre les plongées [13] .

1.2.5 Le Deep-Tow

Le Deep-Tow est un système de lever des fonds océaniques profonds qui peuvent être équipés de sonars ou de caméras, remorqué dans l'eau à basse vitesse au bout d'un câble de plusieurs milliers de mètres de long.[43]

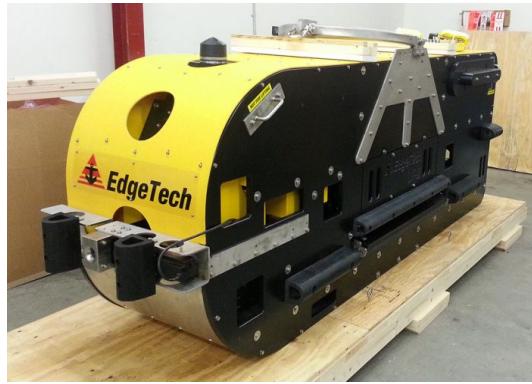


Figure 1.11 – Deep Tow EdgeTech's 2400. [14]

Missions du Deep-Tow [43]

- Relevé topographique des fonds océaniques, levé géologique (activités hydrothermales, etc.), des ressources et recherches océanographiques physiques.
- Relevé préliminaire avant une plongée sous-marine.
- Installation d'instruments d'observation.

1.2.6 Les véhicules sous-marins téléopérés (ROV)

Un ROV (remotely operated vehicle) c'est un sous-marin opéré à distance à l'intermédiaire d'un câble ombilical leur utilité est requise pour l'inspection de zone étroite ou escarpée où l'homme ne peut pas s'en approcher. Ces drones servent également pour la surveillance et l'entretien des coques des navires ou des installations industrielles immergées facilement accessibles. Selon la classification et les exemples d'utilisation cités ci-dessus, il est possible d'entrevoir la liste des domaines d'emploi des drones sous-marins. Pour une meilleure visibilité de leur fonction, il est préférable de scinder le secteur militaire, le secteur civil de recherche et le secteur civil industriel. [44]



Figure 1.12 – Sea dragon ROV d'inspection. [15]

1.2.7 Domaines d'utilisation des ROVs

Dans ce qui suit on va citer quelques domaines d'utilisation des ROVs dans les trois secteurs : militaire, secteur civil de recherche et secteur industrielle.

Pour le domaine militaire : [44]

- cartographie détaillées pour l'espionnage,
- détection et identification des navires, des bâtiments marins et des sous-marins,
- protection des ports militaires et des environnements portuaires,
- inspection des coques de navires et des sous-marins habités. Pour le domaine de la recherche : [44]
- cartographies des fonds marins,
- études océaniques : salinité, température, pression, bathymétrie, réflexion de la lumière, microbiologie sous-marine, faune, flore, capacité d'absorption du dioxyde de carbone, concentration des éléments chimiques, montée du niveau de la mer...
Pour le domaine industriel : [44]
- installations des canalisations sous-marines : gazoducs, oléoducs,
- réparation et maintenance de canalisations immergées,
- manutention, préhension et soudure à grande profondeur et haute pression,
- surveillance et entretien des plateformes pétrolières (corrosion, fissures),
- détection de minerai, de gaz naturel et de pétrole sous-marin,

1.3 Classification standard des ROVs [1]

Classe I - ROV d'observation (Observation ROVs): Ce sont de petits véhicules équipés de caméras / lumières et sonar uniquement. Ils sont principalement destinés à l'observation pure, bien qu'ils puissent être capables de gérer un capteur supplémentaire (tel qu'un équipement de protection cathodique (CP)), ainsi qu'une caméra vidéo supplémentaire.

Classe II - ROV d'observation avec option de charge utile (Observation ROVs with Payload Option): Ces véhicules sont équipés de série de deux caméras / sonar visualisable simultanément et sont capables de gérer plusieurs capteurs supplémentaires. Ils peuvent également avoir une capacité de manipulation de base. Ils doivent pouvoir fonctionner sans perte de leur fonction d'origine tout en portant deux capteurs / manipulateurs supplémentaires.

Classe III - Véhicules de la classe professionnelle (Work-Class Vehicles): Ces véhicules sont suffisamment grands pour transporter des capteurs et / ou des manipulateurs supplémentaires. Les véhicules de classe III ont généralement une capacité de multiplexage qui permet à des capteurs et des outils supplémentaires de fonctionner sans être «câblés» via le système ombilical. Ces véhicules sont généralement plus gros et plus puissants que les classes I et II. De larges variations de capacité, de profondeur et de puissance sont possibles.

Classe IV - Véhicules remorqués et rampant par le bas (Towed and Bottom-Crawling Vehicles): Les véhicules remorqués sont tirés dans l'eau par un engin de surface ou un treuil. Certains véhicules ont une puissance propulsive limitée et sont capables d'une manœuvrabilité limitée. Les véhicules rampant en bas utilisent une roue ou un système de chenilles pour déplacer sur le fond marin, bien que certains puissent «nager» sur des distances limitées. Ces véhicules sont généralement gros et lourds, et sont souvent conçus pour une tâche spécifique, telle que l'enfoncissement de câbles.

Classe V - Véhicules prototypes ou de développement (Prototype or Development Vehicles): Les véhicules de cette classe comprennent ceux qui sont encore en cours de développement et ceux considérés comme des prototypes. Les véhicules spéciaux qui ne rentrent pas dans l'une des autres classes sont également affectés à la classe V.

Cette classe comprend les véhicules sous-marins autonomes (AUV).

Le passage précédent était une classification standard des ROVs selon leur instrumentation, dans le passage suivant on va aborder une autre classification selon la taille et leur capacité.

1.4 classification des ROVs selon leur taille et capacité [2]

Cette classification peut être résumée dans le schéma suivant (Fig. 1.13) qui montre les ROVs de la petite taille jusqu'à la grande taille en spécifiant leur tâche principale.

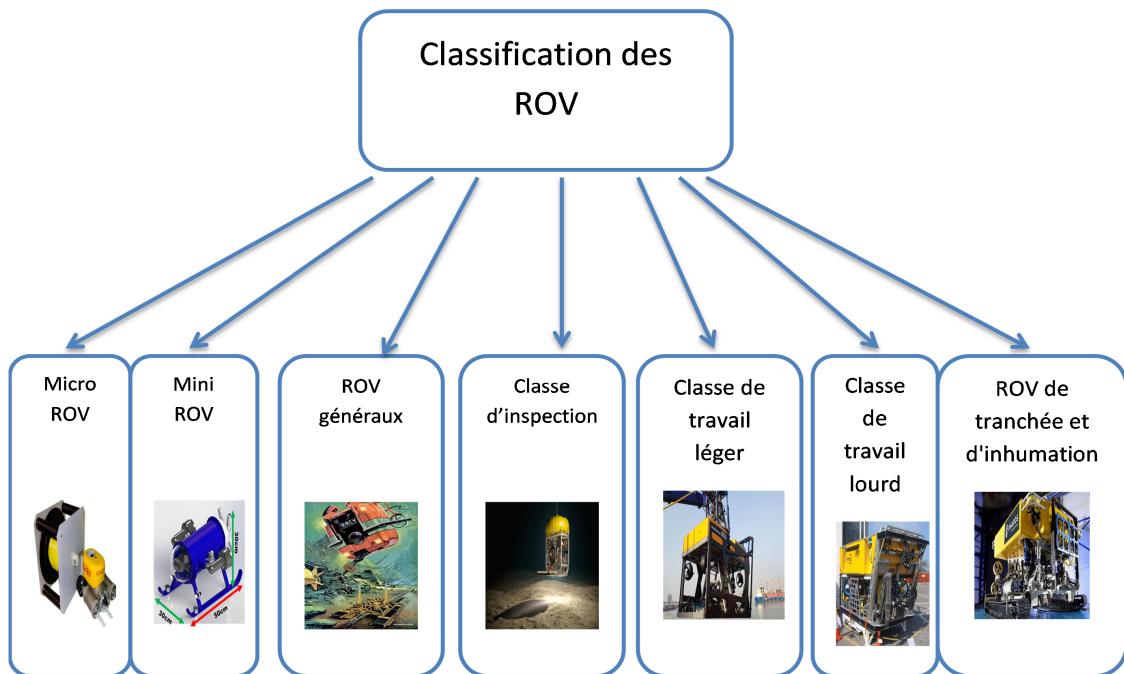


Figure 1.13 – schéma de la classification des ROVs.

Les ROVs sous-marins peuvent être distingués en différentes classes en évaluant leur poids, leur puissance, leurs capacités et leurs tailles.



Figure 1.14 – Micro ROV. [16]

Le micro ROV (Fig. 1.14) est de petite taille et pèse moins de 3 kg. Ces attributs permettent aux ROVs d'explorer de minuscules cavités où des fissures de pipeline, ce qui est physiquement impossible à réaliser pour un plongeur. D'autre part, les Mini ROVs sous-marins typiques ont un poids standard d'environ 15 kg et il suffit d'une seule personne pour le faire fonctionner facilement depuis un bateau et effectuer une expédition sous-marine.

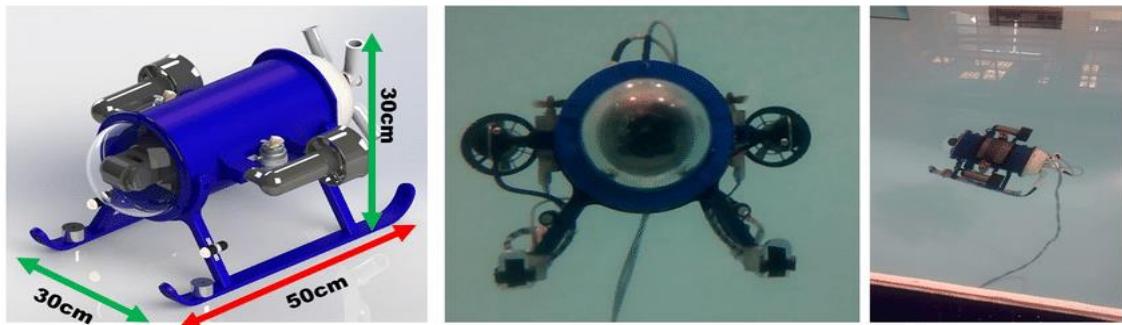


Figure 1.15 – MINI ROV. [17]

Les micros et mini (Fig. 1.15) catégories de véhicules télécommandés peuvent être désignées par un «globe oculaire» alternatif car elles ne participent pas aux entreprises d'intervention. Le type général de ROV est généralement inférieur à 5 HP (propulsion) et comprend des manipulateurs à trois doigts, comme dans l'ancien RCV 225 (Fig. 1.16). Ceux-ci sont spécialement construits pour faciliter les tâches de levé léger car ils portent généralement un sonar.



Figure 1.16 – ROV générale. [18]

Le ROV d'inspection (Fig.1.17) est conçu pour les tâches d'inspection, d'échantillonnage, d'enquête et d'interventions légères dans des eaux à forts courants et à faible visibilité.



Figure 1.17 – ROV d'inspection polyvalente - ROHP II. [19]

Le véhicule télécommandé de la classe des travaux légers (Fig. 1.18) est généralement inférieur à 50 CV et peut prendre en charge plusieurs manipulateurs. Ces ROVs permettent une profondeur de travail maximale de 2000 mètres. Le polyéthylène, qui est une sorte de polymère, est utilisé dans la construction qui diffère des alliages d'aluminium typiques ou de l'acier inoxydable.



Figure 1.18 – ROV travail léger présenté par deep ocean. [20]

La machine de travail lourd (Fig. 1.19)supporte moins de 220 CV avec deux manipulateurs et peut atteindre une profondeur de 3500 mètres.



Figure 1.19 – ROV de travail lourd. [21]

Ces ROVs peuvent avoir une charge utile de levage de plus de 5000 kilogrammes. Ils peuvent également être modifiés pour fonctionner avec plusieurs manipulateurs. L'application la plus courante de la classe des gros travaux concerne les installations en eau profonde et les branchements sous-marins.

Le ROV de tranchée (Fig.1.20) offre une gamme de 200-500 HP est peut-être utilisée jusqu'à 6000 mètres. Alors que la plupart des systèmes de propulsion de ces ROVs fonctionnent en dessous de 500 CV, il existe des véhicules sous-marins qui peuvent fonctionner à des puissances de près de 600 CV ou plus.



Figure 1.20 – ROV de tranchée. [22]

Ils sont couramment utilisés dans la pose de câbles, la création en toute sécurité de tranchées au fond de la mer et l'ancrage partiel ou complet (enfouissement) de composants sous-marins utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière. Enfin, il existe une autre classification des ROVs submersibles en fonction de la façon dont ils sont lancés. Il existe un système connu sous le nom de Tether Management System (ou TMS) qui contrôle le paiement du cordon ombilical qui fournit l'alimentation et le contrôle au ROV. Il est connu comme un véhicule à nage libre lorsqu'il est directement connecté au navire ou à la plate-forme d'observation.

Dans de tels cas, il a une flottabilité neutre. D'autre part, certains ROVs sont stockés dans des compartiments appelés garages qui sont descendus dans l'océan.

Pendant le lancement, le ROV s'éjecte du compartiment submergé et a son attache reliée au garage, PAS au navire. Le choix du système de lancement dépend de l'utilisation, de la profondeur, de la fonction et des facteurs géographiques.

1.5 Remotely Operated Crawler ROC

1.5.1 Introduction

Le véhicule sous-marin ROC (Remotely Operated Crawler) est une chenille télécommandée, il a été développé pour la mise en œuvre du plancher de surface sous-marin. Il est utilisé pour les applications de sauvetage. Le ROC permet de réduire le risque de la vie humaine lors de la plonger sous l'eau pour le sauvetage car il peut être utilisé à une grande profondeur. Le principal problème du ROC est de déplacer sous les inégalités du plancher sous-marin et de s'assurer qu'il a toujours une flottabilité négative et une bonne stabilité pour fonctionner à une surface inégale sous l'eau. De plus, le ROC a besoin de surmonter l'obstacle de la surface sous-marine sans aucun problème.[37]

1.5.2 Définition du ROC

La chenille télécommandée (ROC) est un type de véhicule sous-marin sans pilote qui a la capacité de fonctionner sous l'eau sans avoir la manœuvre humaine à l'intérieur. De nos jours, ces véhicules sont largement utilisés par les marins, les militaires et également utilisés par les archéologues, ce qui représente la plupart des travaux à effectuer dans les profondeurs des eaux sous-marines.[37]

1.5.3 Différence entre le ROV et le ROC

Dans la recherche de véhicules sous-marins, il existe deux types de véhicules télécommandés qui sont le ROV et le ROC. Ces deux véhicules peuvent transporter des instruments et des observations de surveillance pour une application de sauvetage. La différence principale entre les deux véhicules est que le ROC est conçu pour permettre un fonctionnement en contact direct avec le fond marin, tandis que le ROV ne peut pas entrer directement en contact avec le fond marin, ce qui ressemble plus à une application sous-marine comme le montre le tableau (Tab. 1.1).[37]

Table 1.1 – comparaison entre ROC et ROV [37]

ROV	ROC
Ne fonctionne que sous l'eau	Peut être utilisée au fond de la mer ou sous l'eau
Actionné et manœuvré à l'aide d'une hélice	Manœuvre à l'aide de l'application de roue
Capacité plus rapide à déplacer dans l'eau	Meilleure capacité à performer au fond de la mer

1.5.4 Système de manœuvre

Généralement, tous les véhicules terrestres ou dispositifs de manœuvre qui se déplacent sur la surface utilisent des roues. La roue est un composant de forme circulaire et arrondie qui a pour fonction de tourner en palière axial des véhicules. Ces roues permettent de déplacer l'objet lourd et de transporter facilement la charge en même temps. La chenille télécommandée utilise généralement plusieurs types de mécanismes qui sont des pneus de chenille et courroie de chenille. Le tableau (Tab. 1.2) montre certains des avantages et des inconvénients entre le pneu, la courroie et l'omni-roue.[37]

Table 1.2 – Avantages et Désavantages selon le type de chenille de roue.[37]

Type de chenille de roue	Avantages	Désavantages
Pneu	Avoir plus d'efficacité dans les performances de vitesse Avoir moins de force de friction sur la surface Avoir plus de puissance et de vitesse pour manœuvrer	Avoir une faible capacité à tourner à gauche et à droite dans un endroit serré
Ceinture	Avoir une excellente capacité d'escalade Avoir une bonne capacité à tourner dans un endroit restreint	Système compliqué Très lent à tourner
Omnieroue	Avoir la meilleure capacité à tourner dans toutes les directions	Mise en œuvre de la couche haute Moins de puissance et de vitesse à manœuvrer

Le schéma (Fig. 1.21) montre une classification des rocs selon la locomotion :

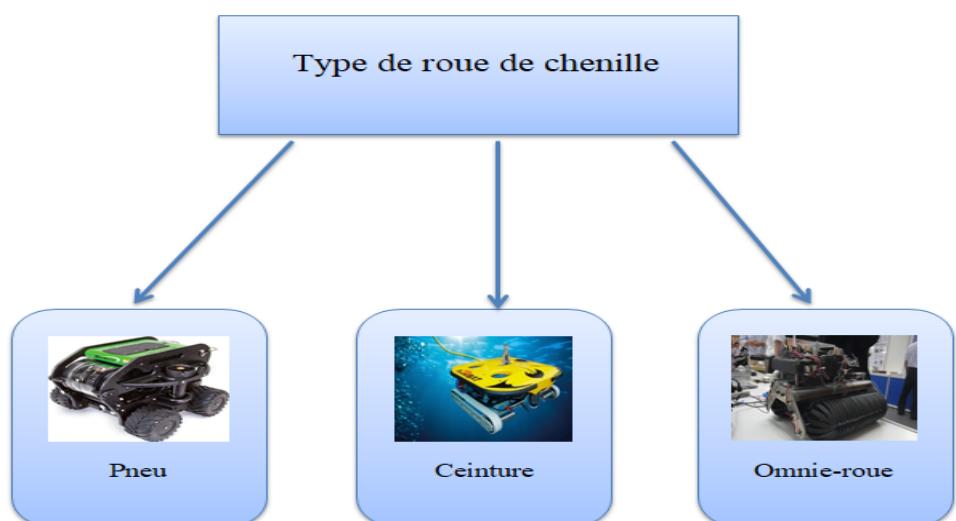


Figure 1.21 – Classification des ROCs selon selon la roue de chenille .

1.5.5 Roc avec pneu



Figure 1.22 – The Little Benthic Crawler rov .[23]

L'un des ROVs les plus innovants fonctionnant sous les mers aujourd'hui est le petit ROV sur chenilles benthiques (LBC™) de Seabotix (Fig. 1.22). Le LBC (Little Benthic Crawler) est doté d'une configuration à double propulseur vertical pour un mouvement de roulement précis dans l'eau et une stabilisation à des profondeurs allant jusqu'à 30 m. En passant en mode attachement, un opérateur pilote simplement le LBC vers la coque du navire et positionne le train de roues bâbord ou tribord près de la coque. En utilisant la fonction latérale sur le joystick du système, les opérateurs lancent le LBC dans un rouleau. Une fois que l'angle du LBC correspond à l'angle de la coque du navire, l'opérateur active le générateur de vortex, qui attire le LBC vers la coque. Lorsque le LBC se fixe à une surface, il peut être « entraîné » au lieu de « volé ». L'opérateur fait passer les commandes du mode ROV au mode « chenille ». En engageant les mêmes commandes que celles utilisées pour faire voler le LBC dans l'eau, l'opérateur peut conduire le LBC avec les roues motorisées.[23]

Cette figure (Fig. 1.23) illustre l'attachement du Roc avec la coque du navire :

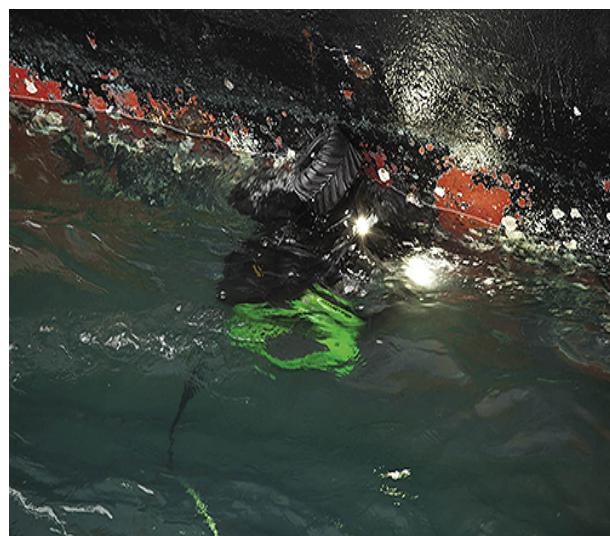


Figure 1.23 – The Little Benthic Crawler en mode attachement .[23]

Le système étant fixé à la coque, la chenille sert de trépied pour stabiliser les capteurs par

rapport à la coque sans mouvement relatif. Le mécanisme d’ entraînement a été conçu pour favoriser la traction, le suivi en ligne droite pendant les inspections et le couple le plus élevé possible pour une capacité de fonctionnement maximale. La transmission LBC intègre des moteurs à courant continu à commutation par balais Pittman® et des réducteurs planétaires d’AMETEK Technical Industrial Products, Inc., avec un motoréducteur pour chacune des quatre roues.[23]

1.5.6 Roc avec ceinture

Une combinaison de plusieurs technologies d’inspection sur un seul outil d’inspection pourrait être une solution efficace pour fournir une image plus complète de l’état et de l’intégrité de l’actif inspecté. Plusieurs entreprises ont développé leur propre flotte de véhicules sous-marins avec de multiples capacités d’inspection. Capable de transporter une multitude d’outils d’inspection et d’enregistrer une grande quantité de données recueillies à partir des capteurs embarqués. Cela permet une inspection plus complète par rapport à ce qu’un plongeur peut réaliser, par exemple les ROV offshore ECA ROVING BAT-INS (Fig. 1.24) conçus pour fonctionner sur des pipelines et des ponts dans des environnements de mer agitée.[24]



Figure 1.24 – ECA Hytec Roving BAT .[24]

De plus, ils sont capables de réaliser des mesures quantitatives pour les levés et les mesures d’épaisseur. Entre autres applications, ce ROV peut être utilisé pour l’élimination de la croissance marine en utilisant la vapeur à haute pression de la bulle de cavitation.[24] La figure (Fig. 1.25) montre les caractéristiques du ECA Hytec Roving BAT:

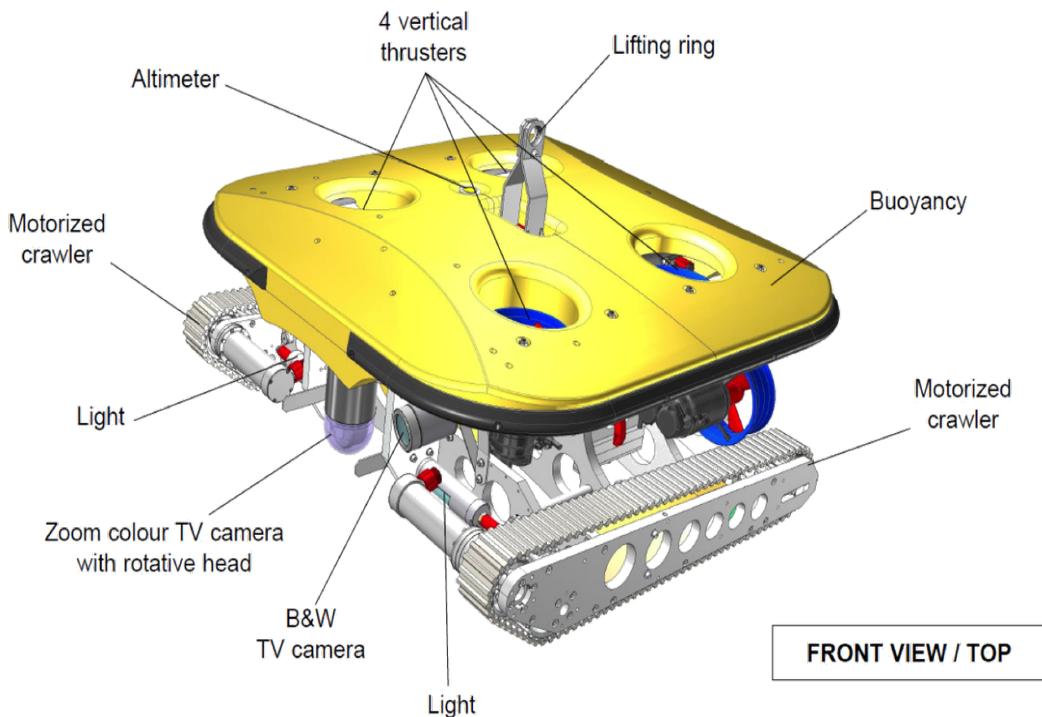


Figure 1.25 – les caractéristiques du ECA Hytec Roving BAT .[25]

Ce rov est caractérisé par le auto docking, la figure (Fig. 1.26) illustre cette opération:

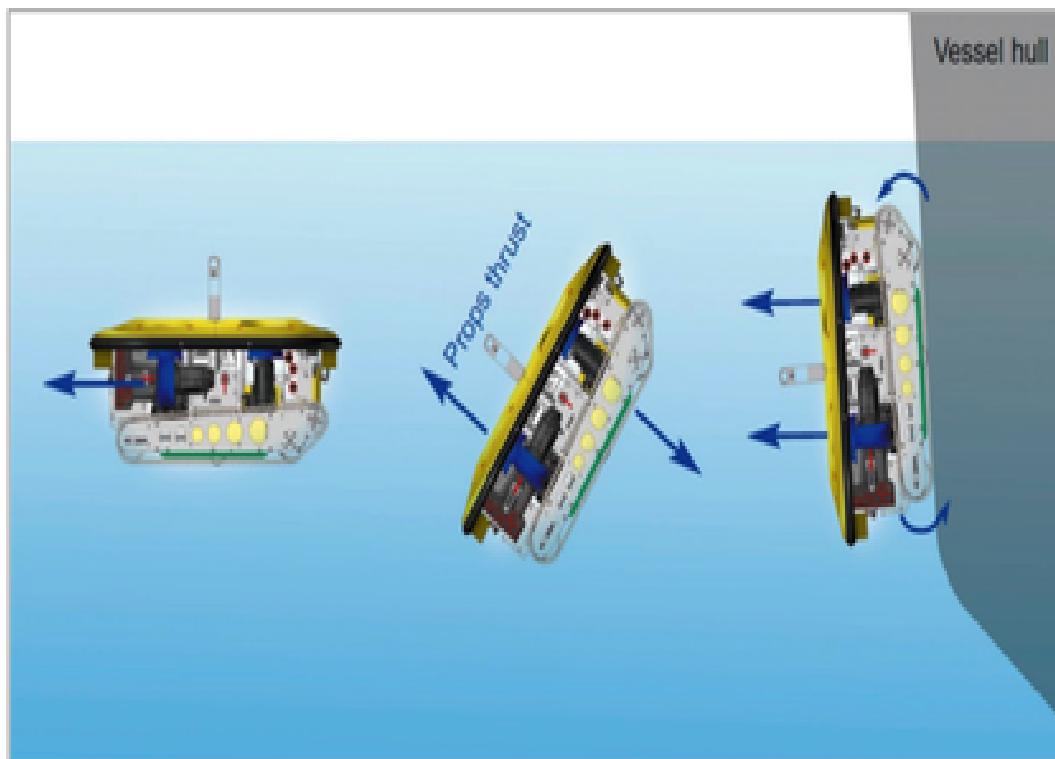


Figure 1.26 – Roving BAT montrant la fonction Auto Docking .[25]

1.5.7 Roc omnie roue

Lorsque le besoin de déplacer des objets très lourds se fait sentir, des robots d'exploration courts et accroupis sont généralement déployés pour faire le travail. Malheureusement, cette capacité de levage lourd vient au sacrifice de la mobilité (pas de mouvement latéral), de sorte que la manœuvre d'objets en place peut être un long processus. Récemment, des chercheurs de l'Université japonaise d'Osaka (OU) ont déployé un prototype de chenille innovant alimenté par batterie et télécommandé qui intègre les propriétés d'une roue omnidirectionnelle connue sous le nom d'Omni-Ball (également conçue par l'équipe de l'UO), pour voyager virtuellement dans n'importe quelle direction souhaitée avec une perte d'énergie minimale. Ils l'ont surnommé l'Omni-Crawler (Fig. 1.27), Et cela pourrait changer la façon dont les choses sont déplacées à partir de maintenant.[26]

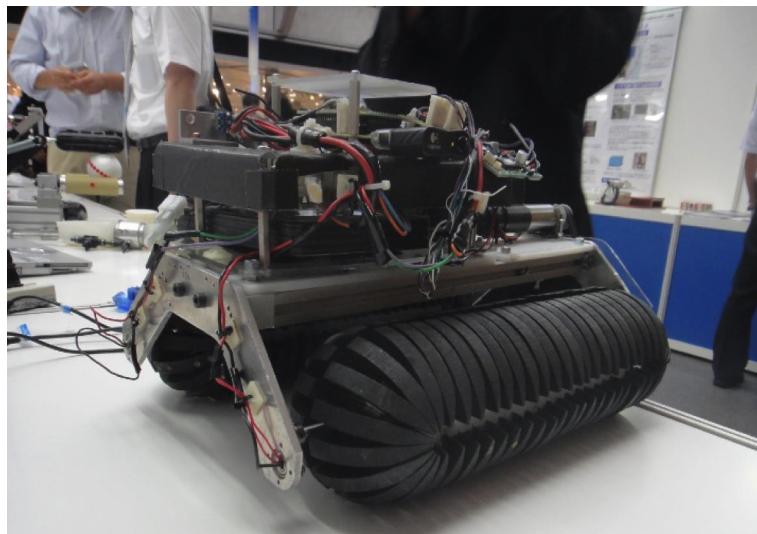


Figure 1.27 – The Omni-Crawler .[26]

Cet appareil est unique, cependant en ce qu'il utilise deux chenilles cylindriques qui empruntent les propriétés des roues inhabituelles en forme de boule en deux pièces de l'équipe. Les Omni Balls se composent de deux roues hémisphériques correspondantes liées l'une à l'autre de chaque côté d'un essieu court. Les moitiés séparées peuvent tourner indépendamment l'une de l'autre ou en tandem comme une sphère complète.[26]

1.6 conclusion

Ce chapitre était un état de l'art sur les véhicules sous-marins, on a pu présenter d'une manière généralisée ses différents types et sa classification. Les véhicules sous-marins se subdivisent en deux catégories principales les véhicules habités et non habités. Dans notre étude on va s'intéresser à étudier les véhicules non habités spécifiquement les ROV (robot sous -marin télé- opérés). Le domaine d'utilisation des ROVs est très vaste inclus le secteur civile, militaire et industrielle ce qui explique la croissance énorme du développement de ses robots. Dans le chapitre suivant on va aborder la modélisation mathématique d'un ROV.

Chapitre 2

Modélisation mathématique du ROV

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on va entamer la modélisation mathématique du ROV développé par notre équipe , cette partie consiste à définir les repères nécessaires pour la description de son fonctionnement et la détermination d'un modèle mathématique pour notre ROV. La modélisation nécessite en général à trouver un modèle mathématique qui décrit le comportement du système réel, le modèle sera ensuite utilisé pour des besoins de simulations, ou pour la synthèse de lois de commande. Après la détermination du modèle notre but principal est la conception d'un modèle Simulink pour étudier les différents aspects cinématique, dynamique et hydrodynamique dans le but de faire une synthèse de commande.

Pour plus de détails sur la modélisation mathématique voir les références [4], [28].

2.2 Modélisation général d'un ROV

La modélisation nécessite l'étape de définir des référentiels par rapport auxquels on décrira l'évolution de l'engin [4]. On définit d'abord un repère absolu R0 (0, X0, Y0, Z0), avec :

- X0 : Axe longitudinal confondu avec le Nord géographique,
- Y0 : Axe transversal orienté vers l'Est,
- Z0 : Axe normal dirigé vers le bas (fond sous-marin).

Ce repère R0 est fixe par rapport à la terre ce qui lui confère les propriétés d'un repère galiléen, ou inertiel.

On définit un autre repère Rv=(0,Xv,Yv,Zv) qui est lié à notre robot sous-marin, avec :

- Xv : Axe longitudinal orienté de l'arrière vers l'avant de ROV,
- Yv : Axe transversal orienté vers Bâbord,
- Zv : Axe normal dirigé du haut vers le bas.

Les deux repères R0 et Rv sont présentés dans la figure (Fig. 2.1).

2.3 Définition des variables

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

$$\eta_1 = [x, y, z]^T \quad (2.1)$$

η_1 elle représente les trois composantes de position.

$$\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T \quad (2.2)$$

elle 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 $\nu = [\nu_1, \nu_2]^T$, avec :

$\nu_1 = [u, v, w]^T$: vitesses linéaires

$\nu_2 = [p, q, r]^T$: vitesses angulaires

ν_1 est défini par :

u : vitesse d'avancement

v : vitesse de glissement

w : vitesse de descente

ν_2 est défini par :

$$p = \dot{\phi} \quad (2.3)$$

p elle représente la vitesse de Roulis.

$$q = \dot{\theta} \quad (2.4)$$

q elle représente la vitesse de Tangage.

$$r = \dot{\psi} \quad (2.5)$$

r elle représente la vitesse de Lacet.

Les vecteurs des forces et des moments extérieurs $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$:

$\tau_1 = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]$: les forces

$\tau_2 = [\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]$: les moments

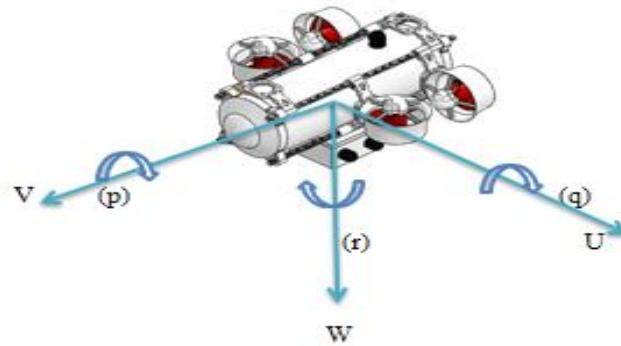
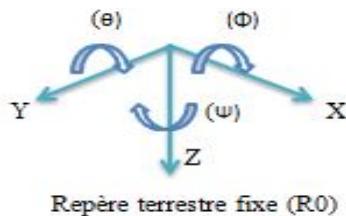


Figure 2.1 – Système de cordonné utilisé dans le ROV en cours de réalisation.

2.3.1 Modèle cinématique

La transformation d'Euler

Les angles d'Euler sont surtout utilisés pour le repérage d'un repère R_m mobile $x'y'z'$ en mouvement par rapport à un référentiel R_f xyz considéré comme fixe. On montre que dans le cas général, il faut trois rotations pour passer de R_m à R_f . Le choix des angles des rotations n'est pas unique et dépend du problème à étudier.[45]
Selon la théorie de rotation d'Euler, nous pouvons décrire une rotation de coordonnées avec les angles d'Euler ϕ , θ et ψ [27], et comme illustré dans la figure Fig. 2.2 (utiliser l'ordre de rotation par défaut Z-X-Z comme exemple)

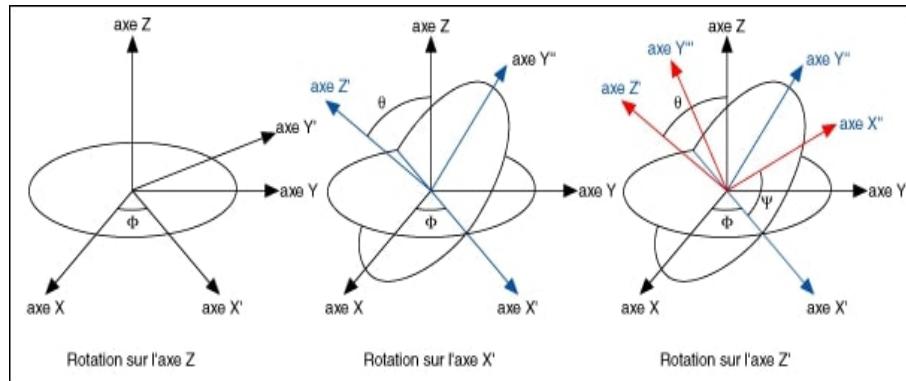


Figure 2.2 – Rotation de coordonnées cartésiennes 3D (Euler). [27]

Les trois étapes suivantes décrivent la rotation :[27]

Effectue la rotation des axes X, Y et Z autour de l'axe Z par $\phi(-\pi < \phi \leq \pi)$, ce qui produit les axes X' , Y' et Z .

Effectue la rotation des axes X' , Y' et Z autour de l'axe X' par $\theta(0 \leq \theta \leq \pi)$, ce qui produit les axes X' , Y'' et Z' .

Effectue la rotation des axes X' , Y'' et Z' autour de l'axe Z' par $\psi(-\pi < \psi \leq \pi)$, ce qui produit les axes X'' , Y'' et Z' . La transformation en utilisant les angles d'Euler fournit une transformation importante entre la dynamique exprimée entre le repère mobile R_v et le repère absolu R_0 .[28]

$$\dot{\eta} = J(\eta 2)\nu \quad (2.6)$$

Où la matrice $J(\eta 2)$ est obtenue par trois rotations successives :

- Rotation ψ autour de z_0 , angle de lacet.
- Rotation θ autour de y_0 , angle de tangage.
- Rotation ϕ autour de x_0 , angle de roulis.

La relation cinématique suivante exprime la trajectoire du ROV dans le repère absolu:

$$\dot{\eta} = J_1(\eta 2)\nu \quad (2.7)$$

Avec $J_1(\eta 2)$ est la matrice de passage du repère R_0 au repère R_v .

$$J_1(\eta 2) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \varphi & \sin \theta \cos \varphi \cos \psi + \sin \psi \sin \varphi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \theta \cos \varphi \sin \psi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La deuxième relation qui lie les vitesses de rotation dans les différents repères est :

$$\dot{\eta}2 = J1(\eta2)\nu1 \quad (2.9)$$

Avec:

$$Jc(\eta2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi\tan\theta & \cos\varphi\tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \cos\varphi/\cos\theta & \cos\varphi/\cos\theta \end{bmatrix} \theta \neq \pi/2 \pm k\pi \quad (2.10)$$

La transformation est indéterminée pour $\theta = \pm 90^\circ$, cette singularité correspond à une situation extrême que l'engin, par hypothèse, n'atteindra jamais. [46]

On obtient à la fin la relation suivante :

$$\dot{\eta} = Jc(\eta2)\nu = \begin{bmatrix} \dot{\eta}1 \\ \dot{\eta}2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1(\eta2) & 0 \\ 0 & J2(\eta2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu1 \\ \nu2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.3.2 Modèle dynamique

Introduction

Dans cette partie on va étudier le modèle dynamique non linéaire de notre ROV avec des perturbations dues aux forces hydrodynamiques. En général, il existe deux méthodes pour dériver le modèle dynamique: la formulation de Lagrange utilisant la méthode de l'énergie et la formulation de Newton utilisant la deuxième loi du mouvement de Newton, dans notre travail on va utiliser la méthode de Newton. Cette dernière méthode donne une équation utilisant les vitesses angulaires autour des axes fixes du corps; contrairement aux variables généralisées utilisées dans l'équation de Lagrange, les vitesses angulaires ne peuvent pas être intégrées pour obtenir des déplacements angulaires autour de ces axes et sont donc insatisfaisantes pour décrire pleinement l'orientation d'un corps rigide dans l'espace tridimensionnel (3D). Cependant, les vitesses angulaires fixées par le corps peuvent être résolues et transformées pour donner l'orientation du véhicule dans l'espace 3D en utilisant les angles d'Euler. La transformation d'Euler (ou communément appelée équation cinématique) fournit la relation entre la dynamique dérivée des coordonnées terrestres et fixes [47].

Les hypothèses suivantes peuvent être faites lors de la dérivation d'une équation dynamique ROV typique pour simplifier l'effort de modélisation [47]:

- (a) Le ROV est un corps rigide et est complètement immergé une fois dans l'eau;
- (b) L'eau est supposé être un fluide idéal qui est incompressible, non visqueux (sans frottement) et irrotationnel;
- (c) le ROV est lent pour les opérations telles que l'inspection des pipelines;
- (d) Le référentiel terrestre est inertiel;
- (e) Les perturbations dues aux vagues sont négligées car elles sont entièrement submergées et le courant sous-marin est traité comme une perturbation persistante;
- (f) La dynamique de l'attache attachée au ROV n'est pas initialement modélisé.

Les équations de la dynamique du ROV sont communément exprimées par rapport au repère mobile R_v . En utilisant l'approche newtonienne le mouvement du corps rigide par rapport au repère mobile est donné par l'ensemble des équations suivantes [46]:

$$Mm[\nu 1 + \nu 2 \times \nu 1 + \nu 2 \times r_G + \nu 2 \times (\nu 2 \times r_G)] = \tau 1 \quad (2.12)$$

$$I \times \nu 2 + \nu 2 \times (I \times \nu 2) + Mm \times r_G \times (\nu 1 + \nu 2 \times \nu 1) = \tau 2 \quad (2.13)$$

Avec ,

M_m : La matrice masse du véhicule.

$$M_m = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

I : la matrice d'inertie du ROV.

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$: L'emplacement du centre de la gravité.

Quand on développe les équations précédent on obtient :

$$m[-vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = \tau_x \quad (2.16)$$

$$m[-wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] = \tau_y \quad (2.17)$$

$$m[-uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = \tau_z \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} & I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr - (\dot{r} + pq) I_{xz} + (r^2 - q^2) I_{yz} + \\ & (pr -) I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] = \tau_\phi \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} & I_y \dot{q} + (I_x - I_z) rp - (\dot{p} + qr) I_{xy} + (p^2 - r^2) I_{zx} + \\ & (qp -) I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = \tau_\theta \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} & I_z \dot{r} + (I_y - I_x pq - (\dot{q} + rp) I_{yz} + (q^2 - p^2) I_{xy} + \\ & (rq -) I_{zx} + m[xg(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vrwq)] = \tau_\psi \end{aligned} \quad (2.21)$$

Nous pouvons écrire ces équations trouvées sous forme matricielle, on obtient :

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{rb}\nu = \tau \quad (2.22)$$

Avec:

$$M_{rb} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$C_{rb} = \begin{bmatrix} C_{11}(v) & C_{12}(v) \\ C_{21}(v) & C_{22}(v) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$Ou : C_{11}(\nu) = 0_{3 \times 3} \quad (2.25)$$

$$C_{12}(\nu) = \begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + \nu) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(y_G p - \nu) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$C_{21}(\nu) = \begin{bmatrix} -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - \nu) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + \nu) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$C_{22}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_zr & I_{yz}r + I_{xy}p - I_yq \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_zr & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_xp \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_yq & I_{xz}r + I_{xy}q - I_xp & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\nu = [u \ \nu \ w \ p \ q \ r]^T \quad (2.29)$$

$$\tau = [\tau_x \tau_y \tau_z \tau_\varphi \tau_\theta \tau_\psi]^T \quad (2.30)$$

M_{RB} : La matrice d'inertie due à la dynamique du système, c'est une matrice symétrique [4],

C_{rb} : La matrice des forces de Coriolis et des forces centrifuges qui s'appliquent au véhicule.

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

$$\tau = \tau_A + \tau_H \quad (2.31)$$

Donc il inclut les forces et les moments hydrodynamiques plus les forces et les moments de rappels. La modélisation dynamique d'un robot sous-marin conduit aux équations générales suivantes :

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + Gf(\eta) = \tau_A \quad (2.32)$$

Avec : M est la matrice d'inertie, symétrique et définie positive. Elle est égale à la somme de la matrice d'inertie M_{RB} et la matrice d'inertie des masses ajoutées M_A .

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2.33)$$

$C(\nu)$: Ce vecteur est égale à la somme entre matrice des forces de Coriolis et centrifuges et la matrices des forces et moments des masses ajoutés.

$$C(v) = C_{rb} + C_A \quad (2.34)$$

$D(\nu)$: est la matrice des coefficients d'amortissement.

τ_A : Les forces et les moments d'entrées.

$$\tau_A = T.u \quad (2.35)$$

Ou,

T : La matrice des propulsions générées par les propulseurs.

u : La matrice de configuration des propulseurs.

2.3.3 Inertie et masses ajouté

En physique tout corps qui se déplace librement en eau provoque un déplacement d'une certaine quantité de cette eau [4], cet effet semble être comme des masses et des inerties ajoutées. [46] La matrice d'inertie des masses ajoutées M_A est définie positive ce qui est sous la forme suivante:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Les matrices des forces et moments des masses ajoutées $C_A(v)$ sont sous la forme suivante:

$$C_a(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\text{Ou : } C_A(v) = -C_A^T(v) \quad (2.38)$$

Et

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \quad (2.39)$$

$$a_2 = X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \quad (2.40)$$

$$a_3 = X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \quad (2.41)$$

$$b_1 = X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \quad (2.42)$$

$$b_2 = X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + k_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \quad (2.43)$$

$$b_3 = X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + k_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r \quad (2.44)$$

Alors pour un déplacement à une vitesse faible, certains termes seront négligés dans la matrice d'inertie et les masses ajoutées, qui sont les éléments non diagonaux de la matrice M_A , donc notre matrice devient :

$$M_A = -\text{diag}\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{\nu}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\} \quad (2.45)$$

Et on aura aussi certains termes (découplage) qui deviennent négligeables, la matrices des forces et moments des masses ajoutées $C_A(v)$ devient :

$$C_a(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.4 Amortissement hydrodynamique

Ce sont des efforts de résistance de l'eau aux mouvements du robot. Ils sont représentés par une matrice $D(\nu)$ strictement négative, le signe négatif signifie que les forces et les couples sont appliqués au corps par l'environnement. Ces efforts sont nuls lorsque la vitesse est nulle [46].

La matrice des coefficients d'amortissement est définie par :

$$D(\nu) = - \begin{bmatrix} X_u + X_{|u||u|}|u| & X_v + X_{|v||v|}|v| & X_w + X_{|w||w|}|w| & & & \\ & X_p + X_{|p||p|}|p| & X_q + X_{|q||q|}|q| & X_r + X_{|r||r|}|r| & & \\ Y_u + Y_{|u||u|}|u| & Y_v + Y_{|v||v|}|v| & Y_w + Y_{|w||w|}|w| & & & \\ & Y_p + Y_{|p||p|}|p| & Y_q + Y_{|q||q|}|q| & Y_r + Y_{|r||r|}|r| & & \\ Z_u + Z_{|u||u|}|u| & Z_v + Z_{|v||v|}|v| & Z_w + Z_{|w||w|}|w| & & & \\ & Z_p + Z_{|p||p|}|p| & Z_q + Z_{|q||q|}|q| & Z_r + Z_{|r||r|}|r| & & \\ K_u + K_{|u||u|}|u| & K_v + K_{|v||v|}|v| & K_w + K_{|w||w|}|w| & & & \\ & K_p + K_{|p||p|}|p| & K_q + K_{|q||q|}|q| & K_r + K_{|r||r|}|r| & & \\ M_u + M_{|u||u|}|u| & M_v + M_{|v||v|}|v| & M_w + M_{|w||w|}|w| & & & \\ & M_p + M_{|p||p|}|p| & M_q + M_{|q||q|}|q| & M_r + M_{|r||r|}|r| & & \\ N_u + N_{|u||u|}|u| & N_v + N_{|v||v|}|v| & N_w + N_{|w||w|}|w| & & & \\ & N_p + N_{|p||p|}|p| & N_q + N_{|q||q|}|q| & N_r + N_{|r||r|}|r| & & \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Puisque le véhicule sous-marin fonctionne autour d'une vitesse linéaire qui est inférieure à 2m/s, comme il est montré dans la figure 2.3. Il est dans la zone linéaire. L'effet des éléments non diagonaux de la matrice (ν) est petit par rapport aux éléments diagonaux pour les véhicules sous-marins, donc l'amortissement hydrodynamique dans la forme diagonale est utilisé:

$$D = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (2.48)$$

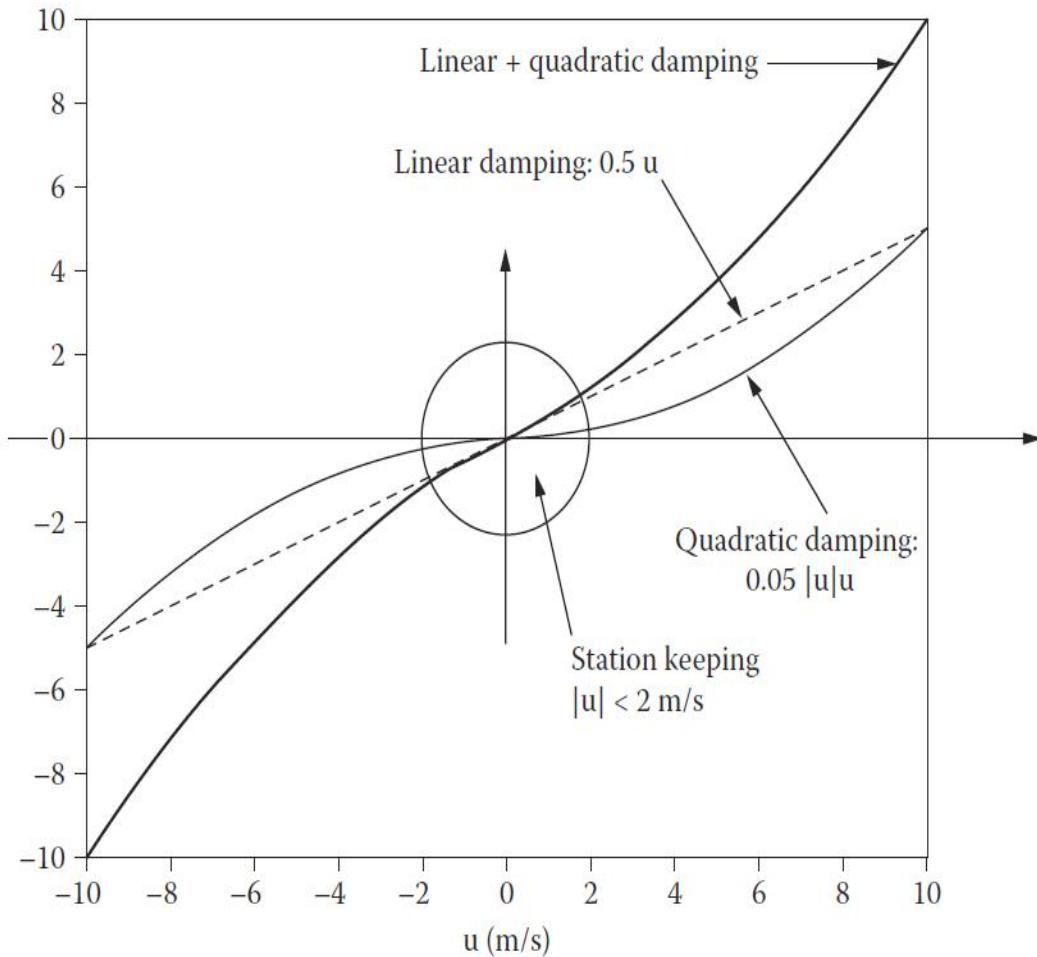


Figure 2.3 – amortissement hydrodynamique de véhicule sous-marin pour des petites et grandes vitesses. [28]

2.4.1 La détermination des coefficients d'amortissement hydro-dynamique

La force de traîné comporte 2 parties, une partie linéaire et une partie quadratique, cette équation peut être écrite comme un polynôme de second ordre :

$$1^{\text{ère}} \text{ représentation} \quad \begin{cases} F_{\text{udrag}} = X_u + X_{|u|u}|u| \\ y_1 = a_1x^2 + b_1x + c_1 \end{cases} \quad (2.49)$$

Comme le véhicule déplace avec des faibles vitesses, la force d'amortissement hydro-dynamique peut être modélisée comme un polynôme de 1er degré pour cela la force d'amortissement hydrodynamique peut être écrit de la façon suivante :

$$2^{\text{ème}} \text{ représentation} \quad \begin{cases} F_{\text{udrag}} = X_u u \\ y_2 = a_2x + b_2 \end{cases} \quad (2.50)$$

L'analyse CFD (Computational fluid dynamics) est faite en utilisant SolidWorks, ce travail est réalisé par notre camarade électromécanique pour déterminer les paramètres du ROV en cours de réalisation. En utilisant les résultats de l'analyse d'écoulement à partir de SolidWorks les coefficients d'amortissement des mouvements longitudinal, latérale, descente, roulis, tangage, lacet sont obtenus en faisant l'interpolation des résultats par MATLAB.

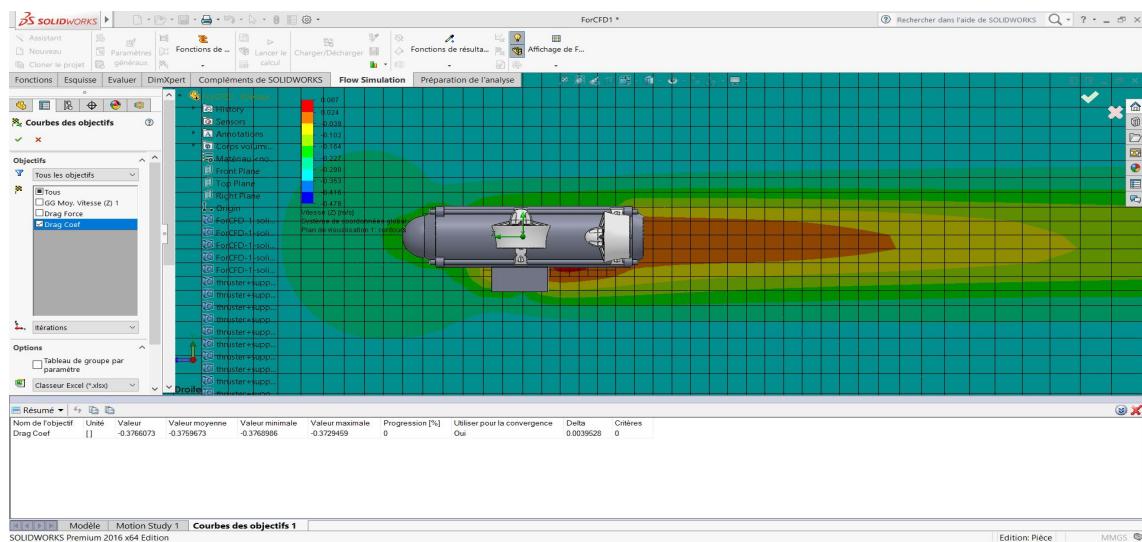


Figure 2.4 – Analyse CFD par solidworks.

2.4.2 Coefficients d'amortissement pour le mouvement longitudinal

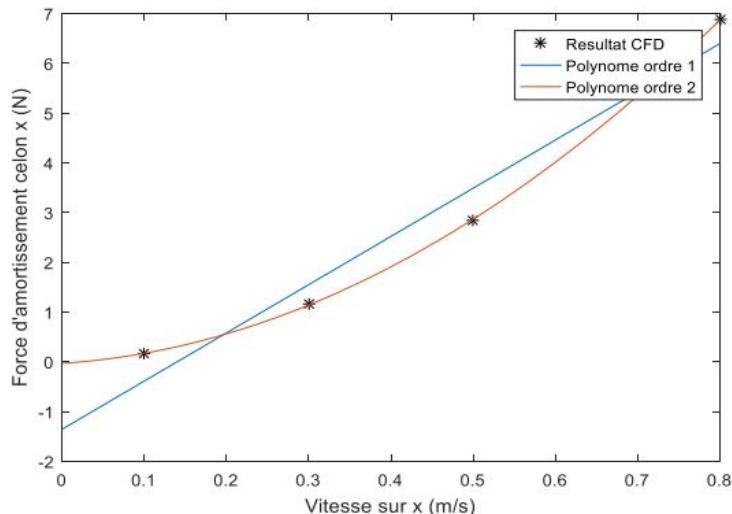


Figure 2.5 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données de la force d'amortissement selon x.

$$f(x) = 9.6946x - 1.3587 \quad (2.51)$$

$$f(x) = 9.4337x^2 + 1.0809x - 0.0327 \quad (2.52)$$

Les coefficients d'amortissement selon l'axe x sont alors comme suivant :

Table 2.1 – les coefficients d'amortissement du mouvement longitudinal.

1 ^{ère} représentation	$X_{ u u} = 9.4337 \text{ Kg/m}$	$X_u = 1.0809 \text{ Kg/s}$
2 ^{ème} représentation		$X_u = 9.6946 \text{ Kg/s}$

2.4.3 Coefficients d'amortissement pour le mouvement latéral

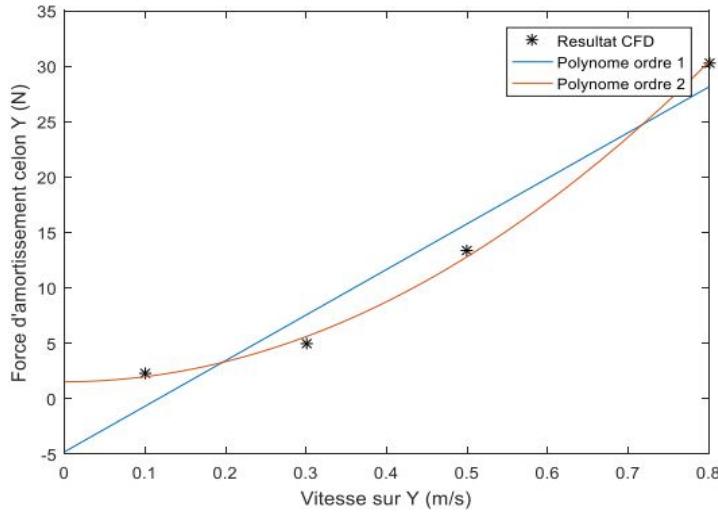


Figure 2.6 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données de la force d'amortissement selon y.

$$f(x) = 41.1625x - 4.7942 \quad (2.53)$$

$$f(x) = 44.9709x^2 + 0.1003x + 1.5265 \quad (2.54)$$

Les coefficients d'amortissement selon l'axe y sont alors comme suivant :

Table 2.2 – les coefficients d'amortissement du mouvement latéral.

1 ^{ère} représentation	$Y_{ \nu \nu} = 44.9709 \text{ Kg/m}$	$Y_\nu = 0.1003 \text{ Kg/s}$
2 ^{ème} représentation		$Y_\nu = 41.1625 \text{ Kg/s}$

2.4.4 Coefficients d'amortissement pour le mouvement vertical

$$f(x) = 23.2959x - 3.2953 \quad (2.55)$$

$$f(x) = 23.2662x^2 + 2.0519x + 0.0121 \quad (2.56)$$

Les coefficients d'amortissement selon l'axe y sont alors comme suivant :

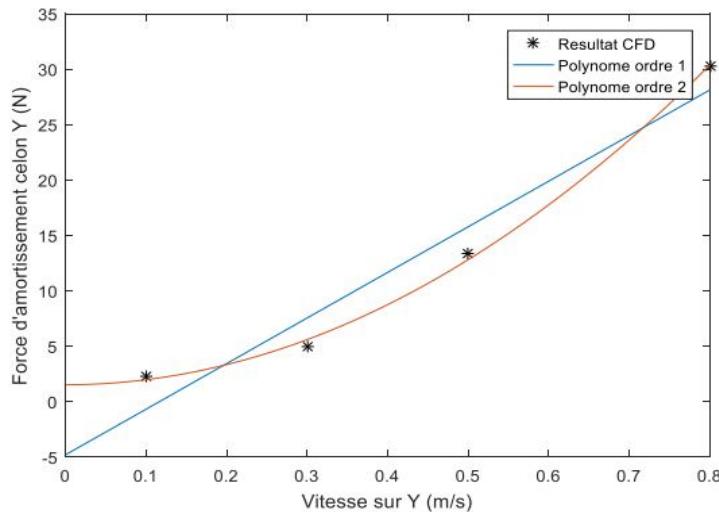


Figure 2.7 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d’ordre 2 et 1 des données de la force d’amortissement selon z.

Table 2.3 – les coefficients d’amortissement du mouvement vertical.

1 ^{ère} représentation	$Z_{ w w} = 23.2662 \text{ Kg/m}$	$Z_w = 2.0519 \text{ Kg/s}$
2 ^{ème} représentation		$Z_w = 23.2959 \text{ Kg/s}$

2.4.5 Coefficients d’amortissement du roulis

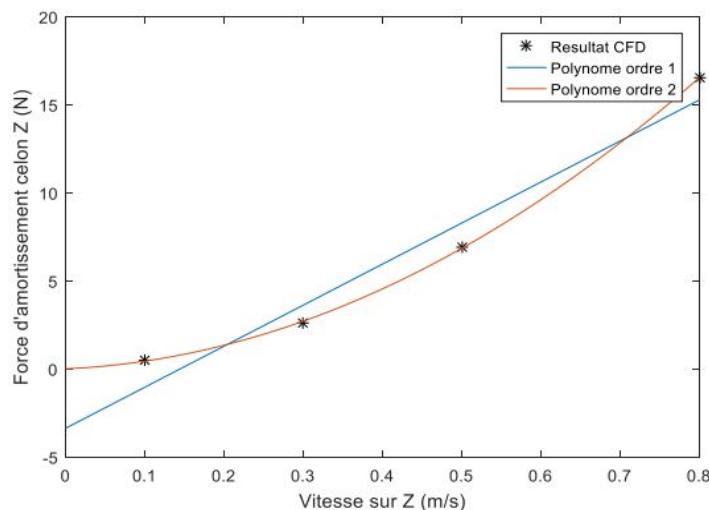


Figure 2.8 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d’ordre 2 et 1 des données du moment d’amortissement du roulis.

$$f(x) = 0.0668x - 0.0031 \quad (2.57)$$

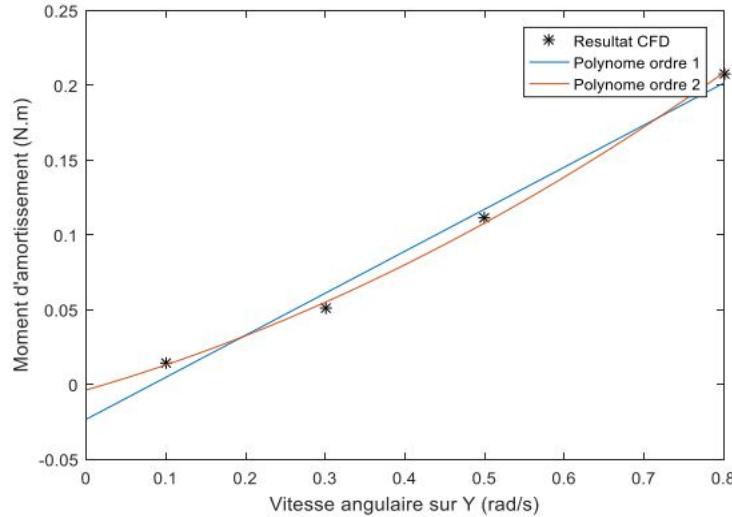
$$f(x) = -0.0103x^2 + 0.0762x - 0.0046 \quad (2.58)$$

Les coefficients d’amortissement du roulis sont :

Table 2.4 – les coefficients d'amortissement du roulis.

1 ^{ère} représentation	$K_{ p p} = -0.0103\text{Kg/m}$	$K_p = 0.0762\text{Kg/s}$
2 ^{ème} représentation		$K_p = 0.0668\text{Kg/s}$

2.4.6 Coefficients d'amortissement du tangage


Figure 2.9 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données du moment d'amortissement du tangage.

$$f(x) = 0.281x - 0.0233 \quad (2.59)$$

$$f(x) = 0.1394x^2 + 0.1537x - 0.0037 \quad (2.60)$$

Les coefficients d'amortissement du tangage sont :

Table 2.5 – les coefficients d'amortissement du tangage.

1 ^{ère} représentation	$M_{ q q} = 0.1394\text{Kg/m}$	$M_q = 0.1537\text{Kg/s}$
2 ^{ème} représentation		$M_q = 0.281\text{Kg/s}$

2.4.7 Coefficients d'amortissement du Lacet

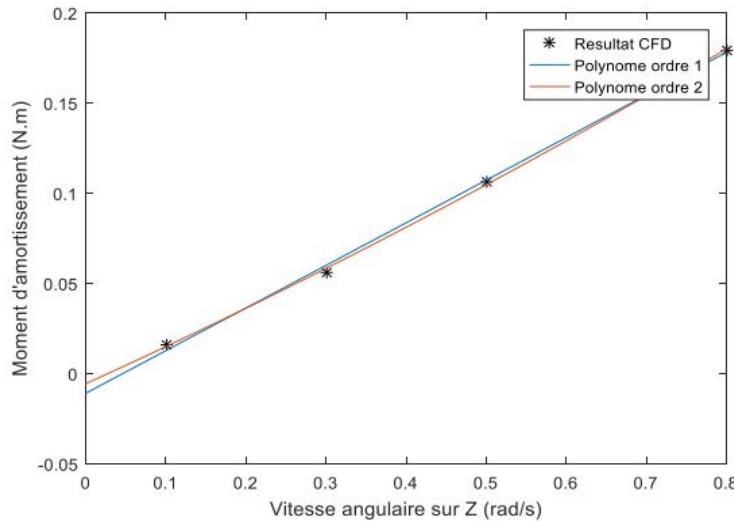


Figure 2.10 – les résultats obtenus à partir de la simulation CFD et interpolation d'ordre 2 et 1 des données du moment d'amortissement du lacet.

$$f(x) = 0.2361x - 0.0108 \quad (2.61)$$

$$f(x) = 0.0381x^2 + 0.2014x - 0.0055 \quad (2.62)$$

Les coefficients d'amortissement du lacet sont :

Table 2.6 – les coefficients d'amortissement du lacet.

1 ^{ère} représentation	$N_{r r} = 0.0381 \text{ Kg/m}$	$N_r = 0.2014 \text{ Kg/s}$
2 ^{ème} représentation	$N_r = 0.2361 \text{ Kg/s}$	

D'après ces résultats la matrice d'amortissement hydrodynamique qui sera utilisée dans la simulation est comme suivant:

$$D = - \begin{bmatrix} 9.6946 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 41.1625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 23.2959 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0668 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.281 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2361 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

2.4.8 Détermination de la Matrice d'inertie du système et la matrice des forces de Coriolis et centrifuges

Ce travail est réalisé par notre camarade électromécanicien avec L'outil propriétés de masse du logiciel de conception Solidworks. Le but est de déterminer les coefficients de la matrice d'inertie du système et la matrice des forces de Coriolis et centrifuges par rapport au centre de la gravité du véhicule. Les paramètres trouvés par l'outil sont les suivants:

$$M_{rb} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.021 & -0.00002 & 0.00005 \\ 0 & 0 & 0 & -0.00002 & 0.044 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00005 & 0.0001 & 0.057 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Les paramètres trouvés par l'outil sont : La masse du véhicule avec une estimation sur les masses qui seront être ajoutées : $m=4\text{kg}$.

Moments d'inertie prisent au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées:

$$I_x = 0.021 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_y = 0.044 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_z = 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{xy} = I_{yx} = 0.00002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{xz} = I_{zx} = -0.00005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{yz} = I_{zy} = 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Et la matrice des forces de Coriolis et centrifuges devient:

$$C_{rb} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 4w & -4v \\ 0 & 0 & 0 & -4w & 0 & 4u \\ 0 & 0 & 0 & 4v & -4u & 0 \\ 0 & 4w & -4v & 0 & -0.0001q - 0.00005p + 0.057r & 0.0001r + 0.00002p - 0.044q \\ -4w & 0 & 4u & -4w & 0 & 0.00005r - 0.00002q + 0.021p \\ 4v & -4u & 0 & 4v & -4u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.00005r + 0.00002q - 0.021p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

2.4.9 Force de gravité et de flottabilité

La matrice $G_f(\eta)$ est utilisée pour décrire les forces de gravité et flottabilité exercées sur le ROV dans l'eau, comme on le voit ci-dessous, les forces de flottabilité et de gravité sont en fonction de l'orientation du véhicule (repère terrestre) et ils sont indépendants du mouvement du véhicule, le poids et la poussée d'Archimède peuvent être écrits comme suivant :

$$\begin{aligned} f_G(\eta) &= J_1^T(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w \end{bmatrix} \\ f_B(\eta) &= -J_1^T(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.66)$$

Où le poids du ROV est donné par $W=mg$ et g est l'accélération de la pesanteur. Quand le ROV est totalement submergée la poussée d'Archimède exercée sur le ROV est égale au poids du l'eau déplacé, alors $B=\rho g V$ la masse volumique du fluide et V est le volume déplacé par la partie submergée du ROV, $J_1(\eta)$ est la matrice de transformation des coordonnées angulaires d'EULER définie précédemment, dans le repère mobile le vecteur des forces de rappel devient:

$$G_f(\eta) = - \begin{bmatrix} f_G(\eta) + f_B(\eta) \\ r_G \times f_G(\eta) + r_B \times f_B(\eta) \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Après calcul l'expression final du $G_f(\eta)$ devient:

$$G_f(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \varphi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \varphi \\ -(y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \varphi + (z_G W - Z_B B) \cos \theta \sin \varphi \\ (z_G W - Z_B B) \sin \theta + (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \varphi \\ -(x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \varphi - (y_G W - y_B B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Les coordonnées du centre de flottabilité et du centre de gravité déterminés:

Table 2.7 – Coordonnées du centre de flottabilité et de gravité

Centre de gravité (x_G, y_G, z_G) (mm)	$(0, 0, 0)$
Centre de flottabilité (x_B, y_B, z_B) (mm)	$(0, 0, -0.013)$

Et on a $W=39.24$ et $B=41$ alors la matrice (2.69) devient:

$$G_f(\eta) = \begin{bmatrix} -1.76 \sin \theta \\ 1.76 \cos \theta \sin \varphi \\ 1.76 \cos \theta \cos \varphi \\ 0.5102 \cos \theta \sin \varphi \\ 0.5102 \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

2.4.10 Matrice de configuration des propulseurs

La disposition des propulseurs (Fig. 2.11 et Fig. 2.12) par rapport au centre de gravité est modélisée par la matrice de configuration des propulseurs :

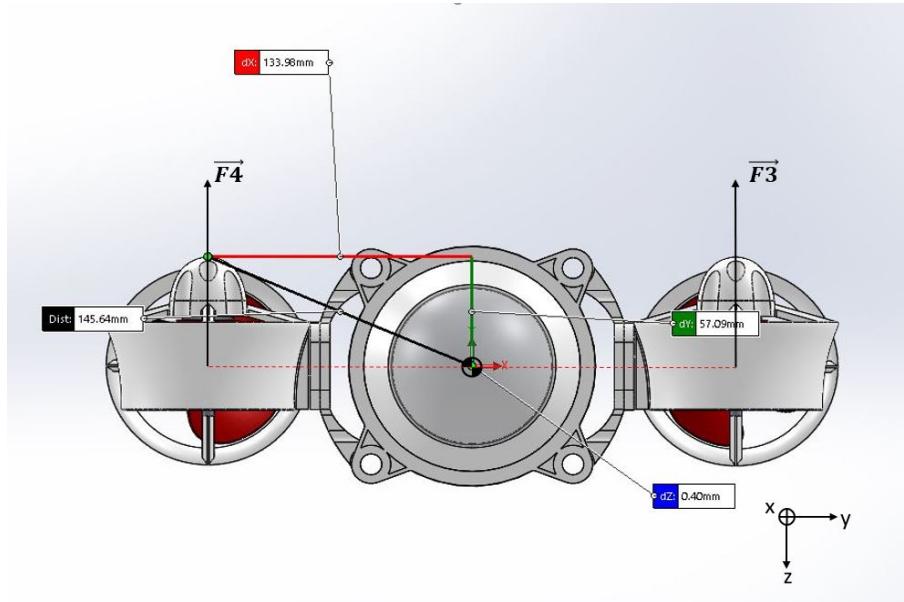


Figure 2.11 – Paramètres géométriques des propulseurs verticaux F3 et F4.

Les forces et moments résultants sont comme suivants :

$$\begin{aligned}
 \tau_x &= F_1 + F_2 \\
 \tau_y &= 0 \\
 \tau_z &= F_3 + F_4 \\
 \tau_\phi &= (F_4 - F_3).b \\
 \tau_\theta &= 0 \\
 \tau_\gamma &= (F_1 - F_2).b
 \end{aligned} \tag{2.70}$$

avec : a = b=134mm

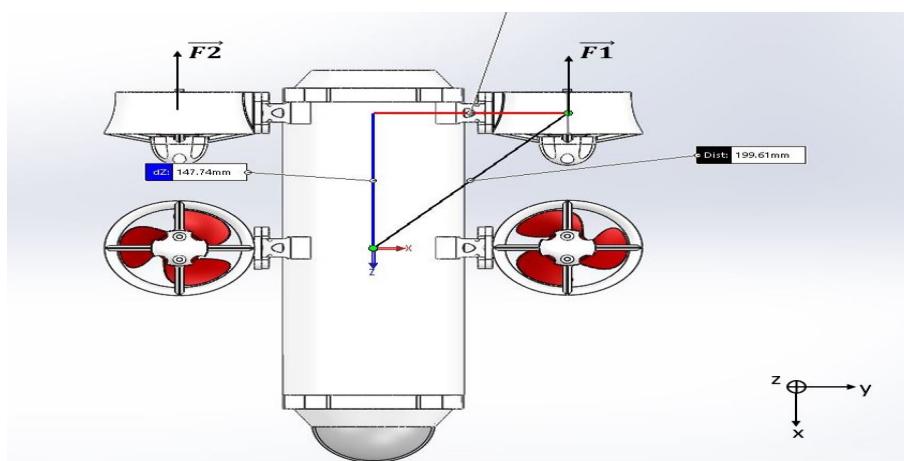


Figure 2.12 – Paramètres géométriques des propulseurs horizontaux F1 et F2.

la mise sous forme matricielle des équations (2.66) donne :

$$\tau_A = T \cdot F$$

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \\ \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -0.134 & 0.134 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.134 & -0.134 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

2.4.11 Matrice d'inertie des masses ajoutées et matrice des forces et moments des masses ajoutées

Pour calculer les masses ajoutées de notre ROV on va utiliser la loi de calcul d'un volume de sphère le détaille de la théorie utilisée est citée dans la thèse suivante (voir [48]),

$$X_{\dot{u}} = 0.1m = 0.4 \text{ avec } m \text{ la masse du ROV,}$$

$$Y_{\dot{v}} = \int_{-L/2}^{L/2} \rho \pi r^2 dx = \rho \pi r^2 L = \rho \bar{V},$$

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

$$K_{\dot{p}} = 0$$

$$M_{\dot{q}} = N_{\dot{r}} = \int_{-L/2}^{L/2} x^2 \rho \pi r^2 dx = \frac{L^3}{12} \rho \pi r^2 = \frac{L^2}{12} \rho \bar{V}$$

Tous les autres éléments sont nuls. V est le volume du cylindre et ρ est la densité du fluide, la matrice M_A obtenu est :

$$M_A = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.26 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.26 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.19 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

La matrice des forces et moments des masses ajoutées est :

$$C_a(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -5.26w & 5.26v \\ 0 & 0 & 0 & 5.26w & 0 & -0.4u \\ 0 & 0 & 0 & -5.26v & 0.4u & 0 \\ 0 & -5.26w & 5.26v & 0 & -0.19r & 0.19q \\ 5.26w & 0 & -0.4u & 0.19r & 0 & -0 \\ -5.26v & 0.4u & 0 & -0.19q & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a pu déterminer notre modèle mathématique en basant sur les approches de newton et la transformation d'Euler. La modélisation cinématique traite les aspects géométriques. La modélisation dynamique est basée sur l'approche newtonienne. L'amortissement hydrodynamique consiste à étudier les efforts de résistance de l'eau aux mouvements du robot. Ils sont représentés par une matrice $D(\nu)$ strictement négative. Pour modéliser un ROV il faut prendre en considération les efforts dynamique et hydrodynamique qui agissent sur le véhicule, ainsi que le modèle du propulseur qui est l'élément nécessaire pour les véhicules sous-marins. Grâce à cette modélisation on a bien décrit notre modèle et il a donné une idée claire sur l'interaction du ROV avec le milieu marin. Dans le chapitre suivant on va identifier notre propulseur et étudier notre système en boucle ouverte.

Chapitre 3

Identification du propulseur sous-marin et comportement en boucle ouvert

3.0.1 Introduction

Un propulseur est un élément fondamental dans un Auv ou un Rov, il se compose d'un moteur et d'une hélice pour générer une poussée pouvant déplacer le véhicule. Étant donné que le propulseur est situé dans la boucle de commande la plus interne du système de commande du véhicule, il est essentiel pour obtenir un bon contrôle du manœuvre que le modèle de propulseur représente avec précision les caractéristiques du propulseur. Pour obtenir un modèle de propulseur sans passer par un développement mathématique complexe, il est nécessaire d'utiliser l'identification pour construire le modèle à partir de données d'entrées-sorties mesurées à partir d'un banc d'essai .[49]

Notre travail dans Cette partie peut être schématisé selon le schéma suivant :

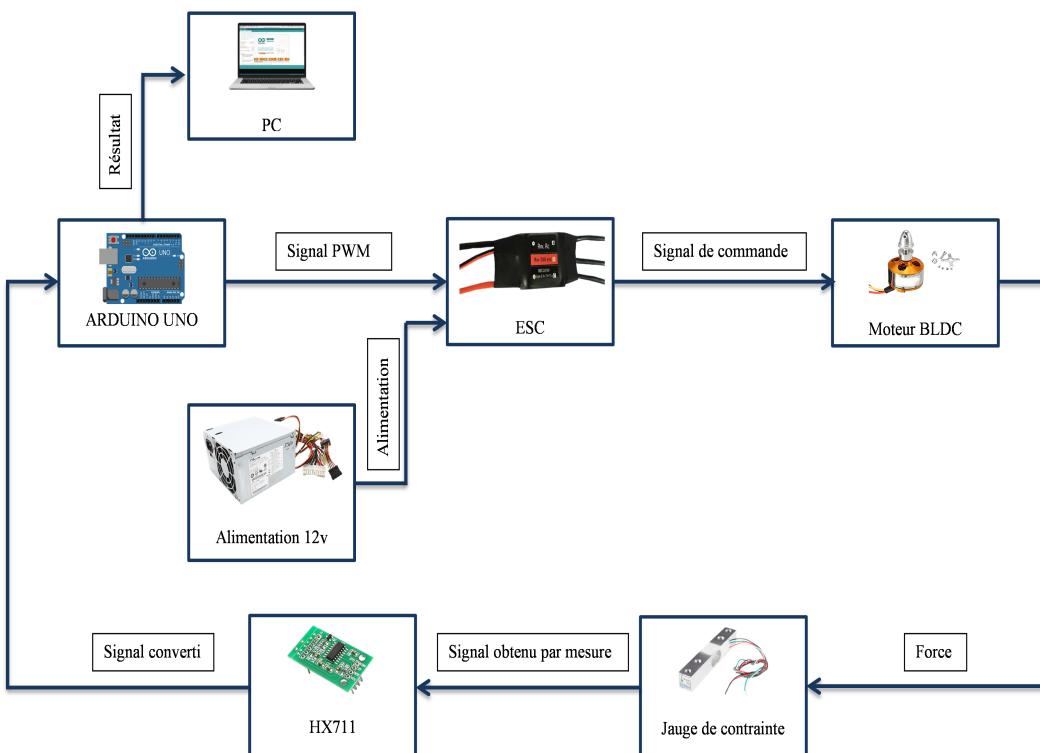


Figure 3.1 – La procédure de la caractérisation du propulseur .

Le déroulement du test est divisé sur trois parties :

1. Contrôle du moteur par un signal PWM : le contrôle du moteur BLDC est fait par un ESC.
2. Signal délivré par l'ESC vers vitesse angulaire : la sortie du moteur BLDC est une vitesse angulaire.
3. Vitesse angulaire vers une force: les résultats de cette partie ont obtenu à l'aide d'une jauge de contrainte et une carte arduino uno.

Dans ce qui suit on va citer les différents composants utilisés pour réaliser l'identification de notre propulseur dans le cas de notre projet.

3.0.2 Arduino Uno

Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328P. Elle possède: 14 broches d'entrée sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sorties

PWM).

6 entrées analogiques.

Un quartz 16 MHz.

Une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation.

La figure suivante (Fig. 3.2) montre une vue réelle de la carte arduino :

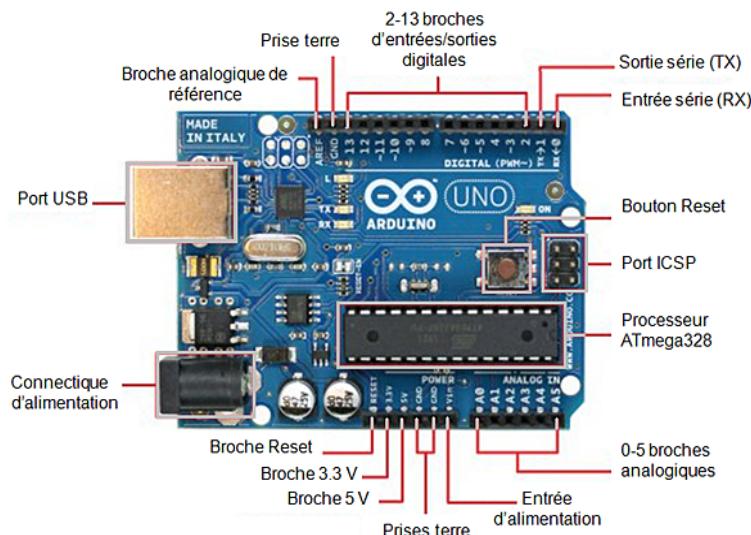


Figure 3.2 – Description des entrées/sorties de la carte Arduino Uno. [29]

3.0.3 Esc

Un régulateur de vitesse électronique ou ESC (Fig. 3.3) est un circuit électronique qui contrôle et régule la vitesse d'un moteur électrique. Il peut également assurer l'inversion du moteur et le freinage dynamique. Les commandes de vitesse électroniques miniatures sont également utiles dans les modèles radiocommandés électriques. Un contrôleur ESC est un appareil qui régule la puissance d'un moteur électrique ; lui permettant de passer de 0 à 100%.



Figure 3.3 – Vue réel d'un ESC .

3.0.4 Moteur BLDC

Les moteurs BLDC sont considérés comme des moteurs à courant continu, ils fonctionnent à l'aide d'ondes pulsées. Le contrôleur de vitesse électronique (ESC) convertit la tension continue de l'alimentation en impulsions et la fournit aux 3 fils du moteur. À un moment donné, seules deux phases du moteur seront alimentées, de sorte que le courant entre par une phase et sort par l'autre. Au cours de ce processus, la bobine à l'intérieur du moteur est alimentée et, par conséquent, les aimants du rotor s'alignent sur la bobine alimentée. Ensuite, les deux fils suivants sont alimentés par l'ESC, ce processus se poursuit pour faire tourner le moteur. La vitesse du moteur dépend de la vitesse à laquelle la bobine est alimentée et la direction du moteur dépend de l'ordre dans lequel les bobines sont alimentées. [50]



Figure 3.4 – Vue réel du BLDC .

3.0.5 HX711

Basé sur la technologie brevetée d'Avia Semiconductor technologie, HX711 est un convertisseur analogique-numérique (ADC) de précision 24 bits conçus pour les balances et les applications de contrôle industriel pour interface directement avec un capteur en pont. Ce composant permet d'amplifier le signal de la jauge pour que l'arduino puisse le lire.

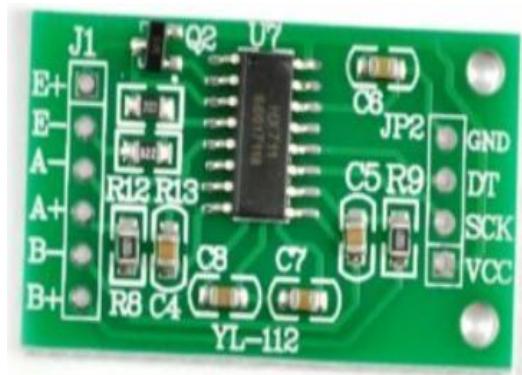


Figure 3.5 – Vue réel du HX711 .

3.0.6 Gauge de contrainte

Une jauge de contrainte (voir Fig. 3.6) est un type de capteur électrique. Son utilisation principale est de mesurer la force ou la contrainte. La résistance d'une jauge de contrainte change lorsqu'une force est appliquée et ce changement donnera une sortie électrique différente. Les jauge de contrainte utilisent cette méthode pour mesurer la pression, la force, le poids et la tension. [51]

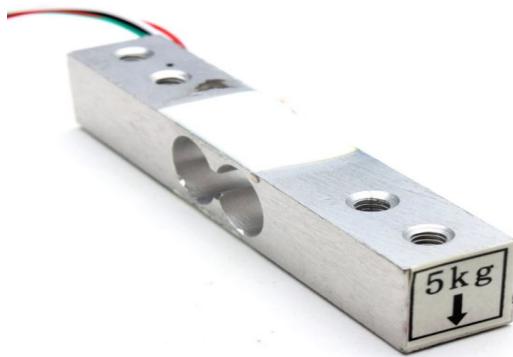


Figure 3.6 – Gauge de contrainte 5kg .

Alors par ce banc d'essai nous allons obtenir la relation entre le signal PWM donné par la carte arduino et la force délivré par le propulseur, donc nous pouvons créer une fonction dans le bloc de Matlab lors de la simulation.

Le banc d'essai utilisé pour l'identification du propulseur est présenté dans la figure 3.7



Figure 3.7 – Banc d'essai du test du propulseur.

Ce banc d'essai contient deux parties principales: partie électronique (expliqué précédemment) et partie propulsion.

3.0.7 Résultat Pratique :

Après le test du propulseur dans le banc d'essai la courbe (Fig. 3.8) présente la variation de la force en Kg et son équivalent en PWM:

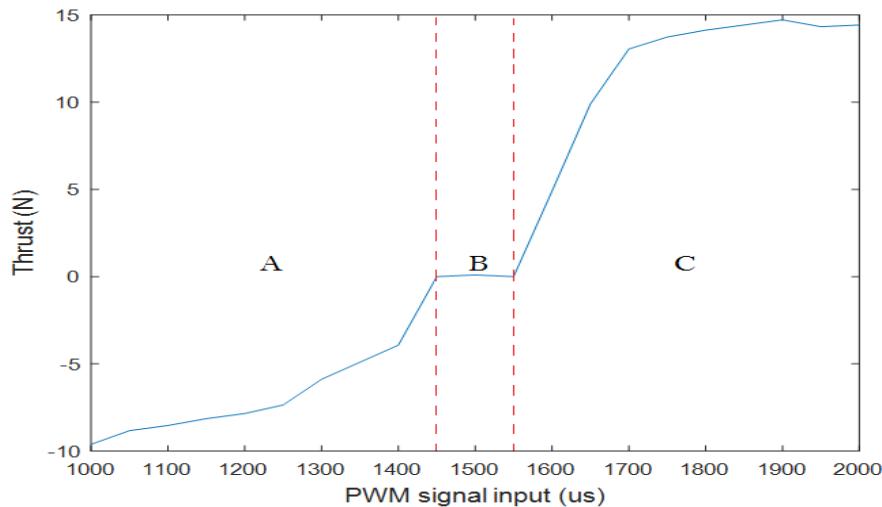


Figure 3.8 – Variation du Thrust(N) selon le signal PWM.

On remarque qu'il existe trois zones sur ce résultat :

Zone A : commence de la valeur 1000 de PWM jusqu'à 1450 sur cette zone on remarque que la force est négative ce qui veut dire que le moteur tourne en sens inverse avec une force maximale de 9.61N.

Zone B : cette zone commence à 1450 et se termine à 1550 et c'est la zone morte (dead zone) c'est- à-dire que la force est égale à zéro (pas de force délivrée par le propulseur).

Zone C : Son intervalle et entre 1550 jusqu'aux 2000 PWM sur cette zone la force est positive donc le moteur tourne en sens direct jusqu'à la force maximale qui est 14.42N qui était atteinte par un signal PWM de 1900.

Le tableau (Tab. 3.1) présente la variation du signal PWM entre 1000 et 2000 et sa valeur équivalente du Force en Kg.

PWM	Force (Kg)	Force (N)
1000.00	-0.98	-9.61
1050.00	-0.9	-8.83
1100.00	-0.87	-8.53
1150.00	-0.83	-8.14
1200.00	-0.8	-7.85
1250.00	-0.75	-7.36
1300.00	-0.6	-5.88
1350.00	-0.5	-4.9
1400.00	-0.4	-3.92
1450.00	0.00	0.00
1500.00	0.01	0.09
1550.00	0	0
1600.00	0.5	4.9
1650.00	1.01	9.9
1700.00	1.33	13.04
1750.00	1.4	13.73
1800.00	1.44	14.12
1850.00	1.47	14.42
1900.00	1.5	14.71
1950.00	1.46	14.32
2000.00	1.47	14.42

Table 3.1 – Signal PWM et son équivalent en Kg et en N.

3.0.8 PWM

D'une façon générale le rôle de ce bloc est de transformer le signal PWM d'entrée en force délivré par un propulseur, nous pouvons deviser ce bloc en trois parties:

1. transformation du signal PWM en signal de commande: la relation entre ces deux signaux est une relation linéaire. PWM: Un signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM en anglais (Pulse Width Modulation) est un signal dont le rapport cyclique varie. Ce type du signal est souvent utilisé dans les applications à valeur moyenne variable (Ex : Commande des moteurs, alimentation réglable,...) [52].

$$f(x) = (0.03 \cdot x) - 45 \quad (3.1)$$

2. transformation de la tension à une vitesse angulaire: cette transformation est faite à l'aide du modèle mathématique du moteur BLDC utilisé, nous pouvons exprimer le moteur A2212 par la fonction de transfert suivante:

$$G(s) = \frac{131.3016864}{0.010214509s + 1} \quad (3.2)$$

3. vitesse angulaire vers une force: cette relation est obtenue par simulation dans SOLIDWORKS. Cette relation est exprimée par les équations suivantes:

Polynôme pour le sens direct:

$$\begin{aligned} f(x) = & -1.2509 \cdot 10^{-14} \times x^5 + 3.4768 \cdot 10^{-11} \times x^4 - 3.1045 \cdot 10^{-8} \times x^3 + 9.5003 \cdot 10^{-8} \times x^2 \\ & + 0.0086918 \times x + 0.27359 \end{aligned} \quad (3.3)$$

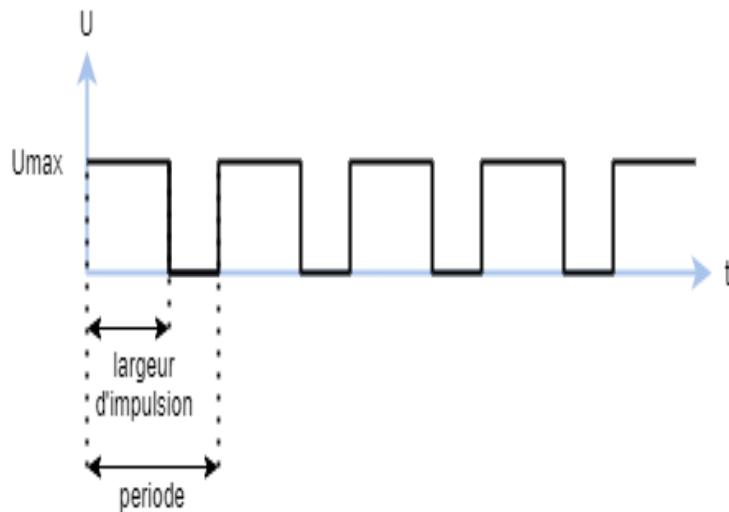


Figure 3.9 – Signal pwm .

Polynôme pour le sens inverse :

$$f(x) = 4.15891.2509.10^{-15} \times x^5 - 1.3346.10^{-11} \times x^4 + 1.1911.10^{-8} \times x^3 - 2.5615.10^{-6} \times x^2 + 0.0086521 \times x - 0.19894 \quad (3.4)$$

En fin on relie toute c'est partie pour qu'on obtient le bloc (entrée)

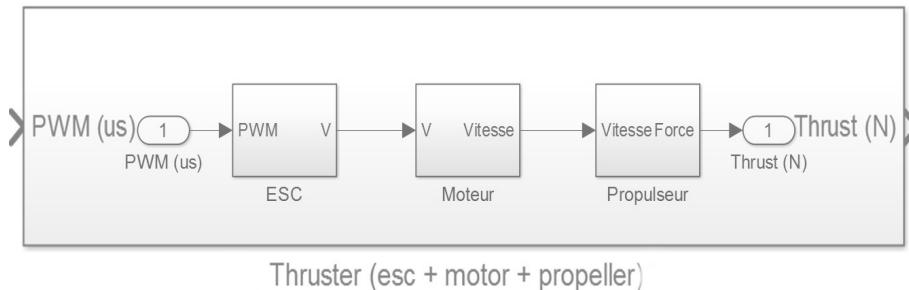


Figure 3.10 – Bloc d'entrée dans simulink .

En utilisant ce bloc en peut déterminer la courbe qui présente la variation de la force en N et son équivalent en PWM :

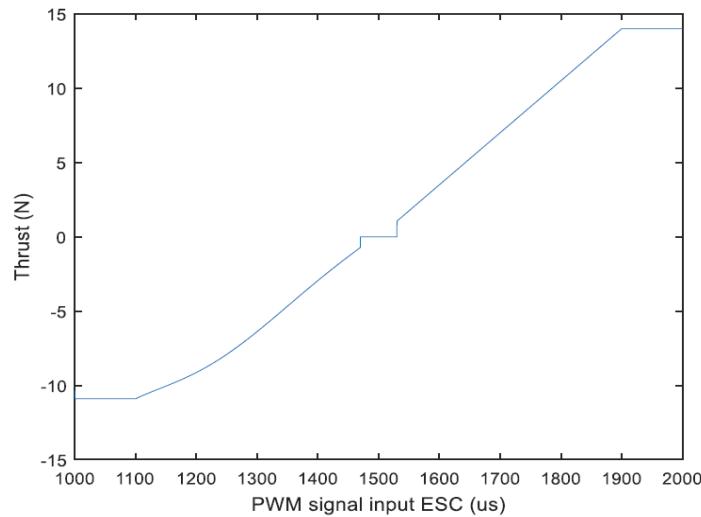


Figure 3.11 – Variation du Force(N) selon le signal PWM.

Le design de notre ROV est représenté dans la figure d'annexe A.2.

3.1 Représentation du modèle sous Matlab Simulink

Dans cette partie on va implémenter les équations et les matrices obtenues précédemment dans Simulink afin de valider notre modèle obtenu. Pour modéliser notre système on va se baser sur l'équation générale suivante:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + Gf(\eta) = \tau_A$$

A partir de cette équation on peut déterminer l'expression de $\dot{\nu}$:

$$\dot{\nu} = M^{-1}(\tau_A - C(\nu)\nu - D(\nu)\nu - Gf(\eta))$$

Cette relation est ensuite intégrée pour obtenir la relation de la vitesse ν .

D'une manière générale on peut modéliser notre Rov de la manière suivante (Fig. 3.12):

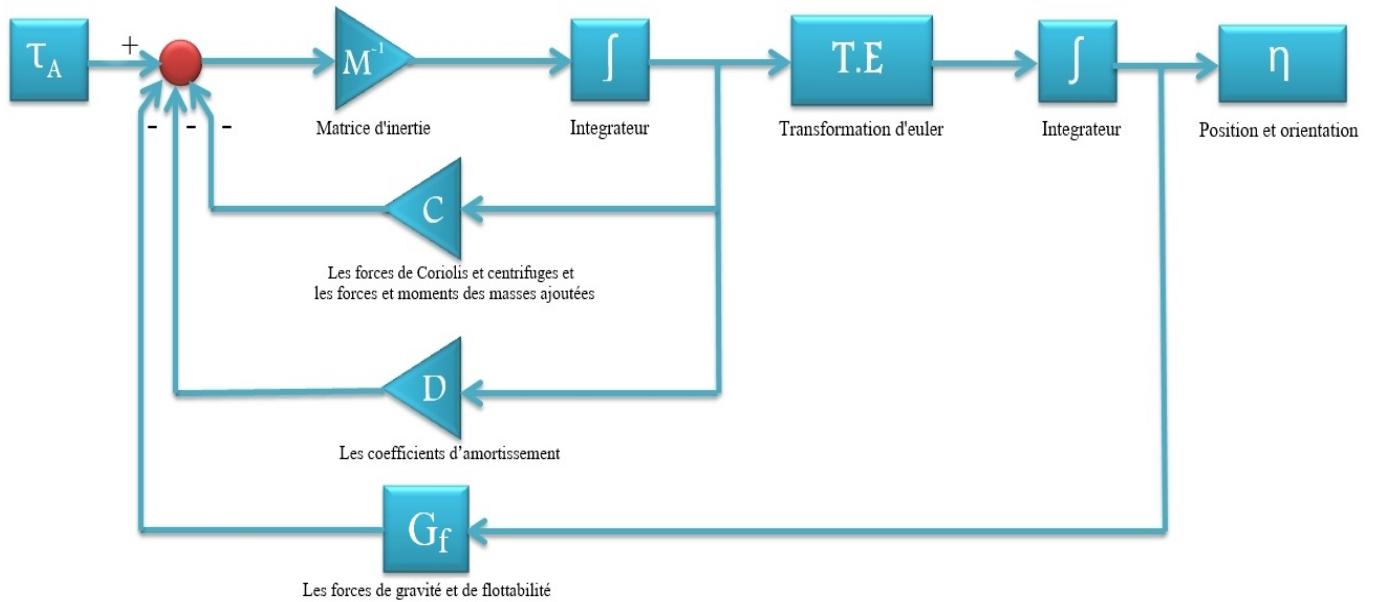


Figure 3.12 – Modèle général du ROV.

Dans la simulation on va considérer τ_A comme étant l'entrée du système mais en pratique on utilise des propulseurs qui sont commandés par un signal PWM donc PWM c'est l'entrée. Pour trouver la vitesse dans le repère absolu on utilise la transformation d'Euler de ν et on intégrant on va obtenir la position dans le repère absolu. La sortie du notre modèle inclut les positions et les orientations .

Le schéma réalisé sous Matlab est le suivant (Fig. 3.13.) :

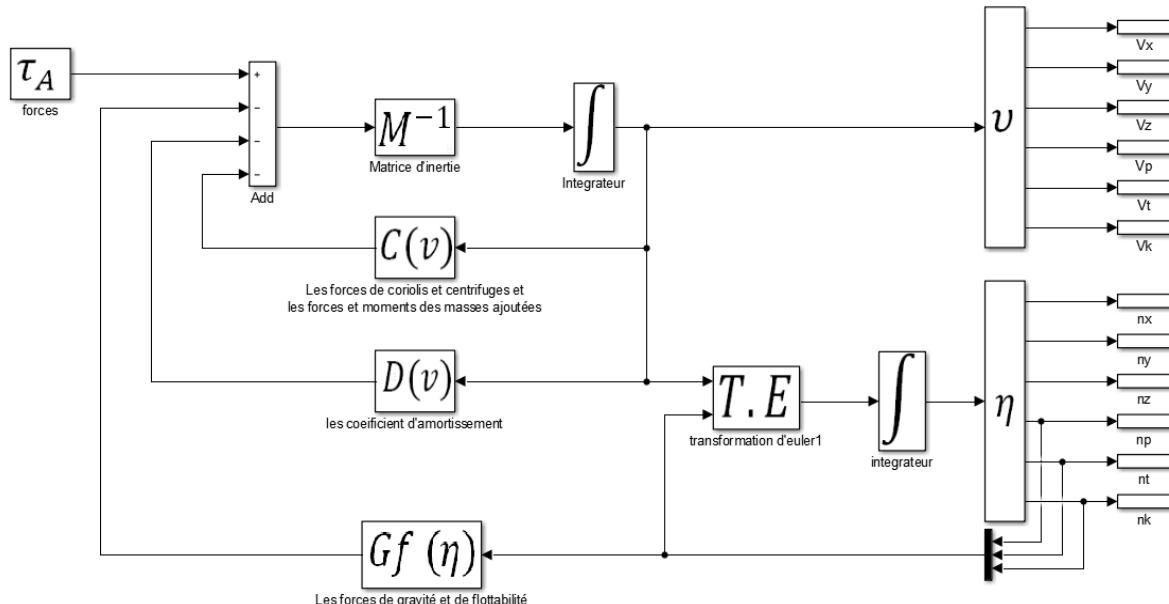


Figure 3.13 – Modèle du ROV réalisé .

Dans ce modèle τ_A est un signal d'entrée, ensuite ce signal est soustrait par $C(\nu)$, $D(\nu)$ et $Gf(\eta)$ à la sortie du sommateur le signal est multiplié par la matrice d'inertie M^{-1} ensuite il est passé par un intégrateur pour obtenir l'expression de la vitesse dans le repère relatif et pour obtenir la vitesse dans le repère absolu ce signal est passé par un bloc de transformation d'Euler ensuite par un intégrateur pour la position en repère

absolue. Pour transformer le signal d'entrée en PWM il y a deux méthodes pour effectuer cette opération la première consiste à déterminer une relation mathématique à partir du banc d'essai après avoir cette relation on va l'implémenter dans Matlab sous forme une fonction dans un bloc Simulink.

La deuxième méthode consiste à déterminer une relation mathématique pure qui transforme le signal PWM en une force.

Notre modèle après avoir ajouté le signal pwm comme une entrée est (voir Fig. 3.14) et pour avoir le détail du modèle (voir Fig. A.1)

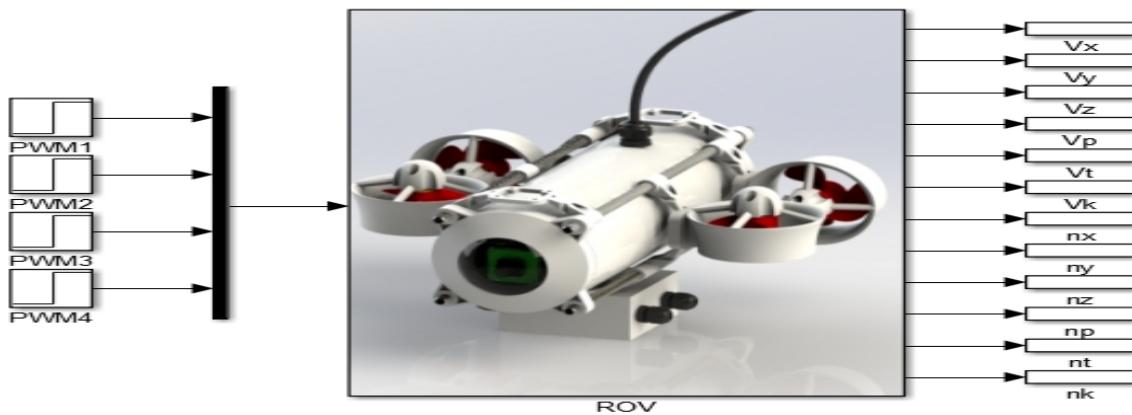


Figure 3.14 – Modèle générale du ROV dans SIMULINK .

Afin de tester le comportement de notre ROV en boucle ouverte on a supposé des scénarios (Tab.3.2) en donnant des valeurs PWM pour chaque propulseur:

Table 3.2 – Scénarios pour ROV en Boucle Ouverte.

Cas	PWM							
	F1		F2		F3		F4	
	PWM	Force (N)						
Cas 1	1650	5.25	1650	5.25	1500	0	1500	0
Cas 2	1500	0	1500	0	1650	5.25	1650	5.25
Cas 3	1650	5.25	1340	-5.02	1500	0	1500	0
Cas 4	1710	7.35	1625	4.38	1650	5.25	1650	5.25

F1, F2, F3, F4 représente les quatre propulseurs disposés dans notre modèle.

Chaque valeur PWM a son équivalent en force (N).

À partir de ses scénarios proposés on va commencer la simulation dans Matlab Simulink en faisant l'étude de quatre cas afin de bien comprendre notre système étudié.

Résultats

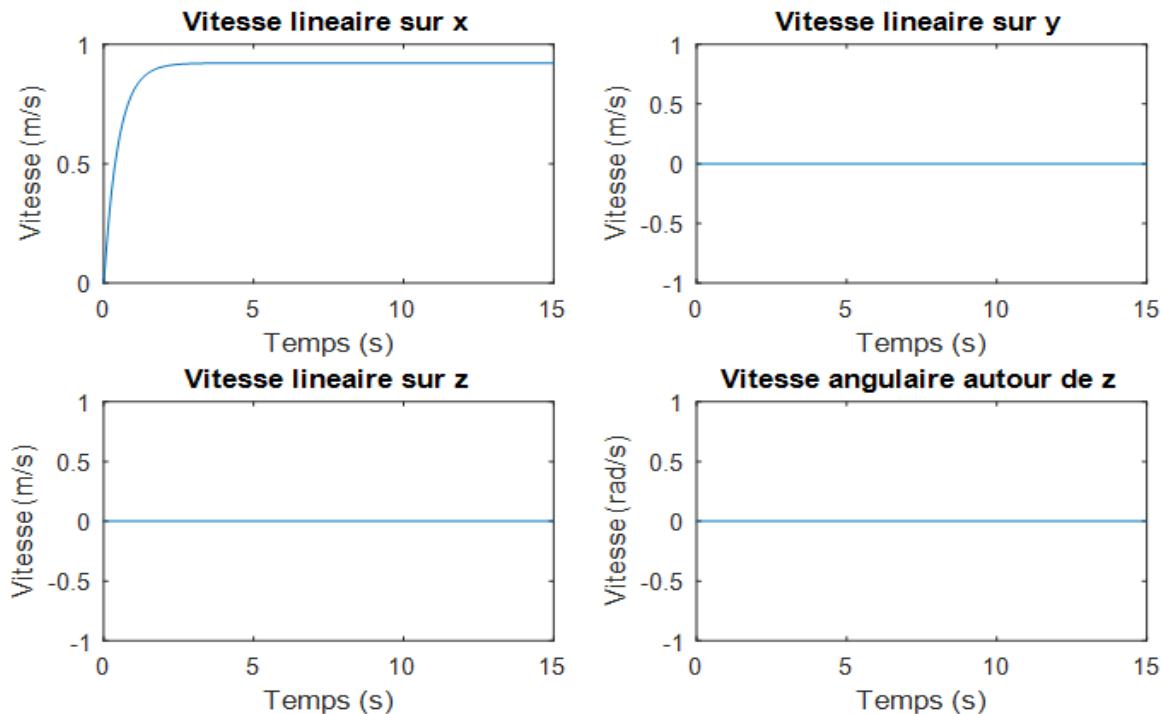


Figure 3.15 – vitesses linéaires et angulaires pour le test 1er cas.

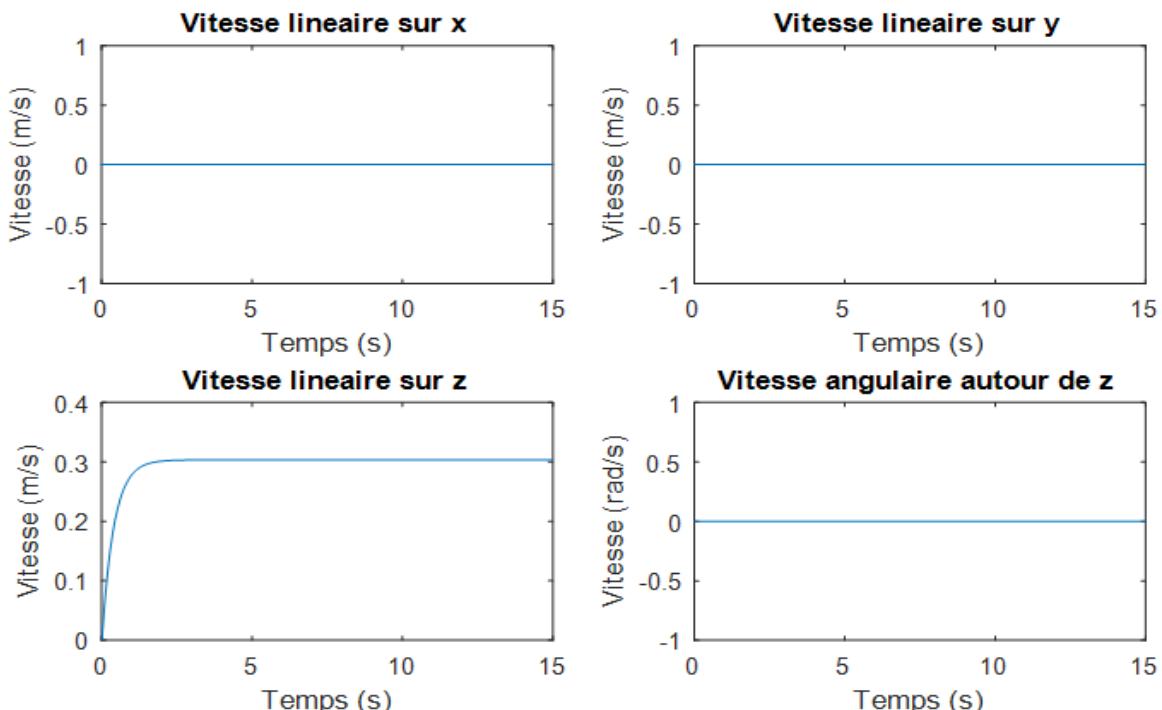


Figure 3.16 – vitesses linéaires et angulaires pour le test 2éme cas.

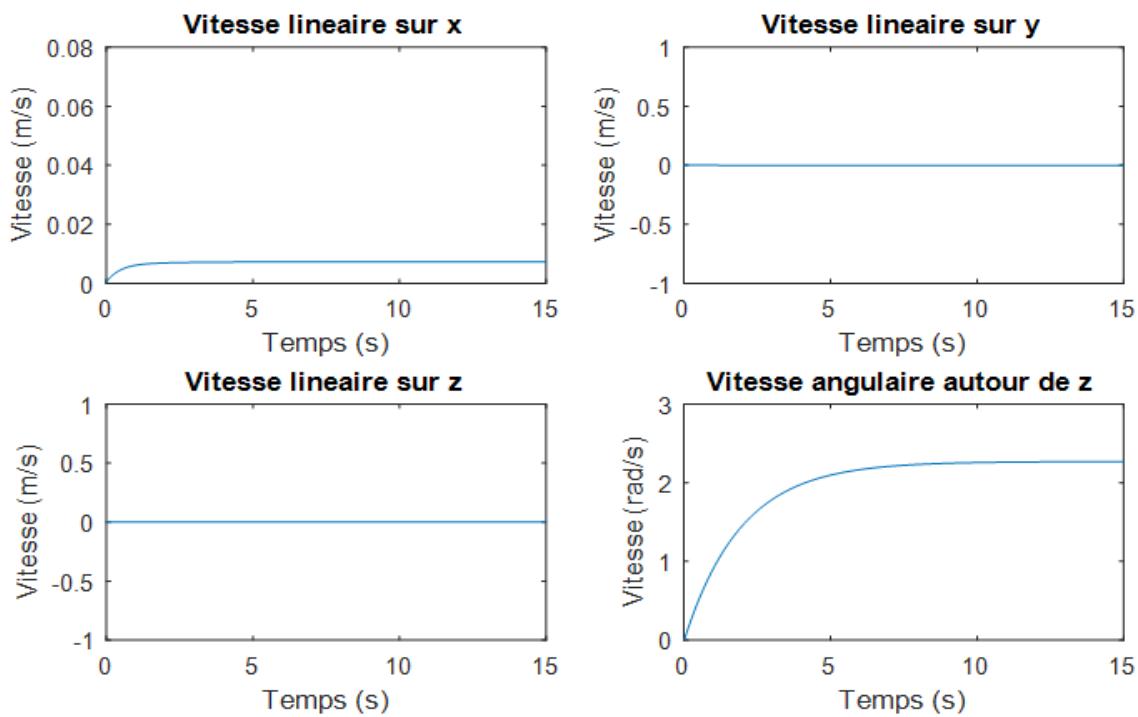


Figure 3.17 – vitesses linéaires et angulaires pour le test 3ème cas.

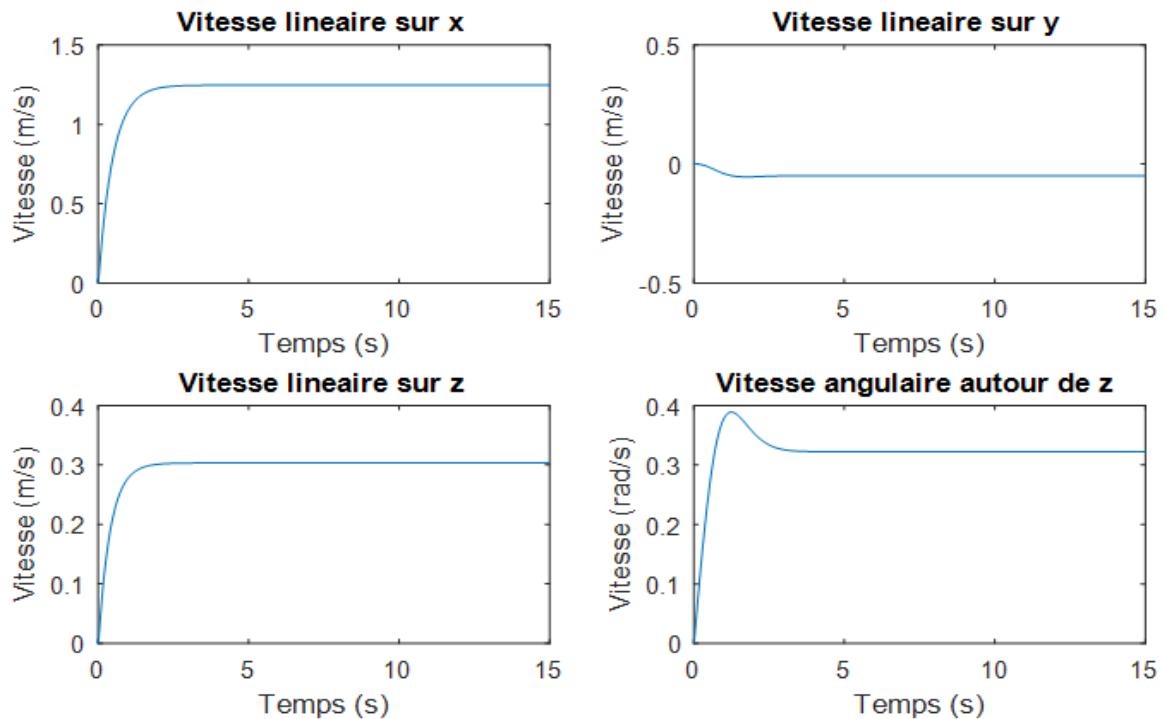


Figure 3.18 – vitesses linéaires et angulaires pour le test 4ème cas.

Interprétation des résultats

Dans le premier cas on a donné deux forces équivalentes une pour le propulseur 1 (F1) et l'autre pour le propulseur 2 (F2), on remarque qu'on a obtenu une vitesse seulement selon x par contre pour le reste des axes la vitesse est nul.

Dans le deuxième cas on a donné deux forces équivalentes pour F3 et F4, on a obtenu une vitesse seulement sur z.

Dans le troisième cas on a donné deux valeurs presque distinctes pour F1 et F2 cela nous a donné une rotation autour de z et un petit mouvement selon x.

Dans le quatrième cas on a donné quatre valeurs différentes pour les quatre propulseurs on a obtenu trois mouvements c à dire un mouvement selon x, selon z et autour du z.

3.1.1 Conclusion

Dans ce chapitre on a pu identifier notre propulseur dans un banc de test en spécifiant les différents composants électroniques nécessaires pour satisfaire ce test. Grâce à ce test on a pu déterminer une courbe qui présente la variation de la force par rapport au signal PWM.

Dans la deuxième partie du chapitre on a représenté notre modèle dans Simulink et on a donné des scénarios pour étudier le comportement de notre ROV.

Dans le chapitre suivant on va entamer la commande du ROV.

Chapitre 4

La commande du ROV

4.1 Introduction

Pour satisfaire la commande du notre modèle il faut utiliser un contrôleur, généralement on trouve dans les PFEs l'utilisation des lois de commande classique comme le PID. Le problème avec les lois classiques est la non robustesse vis à vis les perturbations et la non linéarité, c'est pour cela on a décidé de faire une étude comparative entre trois lois de commandes qui sont le PID, FOPID (PID fractionnaire) et SMC (commande par mode glissant).

4.2 Le PID

4.2.1 Introduction

Il est intéressant de noter que plus de la moitié des contrôleurs industriels utilisés aujourd’hui sont des contrôleurs PID. L’utilité des contrôles PID réside dans leur applicabilité générale à la plupart des systèmes de contrôle. Le contrôle PID a prouvé leur utilité pour fournir un contrôle satisfaisant, bien que dans nombreuses situations données, ils peuvent ne pas fournir un contrôle optimal. [53]

4.2.2 Définition du contrôleur PID (proportionnel-intégral-dérivé)

C'est un contrôleur largement utilisé dans les systèmes de contrôle industriels et dans diverses autres applications nécessitant un contrôle modulé en continu. Un contrôleur PID calcule en permanence une valeur d'erreur $e(t)$ en tant que différence entre une valeur de consigne souhaitée et une variable de processus mesurée et applique une correction basée sur la proportionnelle, les termes intégraux et dérivés (notés respectivement P, I et D).

La figure (Fig. 4.1) montre le PID dans une boucle de contrôle .

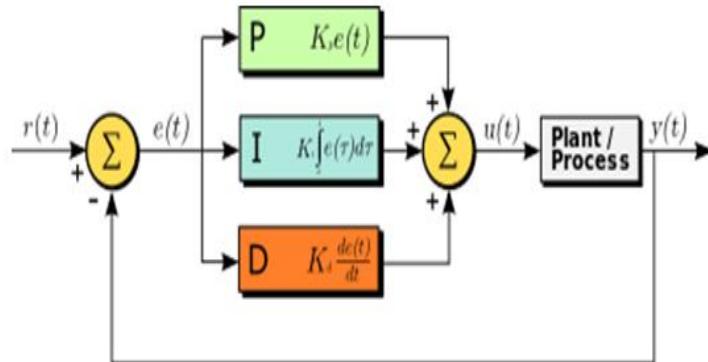


Figure 4.1 – Un schéma fonctionnel d'un contrôleur PID dans une boucle de contrôle . [30]

4.2.3 Caractéristiques des contrôleurs P, I et D

Un contrôleur proportionnel (K_p) aura pour effet de réduire le temps de montée et réduira mais n'éliminera jamais l'erreur en régime permanent. Une commande intégrale (K_i) aura pour effet d'éliminer l'erreur d'état d'équilibre, mais elle risque d'aggraver la réponse transitoire. Un contrôle dérivé (K_d) aura pour effet d'accroître la stabilité du système, de réduire les dépassements et d'améliorer la réponse transitoire. Les effets de chacun des contrôleurs K_p , K_d et K_i sur un système en boucle fermée sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Table 4.1 – Caractéristiques des contrôleurs P, I et D

Paramètres	Temps de montée	Dépassement	Temps d'établissement	Erreur
K_p	Démunie	Augmente	Petit changement	Démunie
K_i	Démunie	Augmente	Augmente	éliminé
K_d	Petit changement	Démunie	Démunie	Petit changement

4.3 Implémentation du PID dans simulink

Dans ce qui suit on va faire l'implémentation du contrôleur PID en cascade avec notre modèle. Pour déterminer les paramètres de contrôleur on va utiliser la méthode de tune dans Matlab en se basant sur l'approche suivante:

On commence par déterminer les paramètres du contrôleur en utilisant l'approche SISO dans le cas des vitesses et positons après cela on valide le comportement de notre système par l'approche MIMO dans le cas des trajectoires.

4.3.1 Correcteur Vitesse

Pour déterminer les paramètres du correcteur vitesses on va utiliser l'approche SISO (single input single output) pour chaque degré de liberté on va utiliser un contrôleur placé en amont du système. La saturation est ajoutée dans le bloc de PID, sa valeur est inférieure à la force maximale générée par les deux propulseurs horizontaux. La même procédure est utilisée pour chaque degré de liberté.

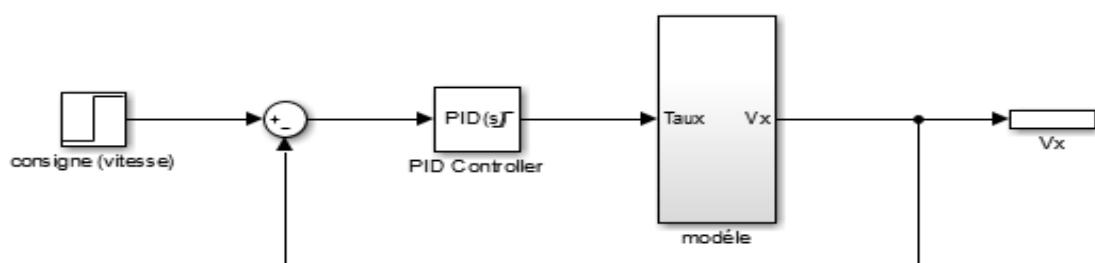


Figure 4.2 – Schéma bloc de la synthèse du régulateur vitesse V_x .

Résultats

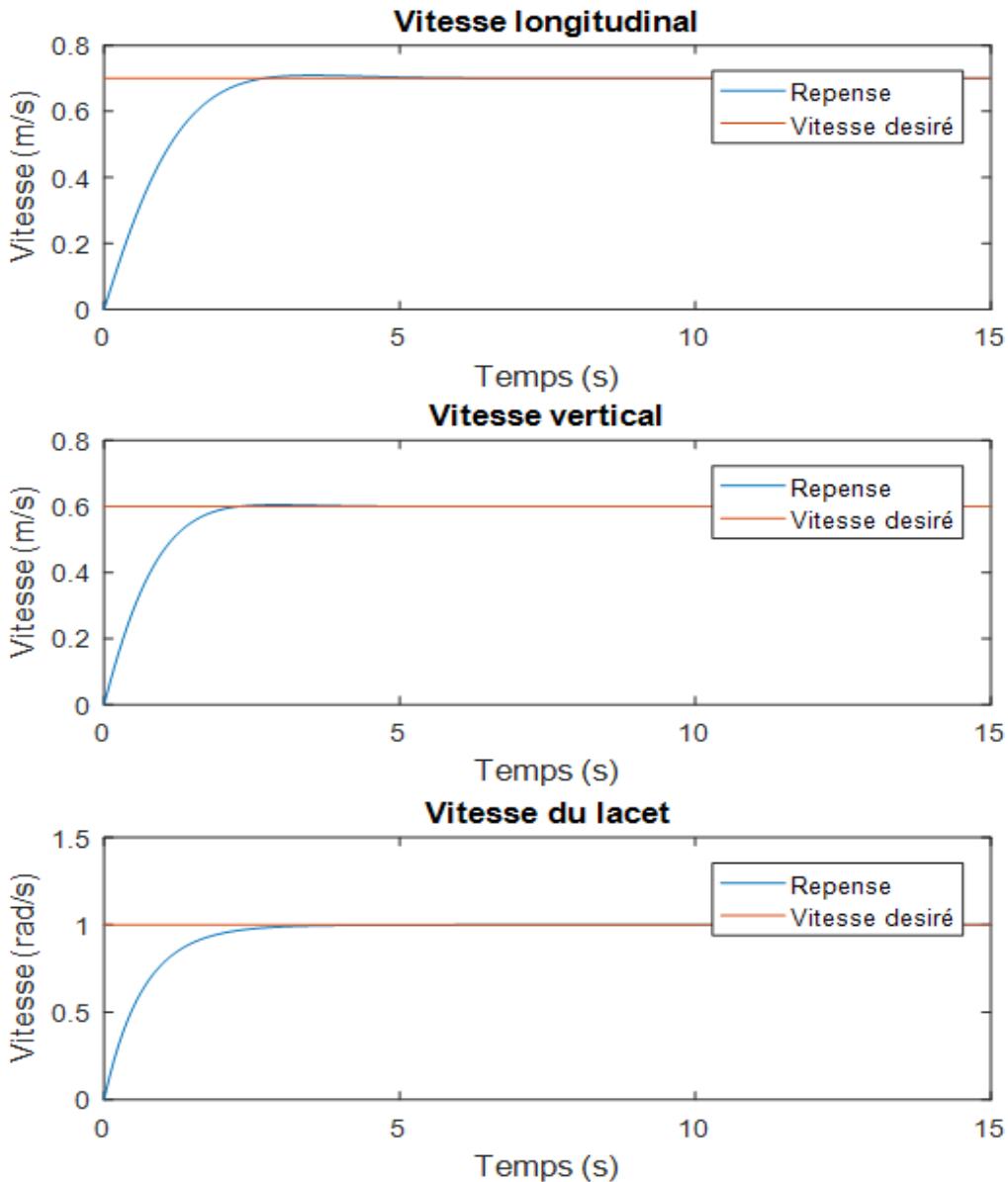


Figure 4.3 – Réponses indicielles avec contrôleur vitesse.

Interprétation des résultats

La fonction tune nous a aidés à trouver les paramètres de notre contrôleur vitesse pour notre système, les réponses obtenues sont montrées dans la figure 4.3.

On remarque que ces réponses ont un dépassement nul ou presque nul et un temps de réponse rapide 2.0659s pour la vitesse longitudinale, 1.6594s pour la vitesse verticale et 1.9665s pour la vitesse du lacet.

4.3.2 Correcteur position longitudinal nx

Le PID dans ce cas est destiné à la commande de la position, on va utiliser l'approche MIMO en plaçant le correcteur position en cascade avec le correcteur vitesse. La même procédure est répétée pour chaque degré de liberté.

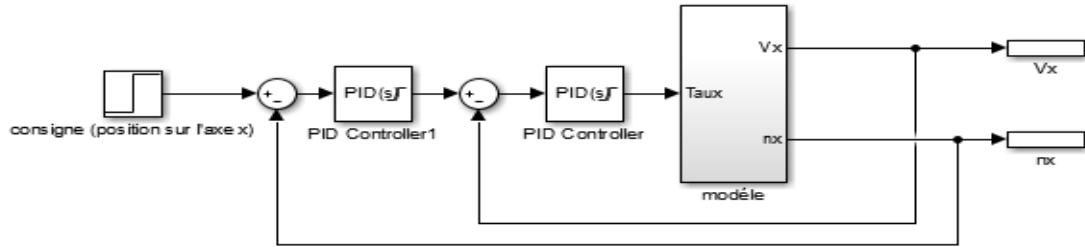


Figure 4.4 – Schéma bloc de la synthèse du régulateur position nx.

Résultat

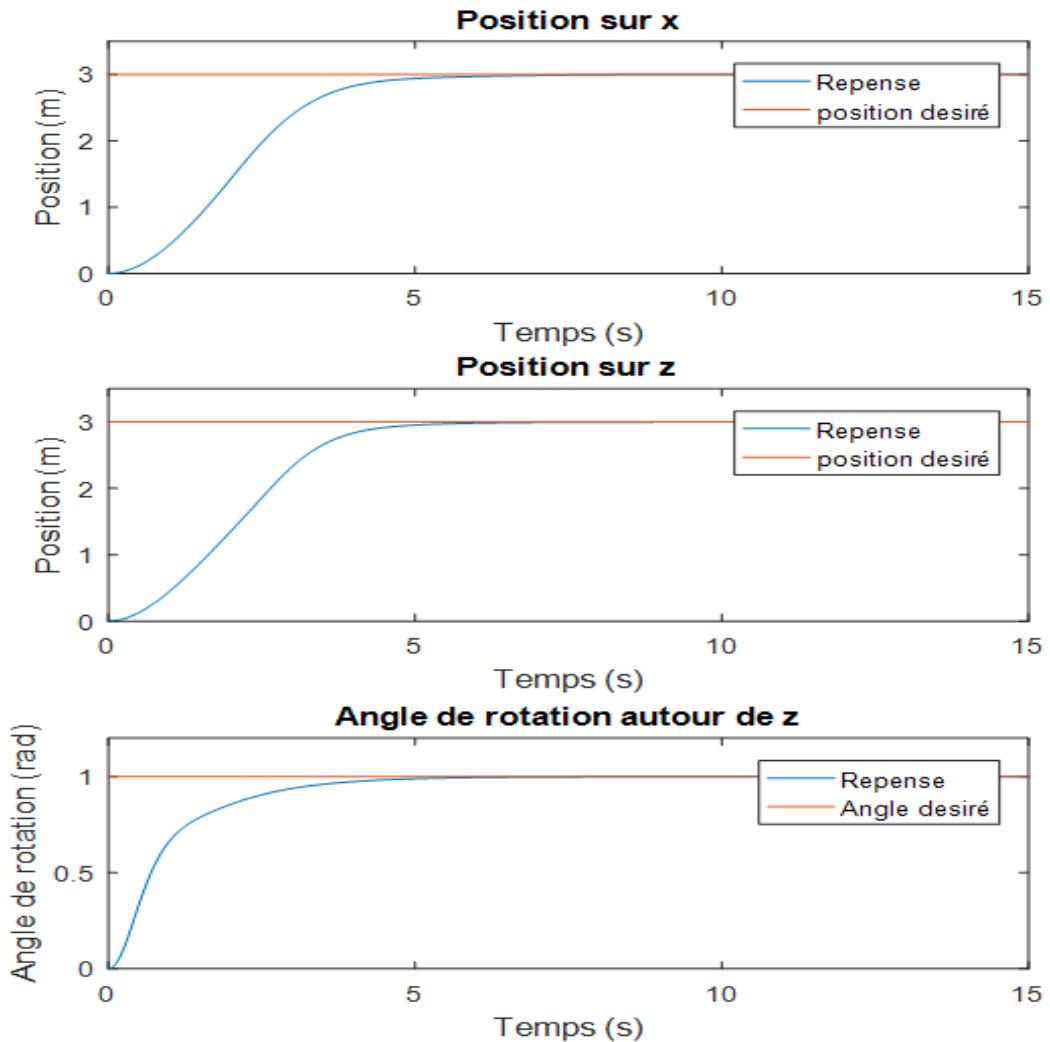


Figure 4.5 – Réponses indicielles des positions par PID.

Interprétation

Pour les contrôleurs de position on a ajouté une saturation de 1m/s, avec l'ajustement des paramètres on a obtenu les réponses montrées dans la figure 4.5. Les réponses obtenues ont un dépassement nul et un temps de monté de 4.1271s pour la position sur x, 4.0694s pour la position sur z et de 3.2401s pour l'angle de rotation autour du z avec la position désirée sur l'axe x et z de 3m et un angle de rotation de 1 radian.

Après la validation de notre modèle et la détermination des paramètres PID on aura le schéma suivant:

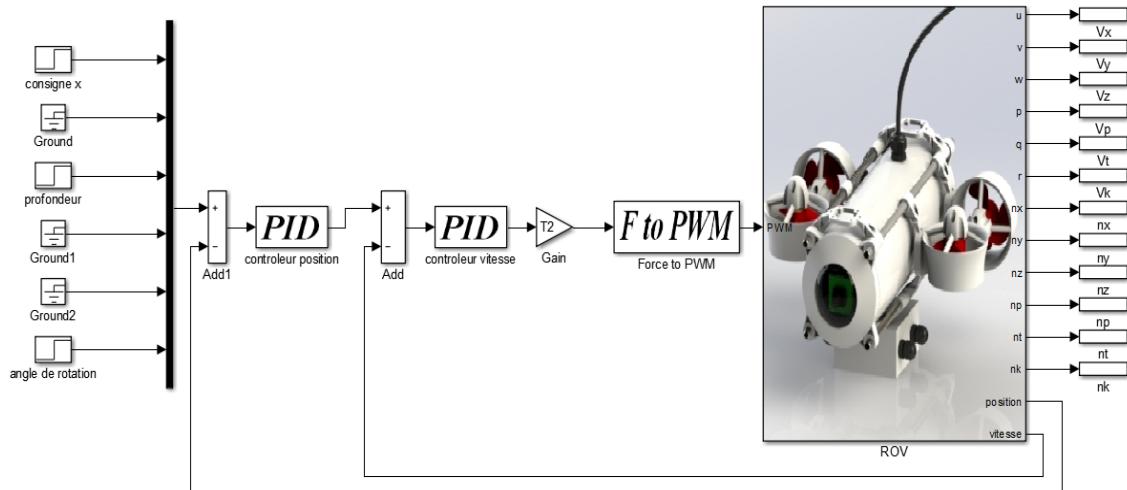


Figure 4.6 – Modèle du ROV avec le bloc F to PWM .

La relation qui lie la force avec le signal PWM est présentée par la figure suivante :

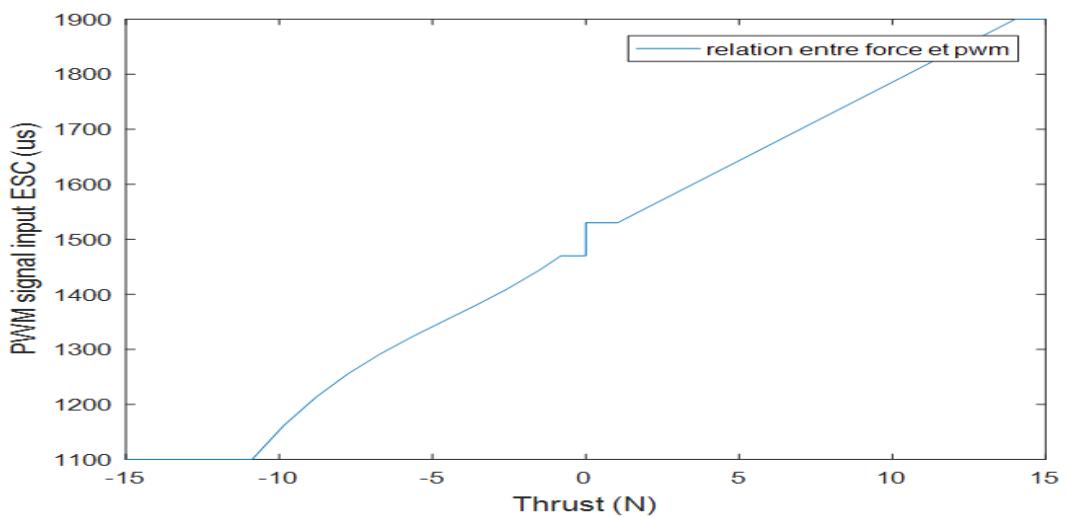


Figure 4.7 – Relation entre force et PWM .

Pour des trajectoires désirées le résultat est :

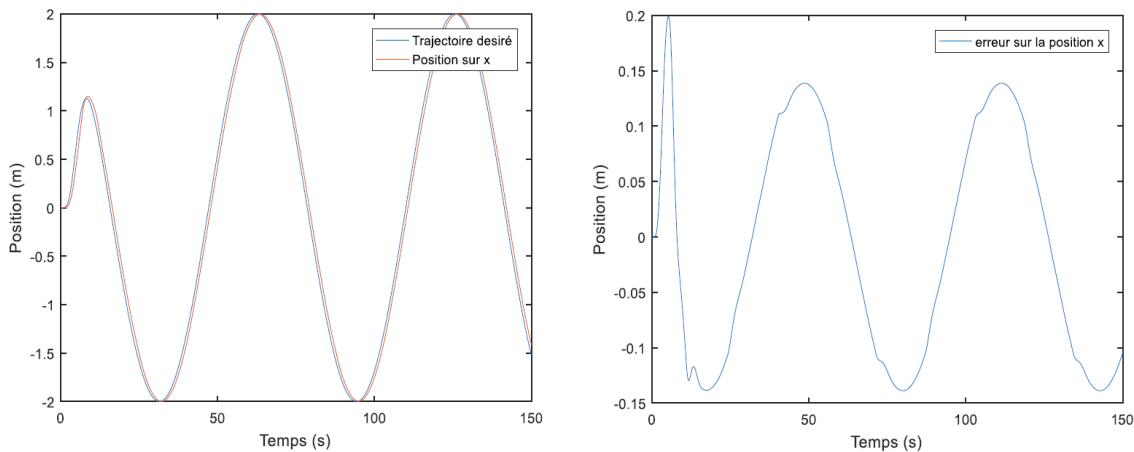


Figure 4.8 – Trajectoire selon x.

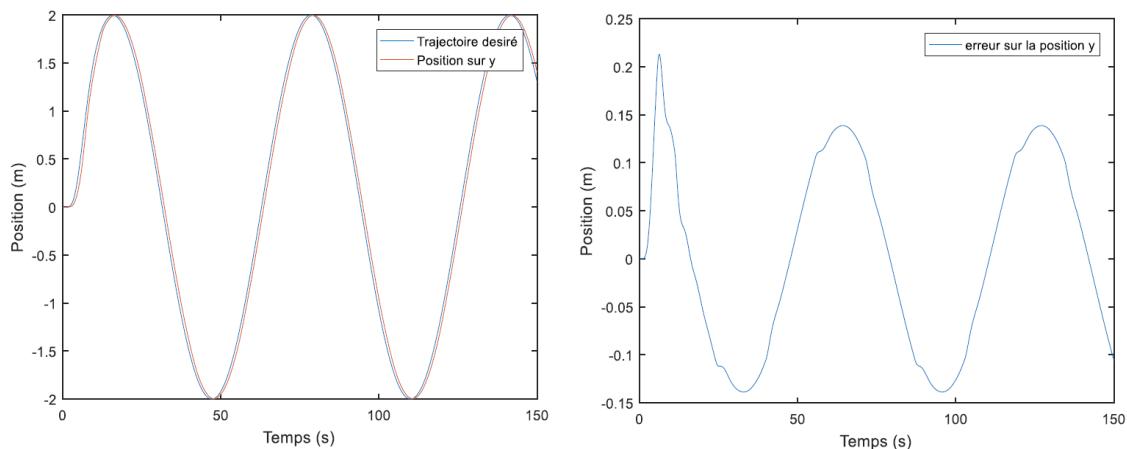


Figure 4.9 – Trajectoire selon y.

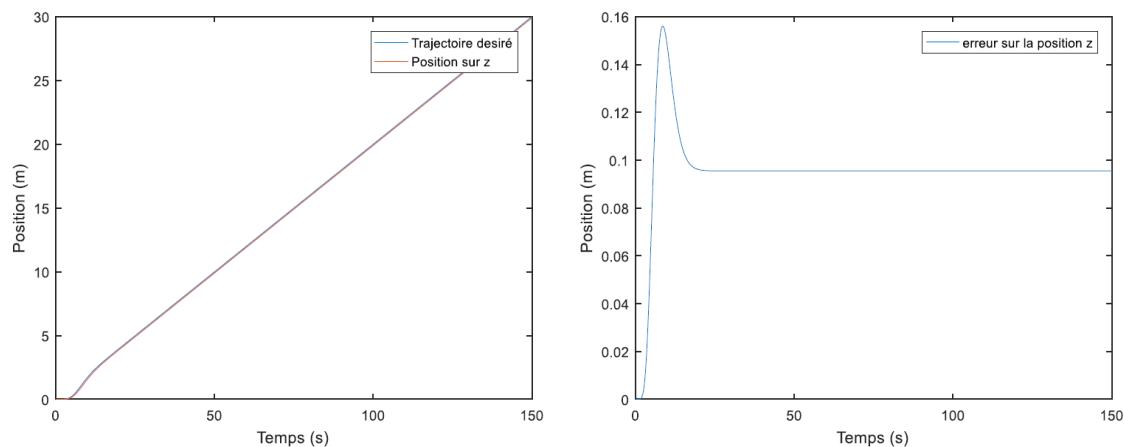


Figure 4.10 – Trajectoire selon z.

Pour bien voir la trajectoire parcourue par le ROV nous avons utilisé une représentation 3D montré dans la figure suivante 4.20 :

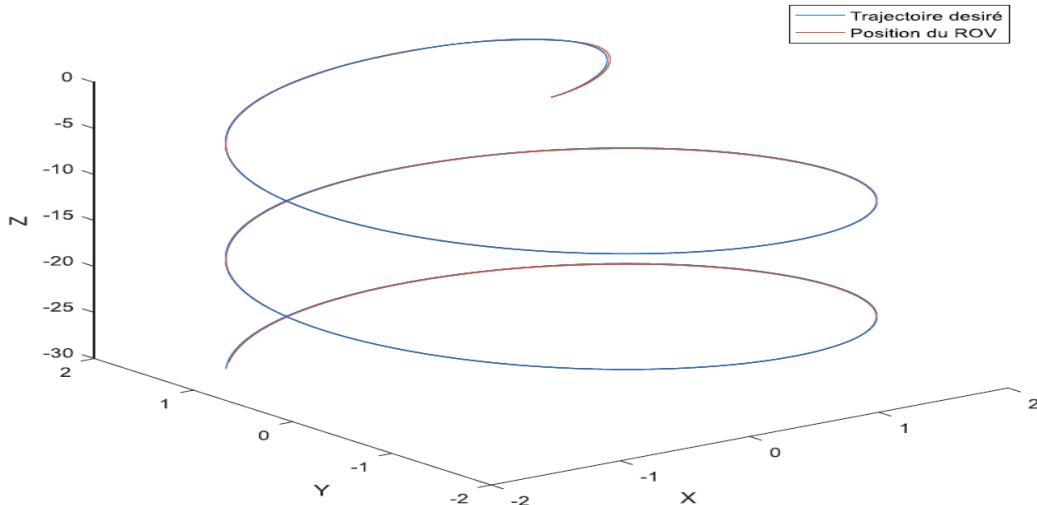


Figure 4.11 – Vue 3d de la trajectoire selon x,y et z .

4.4 Le PID fractionnaire

4.4.1 Introduction

Les contrôleurs PID fractionnaires (FOPID) ont attiré l'attention de nombreux chercheurs ces dernières années car ils sont capables de fournir de meilleures performances que les PID traditionnels (d'ordre 1). En effet, la présence de cinq paramètres pour sélectionner augmente la flexibilité de la conception et permet à l'utilisateur de façonner la fonction de transfert en boucle ouverte de manière plus appropriée pour une tâche de contrôle donnée. Cependant, cela implique également que le réglage du contrôleur peut être beaucoup plus complexe. Afin de résoudre ce problème, différentes méthodes pour la détermination des paramètres du contrôleur FOPID ont été proposés par ces méthodes on a water cycle algorithm (WCA), les réseaux de neurones (NNA) et genetic algorithm (GA).

4.4.2 Le contrôleur fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$

Les contrôleurs PID classiques dominent toujours dans les contrôleurs industriels, en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de la disponibilité de nombreuses méthodes de réglage simples basées sur une installation minimale de connaissance du modèle. La fonction de transfert en s, un domaine du contrôleur FOPID, est donnée par :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu$$

Les ordres λ et μ peuvent être des nombres réels quelconques. L'équation du régulateur PID classique peut être obtenue en réglant $\lambda = \mu = 1$. Lorsque $\lambda = 1$ (ou 0) et $\mu = 0$ (ou 1) un régulateur PI (ou PD) normal peut être obtenu. Pour régler les paramètres FOPID, de nombreux chercheurs ont utilisé certaines des méthodes conventionnelles qui

sont empiriques et des approches de réglage expérimentales. Après ça, ils accordent l'ordre fractionnaire (λ et μ) dans la dernière étape de la méthode de réglage pour plus de flexibilité.[31] Fig. 3.1 montre que le régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$ génère et étend le régulateur PID classique à partir d'un point à un plant.[31]

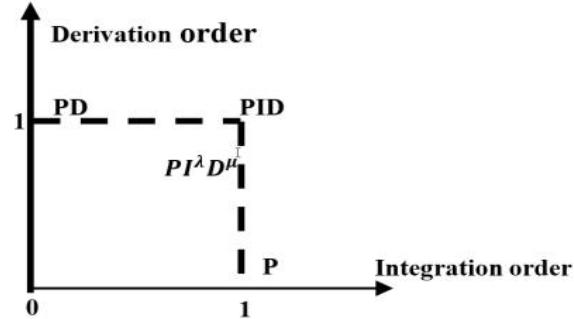


Figure 4.12 – Contrôleur PID et PID fractionnaire. [31]

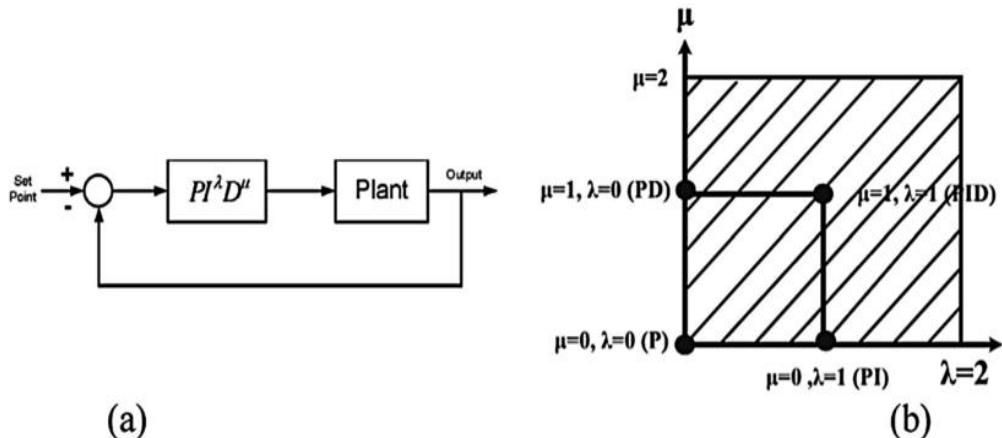


Figure 4.13 – Contrôleur PID à commande fractionnée (b) La convergence du contrôleur PID fractionnaire.[32]

Il ressort clairement de la Fig. 3.2 (b) qu'en sélectionnant $\lambda = 1$ et $\mu = 1$, un contrôleur PID classique peut être récupéré. En utilisant $\lambda = 1$, $\mu = 0$ et $\lambda = 0$, $\mu = 1$, correspond aux contrôleurs PI et PD conventionnels, respectivement. Tous ces types classiques de contrôleurs PID sont des cas particuliers du contrôleur FOPID.

4.4.3 Critères de réglage du FOPID par algorithmes d'optimisations [3]

Pour concevoir des contrôleurs basés sur le domaine temporel, les contrôleurs visent à minimiser les différents indices de performance intégraux à savoir:

- Integral square error

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt$$

- Integral absolute error

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt$$

- Integral time - square error

$$ITSE = \int_0^{\infty} t^2 |e| dt$$

- Integral time - absolute error

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e| dt$$

Afin de déterminer les paramètres du PID fractionnaire on va utiliser des algorithmes d'optimisation sous logiciel Matlab parmi ses algorithmes on va utiliser trois méthodes différentes afin d'obtenir le meilleur résultat parmi ses méthodes on a water cycle algorithm(WCA), neural network algorithm(NNA) et genetic algorithm(GA).

4.5 Water cycle algorithm (WCA)

Le WCA est basé sur l'observation du processus du cycle de l'eau et de la façon dont les rivières et les ruisseaux s'écoulent en descente vers la mer dans la nature. Il a été introduit pour la première fois par Eskandar et al. (2012) pour résoudre des problèmes d'optimisation d'ingénierie. Ils ont montré que la WCA est plus à même de trouver une gamme de solutions plus large que le GA et le PSO (particle swarm optimisation). Comparé au GA et au PSO, le WCA a démontré un succès considérable en fournissant de bonnes qualités de solution à de nombreux problèmes d'optimisation d'ingénierie complexes [54]. La procédure du WCA est représenté dans l'annexe (Fig. C.2).

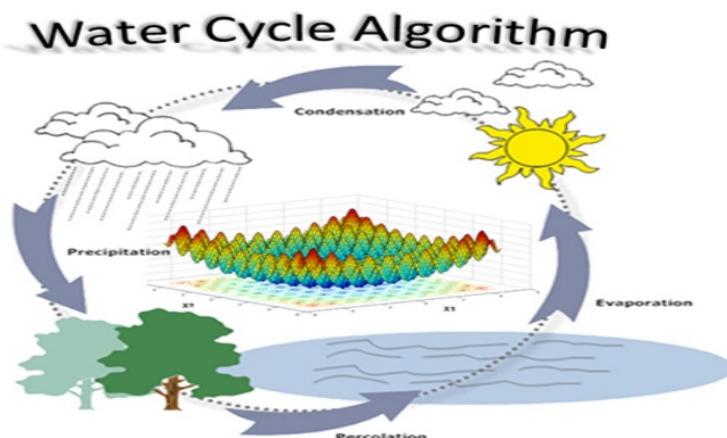


Figure 4.14 – Le water cycle algorithm. [33]

4.6 Neural network algorithm (NNA)

C'est un nouvel algorithme d'optimisation métaheuristique, inspiré des systèmes nerveux biologiques et des réseaux de neurones artificiels (RNA) sont proposés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. La méthode proposée, appelée algorithme de réseau neuronal (NNA), est développée sur la base de la structure unique des ANN. La NNA bénéficie de la structure complexe des RNA et de ses opérateurs afin de générer de nouvelles solutions candidate. Être un algorithme sans aucun effort pour affiner les paramètres initiaux et statistiquement supérieurs peut distinguer le NNA des autres optimiseurs rapportés. On peut en conclure que les ANN et sa structure particulière peuvent être utilisés avec succès et modélisés en tant que méthode d'optimisation métaheuristique pour traiter les problèmes d'optimisation. Basé sur la terminologie ANNs, le NNA est une méthode adaptative non supervisée pour résoudre des problèmes d'optimisation. Non supervisé dans NNA signifie qu'il n'y a aucun indice et aucune information sur l'optimum global et que les solutions ont été mises à jour en apprenant de l'environnement. Le NNA est une méthode d'optimisation du perceptron monocouche ayant un auto-retour. [35] L'explication d'algorithme NNA est représenté dans l'annexe (Fig. C.3).

4.7 Genetic algorithm (GA)

Le GA a été introduit pour la première fois par Holland (1975) et est rapidement devenue la technique la plus connue. Le GA est une méthode d'optimisation qui fonctionne en imitant les principes évolutifs et le traitement chromosomique en génétique naturelle. Il appartient à la classe plus large des algorithmes évolutifs (EA), qui génèrent des solutions aux problèmes d'optimisation en utilisant des techniques inspirées de l'évolution naturelle telle que l'héritage, la mutation, la sélection et le croisement. Un GA commence sa recherche avec un ensemble aléatoire de solutions généralement codées dans des chaînes binaires. Chaque solution se voit attribuer une aptitude directement liée à la fonction objective du problème d'optimisation. Par la suite, la population de solutions est modifiée en une nouvelle en appliquant trois opérateurs similaires à la reproduction, au croisement et à la mutation des opérateurs génétiques naturels. Il fonctionne de manière itérative en appliquant successivement ces trois opérateurs à chaque génération jusqu'à ce qu'un critère de terminaison soit satisfait [54].

La procédure du GA est représentée dans le schéma d'annexe (Fig. C.4)

4.7.1 Comparaison entre les trois méthodes d'optimisation

Pour faire cette comparaison on va utiliser ces trois méthodes pour tracer la courbe de la position. On a commencé par placer un contrôleur PID de vitesse et on a déterminé ses paramètres par l'optimisation, après cela on a placé un contrôleur PID de position en cascade avec le contrôleur de vitesse et on a déterminé les paramètres par les trois méthodes d'optimisation.

Le résultat obtenu est (Fig. 4.15):

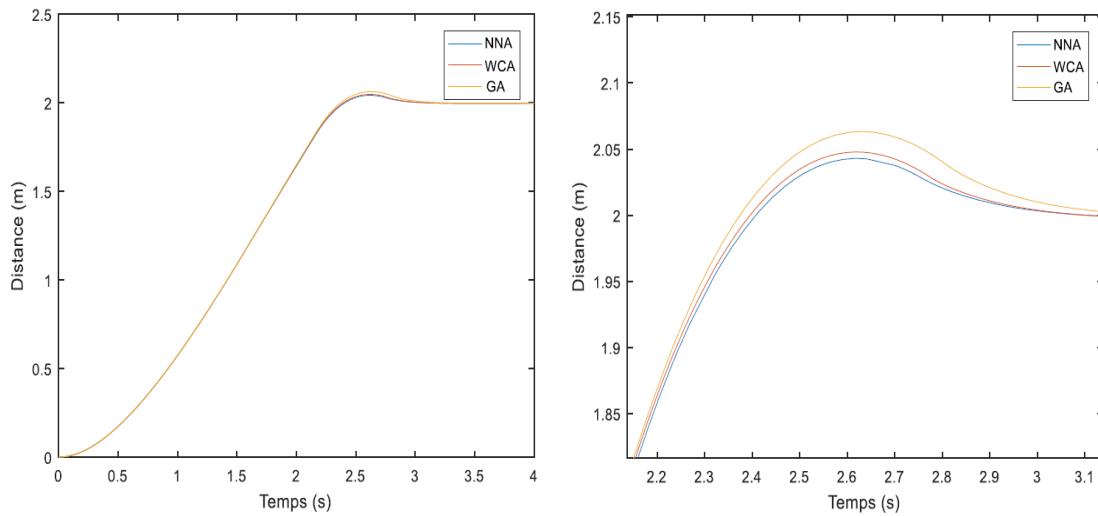


Figure 4.15 – Comparaison entre les trois méthodes d'optimisation.

Le tableau 4.2 présente une comparaison des performances du système avec les trois méthodes.

Table 4.2 – Comparaison entre GA, WCA et NNA

	Temps de réponse	Dépassement m (%)	Valeur optimisé
GA	2.2329	0.0633(3.165%)	2.3065
WCA	2.2403	0.0478(2.39%)	2.2922
NNA	2.2466	0.0429(2.145%)	2.2913

D'après ces résultats trouvés on remarque qu'il n'y a pas une grande différence dans les réponses mais à partir du tableaux il est clair que la réponse obtenue par les paramètres trouver en utilisant la méthode d'optimisation GA à un dépassement plus grand que les autres méthodes qui arrivent jusqu'à 3.165%. L'optimisation par NNA a donné une meilleure réponse entre ces trois méthodes dans le cas de dépassement et selon le critère d'optimisation mais pour le temps de réponse, l'optimisation par GA à un temps de réponse de 2.23s donc il est plus rapide que le NNA et le WCA qui ont un temps de 2.24s.

Les méthodes WCA et NNA ont donné des résultats satisfaisant, alors on a choisi d'utiliser la méthode de NNA (Neural network algorithm) pour optimiser les paramètres du PID fractionnaire.

4.8 Implémentation du $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire dans Simulink

4.8.1 Correcteur vitesse

Dans ce qui suit on va commencer la simulation dans Matlab en utilisant le $PI^\lambda D^\mu$ et en déterminant leurs paramètres par l'approche SISO, ce contrôleur est placé en cascade avec notre système. À la sortie du sommateur on a la différence entre la vitesse désirée et la vitesse mesurée cette erreur est entrée dans un bloc qui contient le critère d'optimisation. Il existe un lien entre le bloc dans Simulink et le programme d'optimisation dans Matlab donc en lançant l'exécution le programme commence à optimiser et on obtiendra les cinq paramètres de ce contrôleur.

La même procédure est utilisée pour chaque degré de liberté.

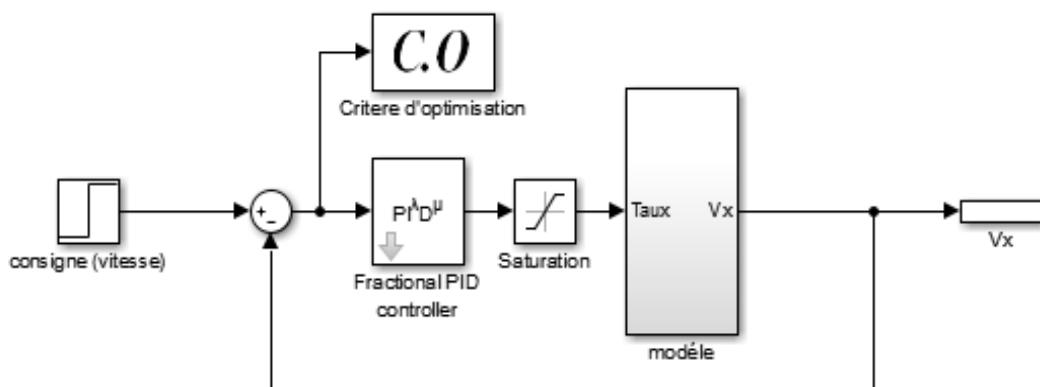


Figure 4.16 – Schéma bloc de la synthèse du correcteur fractionnaire de la vitesse V_x .

Résultats

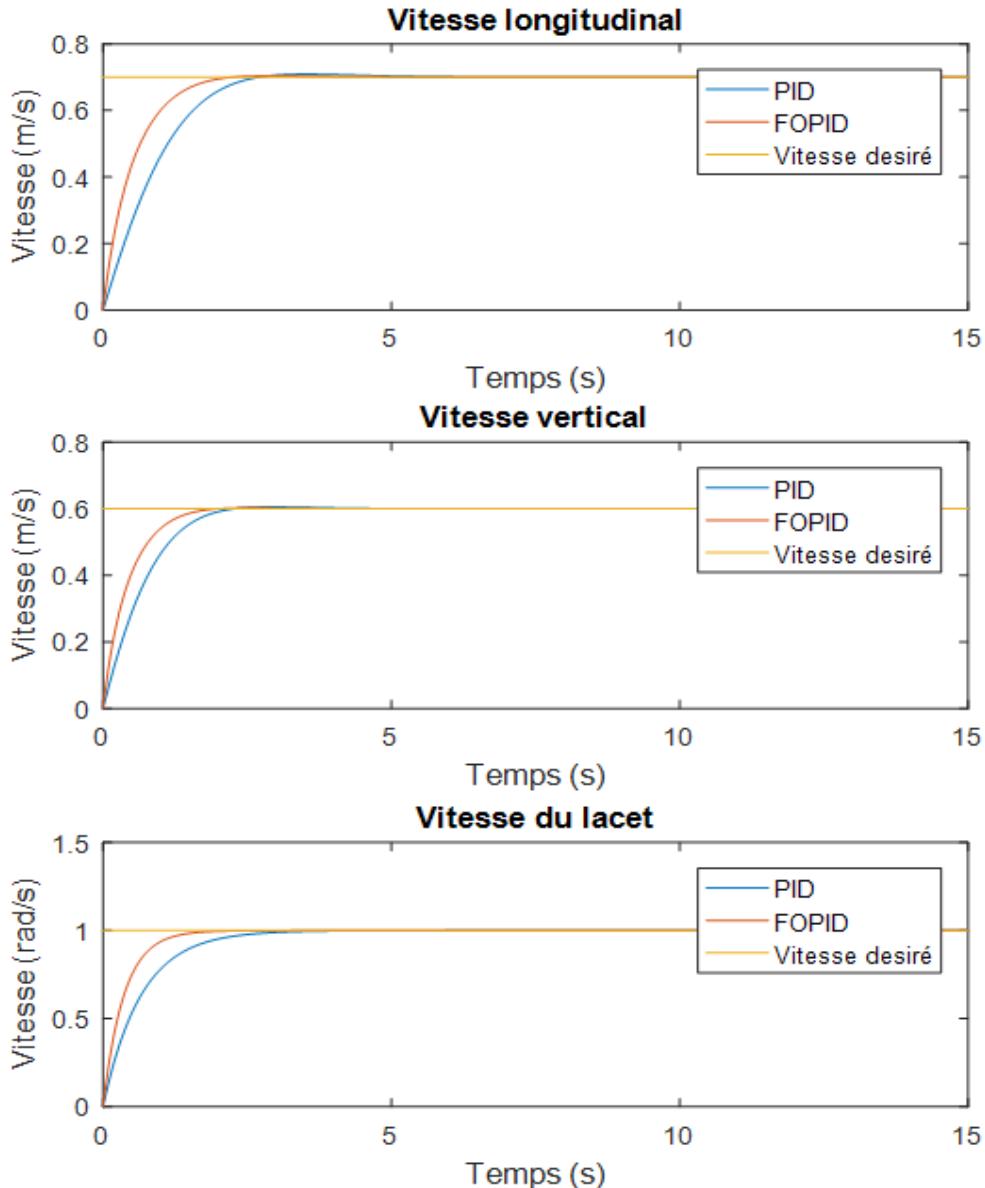


Figure 4.17 – les réponses de vitesse contrôlé par FOPID .

Interprétation des résultats

Par les réponses de vitesse obtenues par le contrôleur PID fractionnaire sont les mêmes obtenu par le PID dans le côté de dépassement c'est-à-dire nul ou presque nul. Mais pour le temps de réponse le PID fractionnaire est plus rapide avec une différence de 0.6045s pour la vitesse longitudinale, 0.4099s pour la vitesse verticale et de 0.4262s pour la vitesse du lacet.

4.8.2 Correcteur position

Dans ce cas on va utiliser l'approche MIMO le correcteur position est placée en cascade avec le correcteur vitesse.

La même procédure est répétée pour chaque degré de liberté.

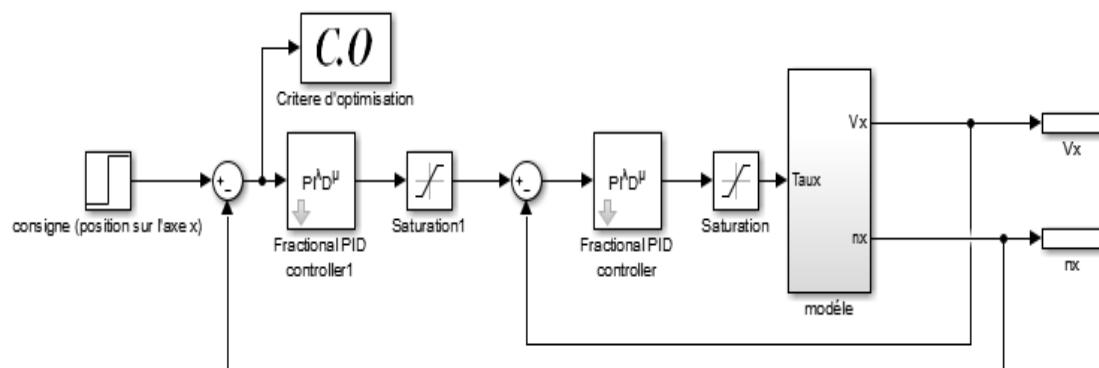


Figure 4.18 – Schéma bloc de la synthèse du correcteur fractionnaire de la position nx .

Résultat

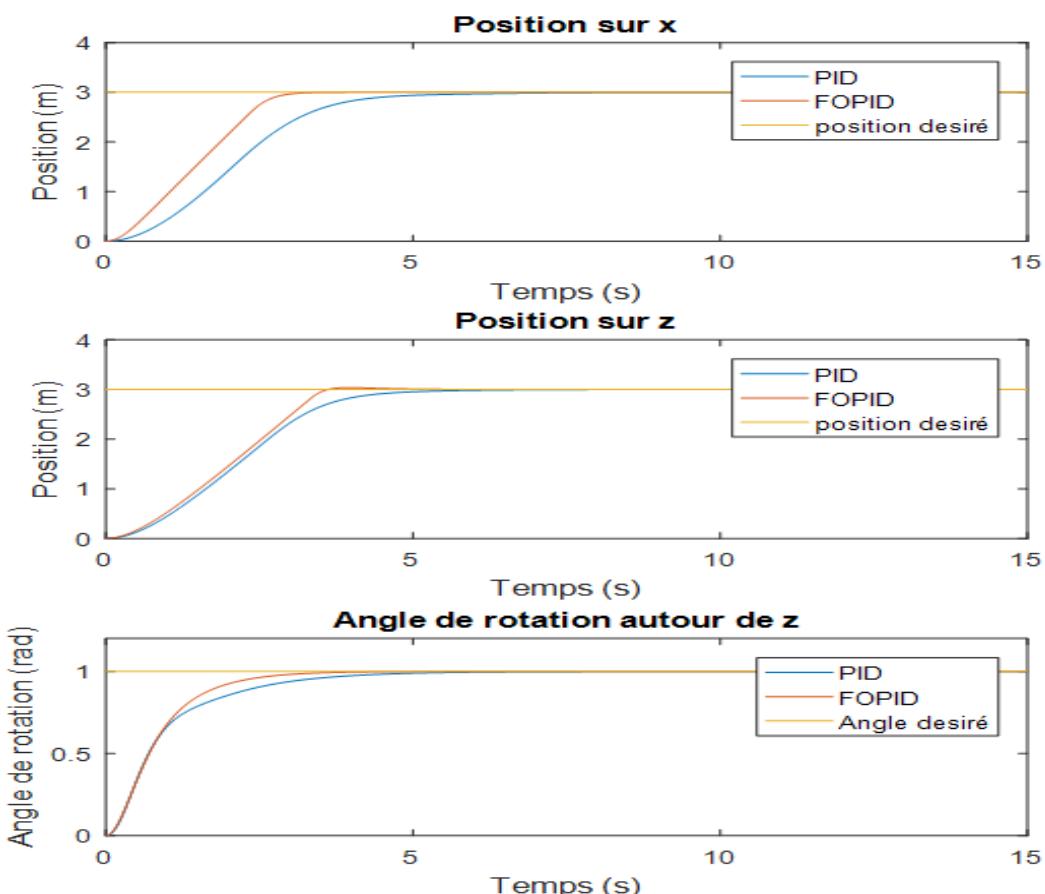


Figure 4.19 – Réponses indicielles de la commande des positions par FOPID .

Interprétation

Pour les contrôleurs de position on a ajouté une saturation de 1m/s et après l'optimisation des paramètres de ces contrôleurs on a obtenu ces résultats. Alors on remarque que les réponses de position obtenues par le contrôleur PID fractionnaire sont les mêmes que la réponse du PID dans le côté de dépassement c'est-à-dire nul ou presque nul. Mais pour le temps de réponse le PID fractionnaire est plus rapide avec une différence de 1.4807s pour la position sur x, 0.7019s pour la position sur z et de 0.9512s pour l'angle de rotation autour du z.

Notre modèle après l'assemblage de tous les contrôleurs FOPIID utilisé afin de contrôler la position du ROV :

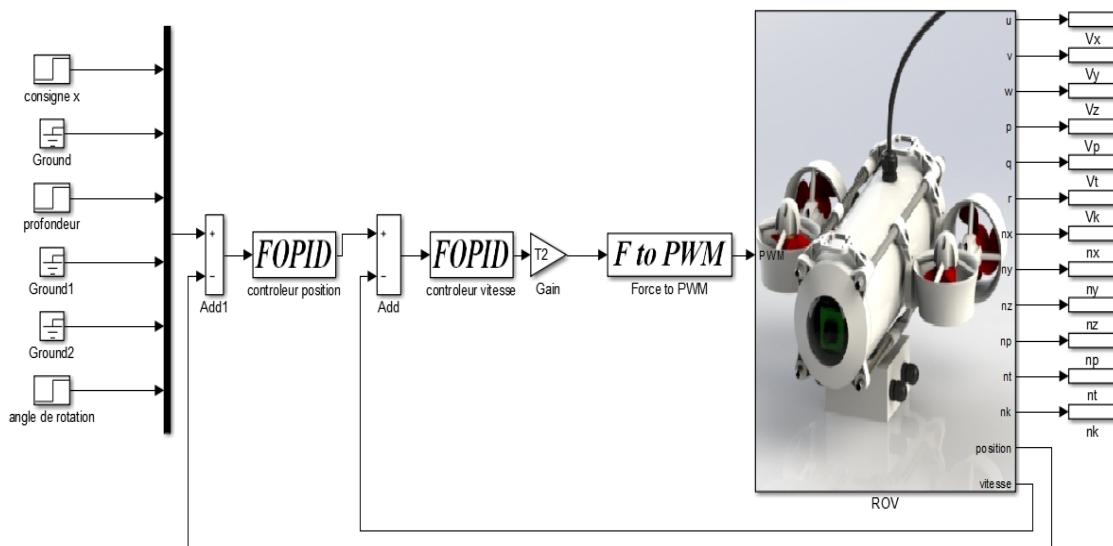


Figure 4.20 – Modèle du ROV avec bloc F vers PWM.

Trajectoires :

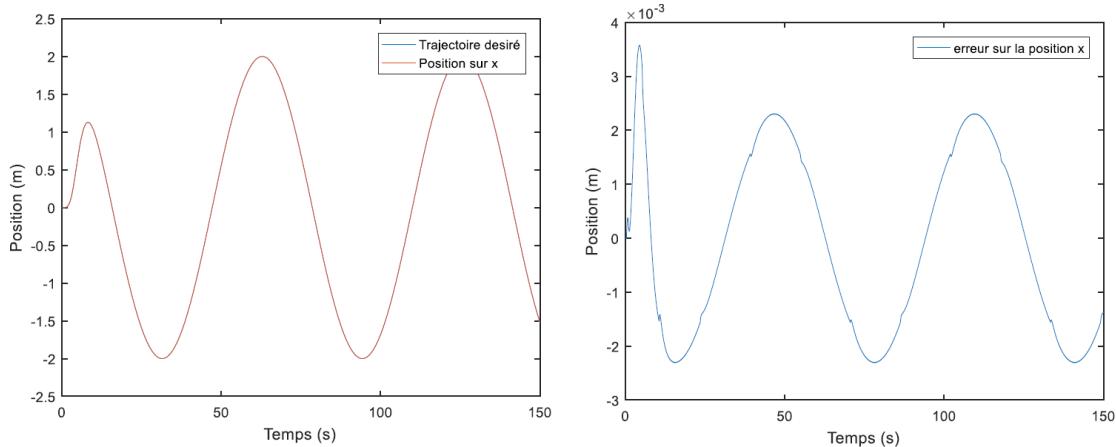


Figure 4.21 – Trajectoire selon x .

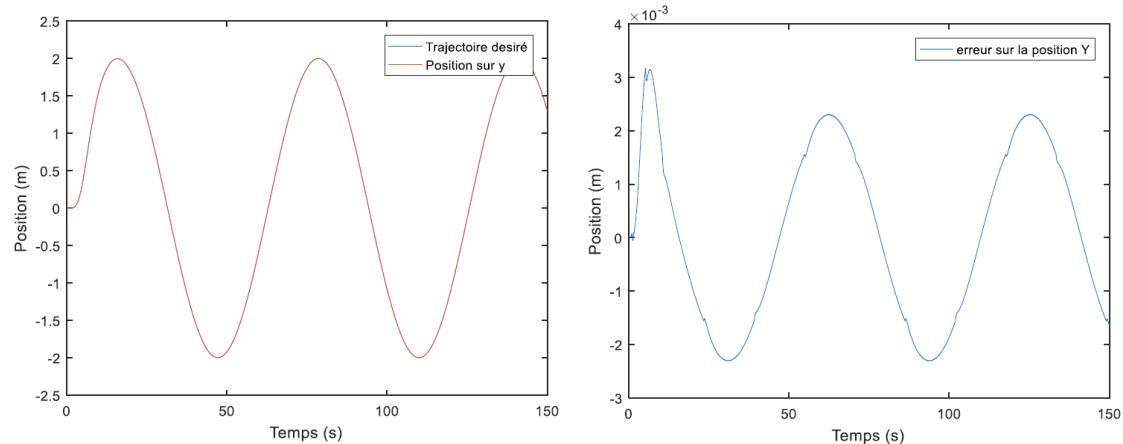
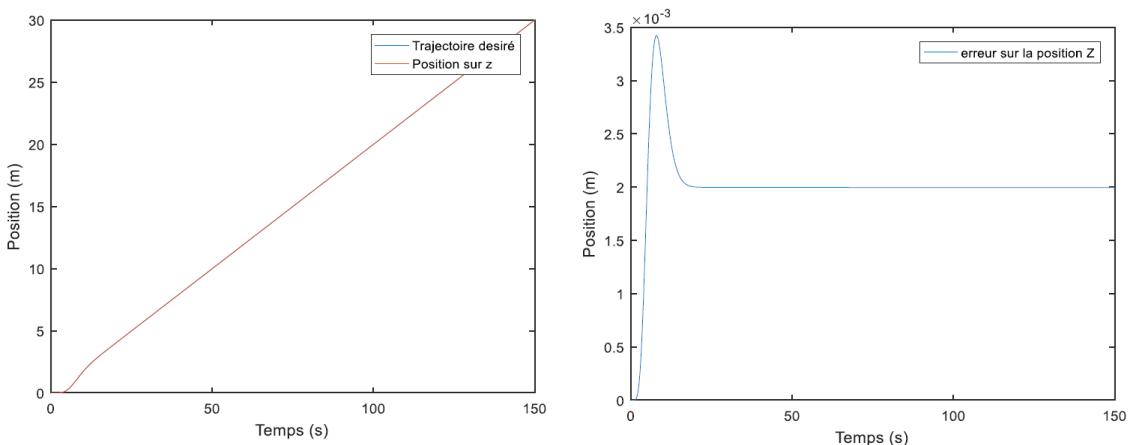


Figure 4.22 – Trajectoire selon y .



2.JPG

Figure 4.23 – Trajectoire selon z .

Pour bien voir la trajectoire parcourue par le ROV nous avons utilisé une représentation 3D montrée dans la figure suivante:

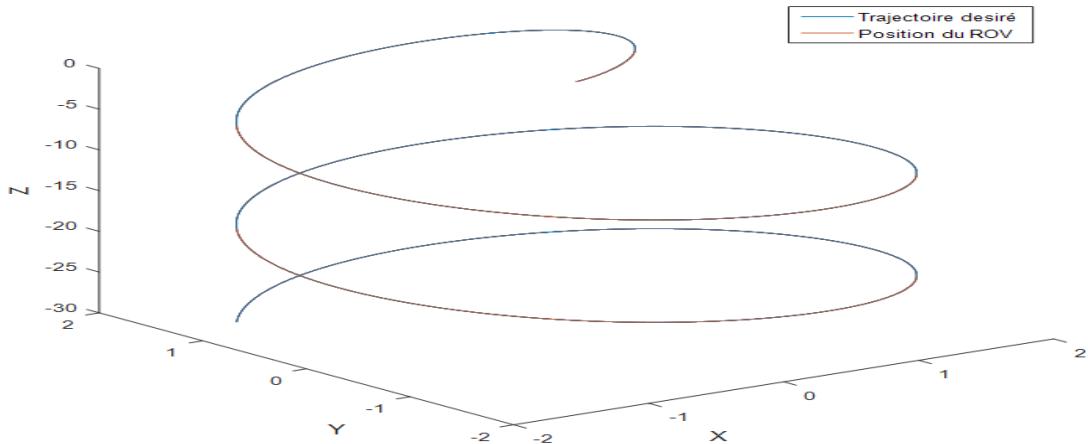


Figure 4.24 – Trajectoire selon x,y et z .

Interprétation des trajectoires obtenue par PID et FOPID

Après le test du contrôleur PID et FOPID pour des positions désirées, on a testé les deux contrôleurs pour une trajectoire et les résultats sont dans la figure 4.11 pour PID et la figure 4.24 pour le PID fractionnaire. Notre ROV a bien suivi la trajectoire, avec le contrôleur PID l'erreur de position est arrivée jusqu'au 0.2 m sur l'axe x, plus que 0.2 m sur l'axe y est 0.16 m sur l'axe z. Cette erreur a été minimisé par le contrôleur PID fractionnaire, l'erreur de position sur x et z est devenu 0.0035m et 0.003m sur l'axe y.

4.9 La commande par mode glissant

4.9.1 Introduction

Les systèmes non linéaires nécessitent la recherche des nouvelles méthodes afin d'obtenir des résultats robustes face aux perturbations et aux non linéarités.

La commande par mode glissant est l'une des méthodes qui peut satisfaire notre cahier des charges en assurant la stabilité, la grande précision et la rapidité.

Dans cette partie on va commencer par présenter la théorie de ce contrôleur ensuite on va commencer le développement des équations mathématiques. Après avoir notre équation mathématique finale de notre loi de commande on va commencer l'implémentations dans Simulink. Enfin on interprète les résultats obtenus et on fait une comparaison entre les lois de commande utilisée précédemment.

4.9.2 Définition de la commande par mode glissant

Le contrôle en mode glissant (SMC) est une technique de contrôle non linéaire présentant des propriétés remarquables de précision, de robustesse et de facilité de réglage et de mise en œuvre.

Les systèmes SMS sont conçus pour diriger les états du système sur une surface particulière dans l'état espace, nommé surface de glissement. Une fois la surface de glissement atteinte, le contrôle du mode de glissement maintient les états au voisinage proche de la surface de glissement. D'où le contrôle du mode glissant est une conception de contrôleur en deux parties. La première partie concerne la conception d'une surface de glissement afin que le mouvement de glissement satisfait aux spécifications de conception. La seconde concerne le choix d'une loi de commande qui rendra la surface de commutation attractive pour l'état du système. Il y a deux avantages principaux du contrôle en mode glissant. Premièrement, la dynamique le comportement du système peut être adapté par le choix particulier de la fonction de glissement. Deuxièmement, la réponse en boucle fermée devient totalement insensible à certaines incertitudes. Ce principe s'étend aux incertitudes des paramètres du modèle, aux perturbations et à la non-linéarité qui sont bornées. D'un point de vue pratique, SMC permet de contrôler des processus non linéaires soumis à perturbations externes et fortes incertitudes du modèle. [55]

4.9.3 Principe de fonctionnement [4]

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (Fig. 4.25). Les deux composantes de la commande sont alors définies par :

$$u = ueq + uglis \quad (4.1)$$

- ueq : elle est obtenue avec la méthode de la commande équivalente. Le principe est basé sur la détermination du comportement du système lorsqu'il est sur la surface de glissement s , soit $s = 0$. Cette commande peut être aussi bien linéaire que non linéaire.
- uglis : La commande discontinue permet au système d'atteindre et de rester sur la surface de glissement.

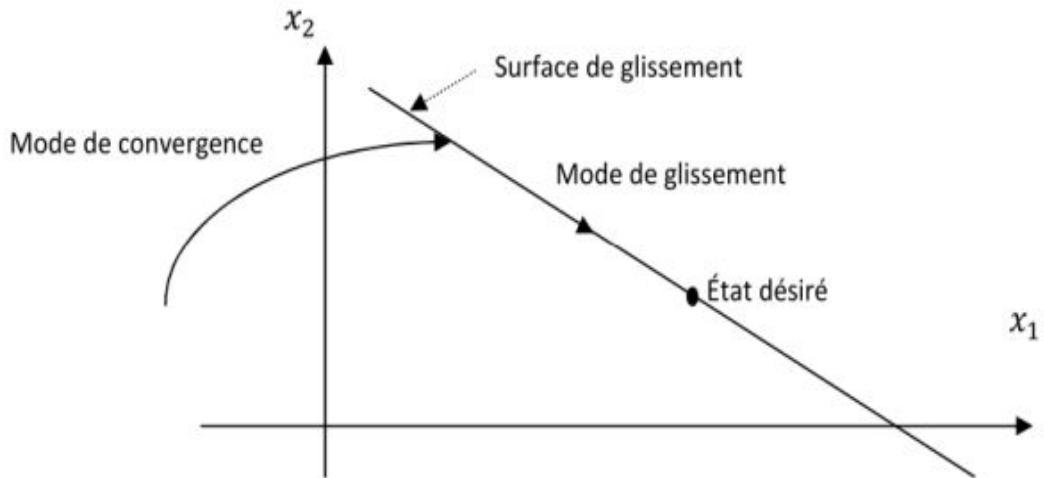


Figure 4.25 – Convergence du système glissant

4.9.4 Phénomène de réticence (Chattering)

Le terme chattering décrit le phénomène d'oscillations de fréquence finie et d'amplitude finie apparaissant dans de nombreuses implémentations en mode glissant (voir Fig. 4.26). Ces oscillations sont causées par la commutation à haute fréquence d'un mode glissant contrôleur excitant une dynamique non modélisée dans la boucle fermée. Les dynamiques non modélisées peuvent être celles des capteurs et des actionneurs négligés dans le processus de modélisation principale car ils sont généralement nettement plus rapides que la dynamique principale du système. Cependant, étant donné que les systèmes idéaux de mode glissant sont infiniment rapides, toute la dynamique du système doit être prise en compte dans la conception du contrôle. Heureusement, empêcher le bavardage ne nécessite généralement pas un modèle détaillé de tous les composants du système [56].

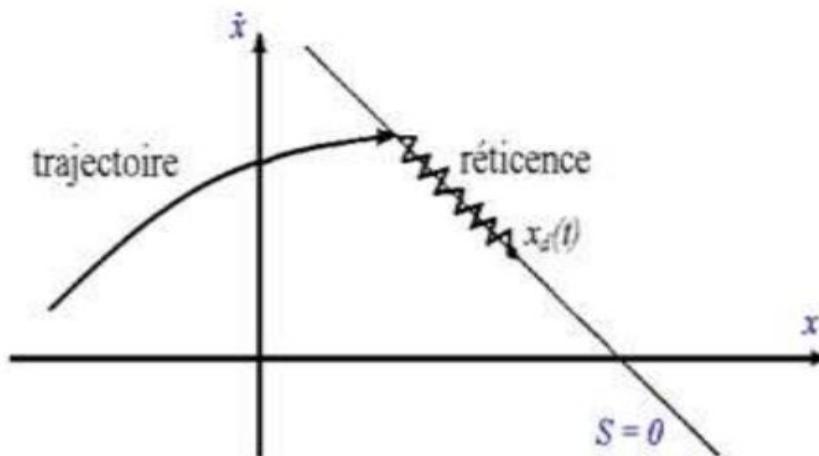


Figure 4.26 – Phénomène de la réticence (chattering) .[4]

4.9.5 Synthèse de la loi de commande

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement .
- Établissement de la condition de convergence .
- Détermination de la loi de commande qui permet d'atteindre la surface .

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit:

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (4.2)$$

Puisque notre système est d'ordre 2 donc l'équation (3.3) devient:

$$\text{Pour } n = 2 \Rightarrow s(x) = \dot{e}(x) + \lambda e(x) \quad (4.3)$$

Après la détermination de la fonction de glissement $s(x)$ cette étape consiste la détermination de la loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer $s(x) = 0$. Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que s soit attractif. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante:[4]

$$V(\mathbf{s}(t)) = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} \quad (4.4)$$

La dérivée de cette équation (3.5) nous donnons :

$$\dot{V}(\mathbf{s}(t)) = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} \quad (4.5)$$

L'erreur présente la différence entre la position et la position désirée elle est définie par:

$$e(\eta) = \eta - \eta_d \quad (4.6)$$

Il est évident que la valeur de la position désirée est fixe donc $\dot{\eta}_d = 0, \ddot{\eta}_d = 0$ alors l'équation (3.7) devient :

$$\dot{e}(\eta) = \dot{\eta} \quad (4.7)$$

L'expression de $\dot{\mathbf{s}}$ devient :

$$\dot{\mathbf{s}} = \ddot{\eta} + \lambda \dot{\eta} \quad (4.8)$$

à partir du modèle cinématique (chapitre 2) on a :

$$\ddot{\eta} = \mathbf{J}(\eta) \dot{\mathbf{v}} + \dot{\mathbf{J}}(\eta) \mathbf{v} \quad (4.9)$$

Nous obtenons par la suite l'équation suivante :

$$\dot{V}(\mathbf{s}(t)) = \mathbf{s}^T \{ \mathbf{J}(\eta) \mathbf{M}^{-1} [\tau_A - \mathbf{C}(\mathbf{v}) \mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v}) \mathbf{v} - \mathbf{G}_f(\eta)] + \dot{\mathbf{J}}(\eta) \mathbf{v} + \lambda \dot{\eta} \} \quad (4.10)$$

Avec $\tau_A = T \times u$ donc on peut déterminer la loi de commande u à partir de l'équation précédente (3.11) , La condition nécessaire, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $s(x,t)$ tende vers zéro est que la dérivée temporelle de V soit définie négative:

$$s \dot{s} < 0 \quad (4.11)$$

\ddot{V} doit être uniformément continu. L'application du lemme de Barbalat montre que $s \rightarrow 0$ et donc $\eta \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$. Cette technique peut donner un suivi parfait avec un chattering (bavardage) .[28] L'équation finale de la commande U est :

$$U = \mathbf{T}^{-1} \{ [\mathbf{C}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{G}_f(\eta)] - M \mathbf{J}^{-1}(\eta) [\dot{\mathbf{J}}(\eta) \mathbf{v} + \lambda \dot{\eta} + k \text{sign}(\mathbf{s})] \} \quad (4.12)$$

Notre modèle après l'utilisation de la méthode de contrôle SMC est (voir Fig.C.1)

4.9.6 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées. Parmi ces méthodes on va utiliser la fonction saturation . Cette méthode consiste à remplacer la fonction signe par la fonction saturation, le problème de la fonction signe est qu'elle a une variation stricte (voir Fig.4.27) à côté du zéro ce qui entraîne des problèmes pour nos propulseurs c'est pour cela on a décidé d'utiliser une fonction variation plus douce.

La fonction saturation est définie par (eq 3.14):

$$\begin{cases} S < -1 & f(s) = -1 \\ S > 1 & f(s) = 1 \\ -1 < S < 1 & f(s) = S \end{cases} \quad (4.13)$$

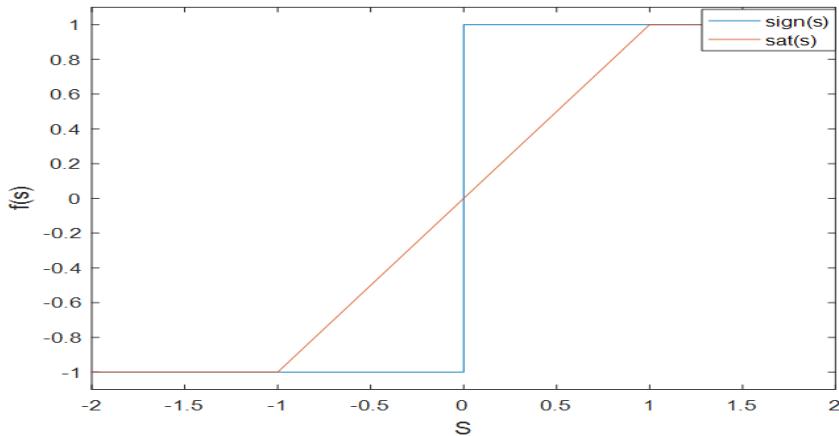


Figure 4.27 – fonction sat(s) et sign(s) .

Avant d'utiliser la fonction sat le résultat obtenu pour une position désirée selon l'axe x était :

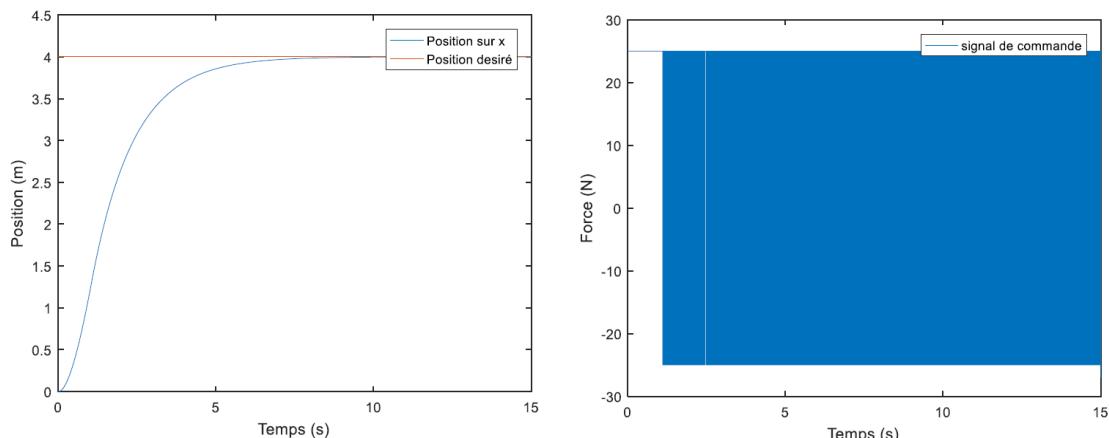


Figure 4.28 – Position selon x avec chattering .

On remplace la fonction signe par la fonction sat l'eq (3.13) devient :

$$U = T^{-1} \{ [C(v)v + D(v)v + G_f(\eta)] - M J^{-1}(\eta) [\dot{J}(\eta)v + \lambda \dot{\eta} + k \text{sat}(s)] \} \quad (4.14)$$

Alors la réponse pour une position désirée selon l'axe x devient :

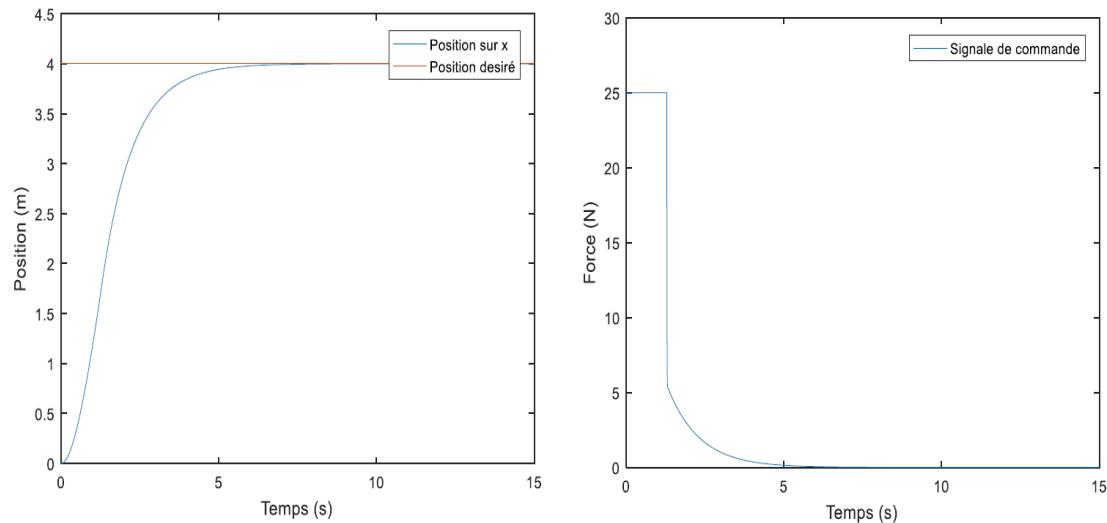


Figure 4.29 – Position selon x avec chattering éliminé .

Résultats

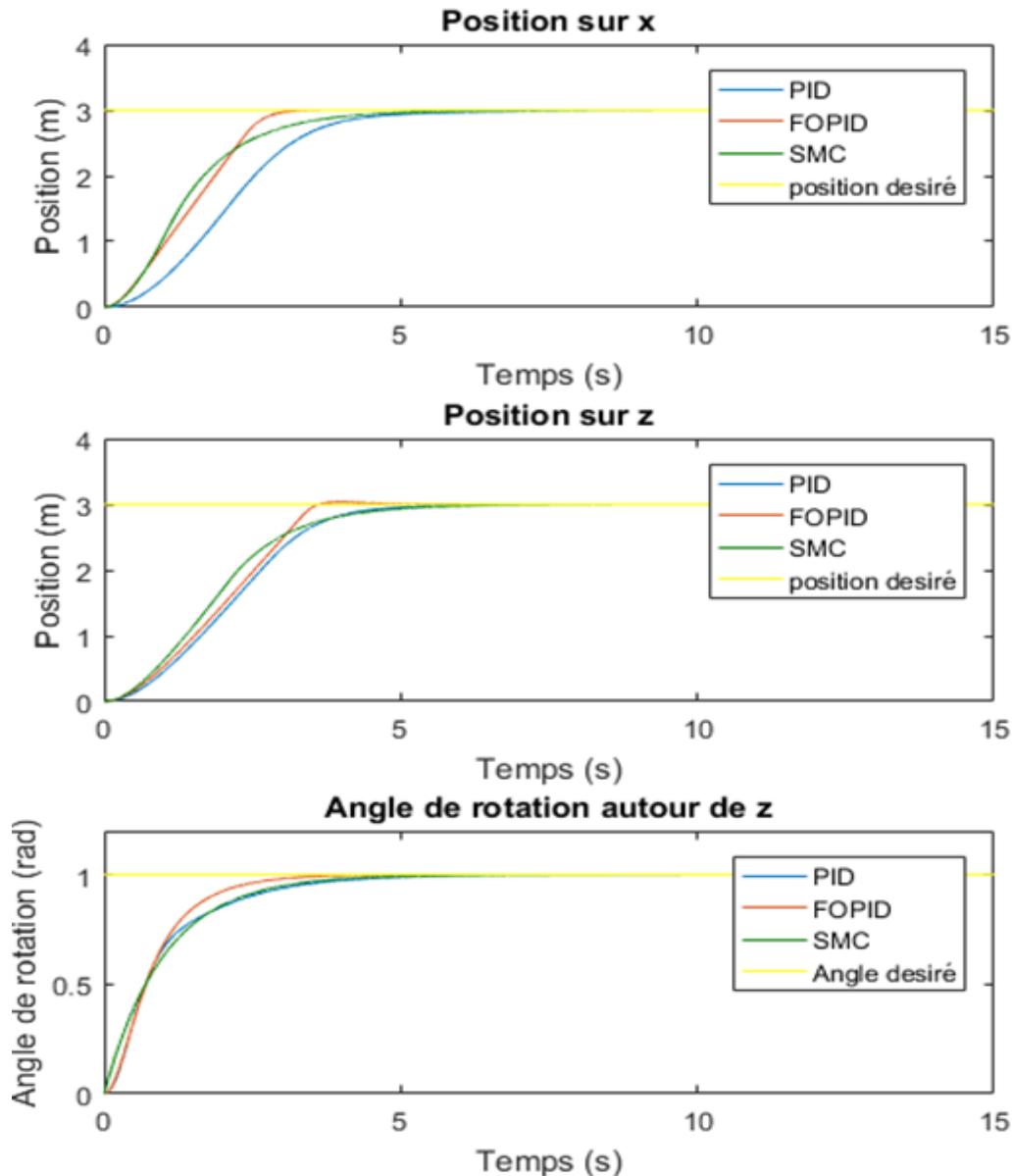


Figure 4.30 – les réponses de position contrôlées par mode glissement .

Interprétation

D'après les résultats de position trouvée par le mode de contrôle par glissement pour une position désirée de 3m sur l'axe x et l'axe z et pour un angle de rotation autour du z de 1 rad, on remarque que le dépassement est nul sur les 2 axes (translation et rotation) mais si on compare le temps de réponse par rapport aux autres modes de contrôles utilisés précédemment, on remarque qu'il est plus rapide que le PID mais plus lent qu'un contrôleur FOPID.

Et pour des trajectoires désirées:

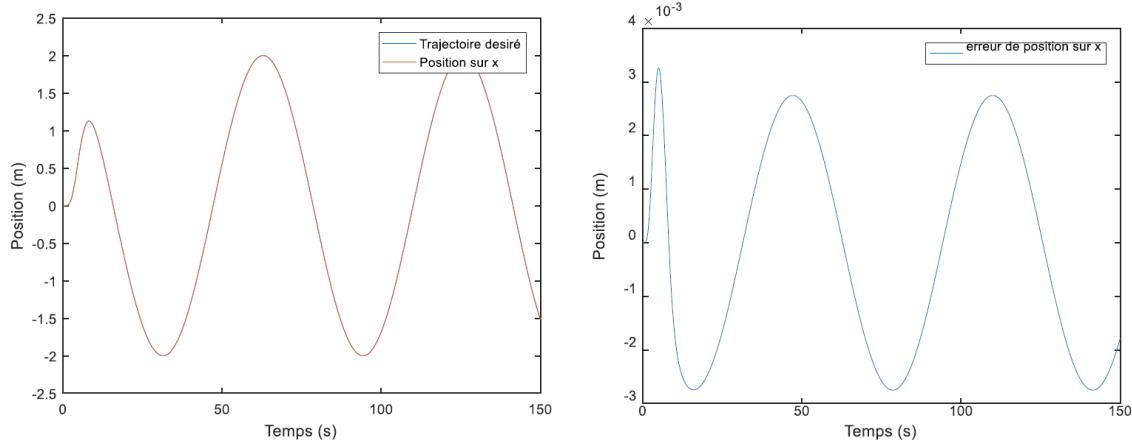


Figure 4.31 – Trajectoire selon x .

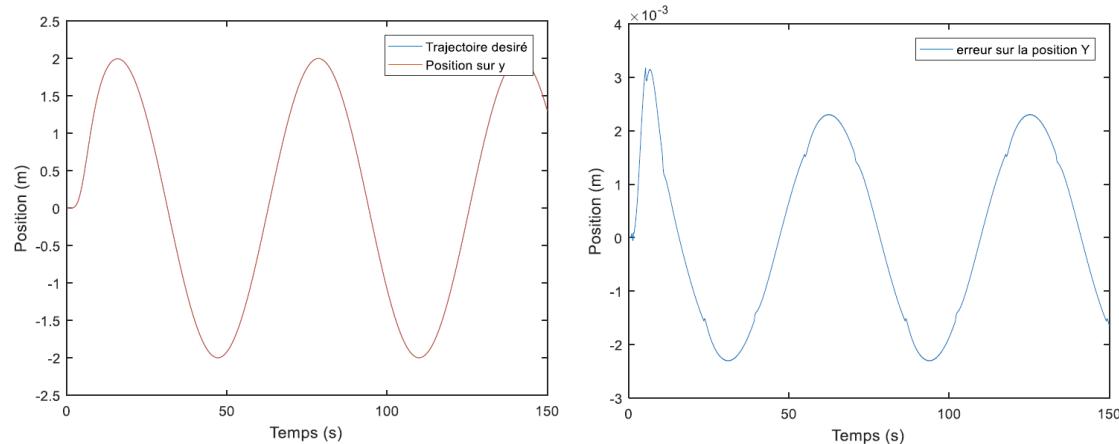


Figure 4.32 – Trajectoire selon y.

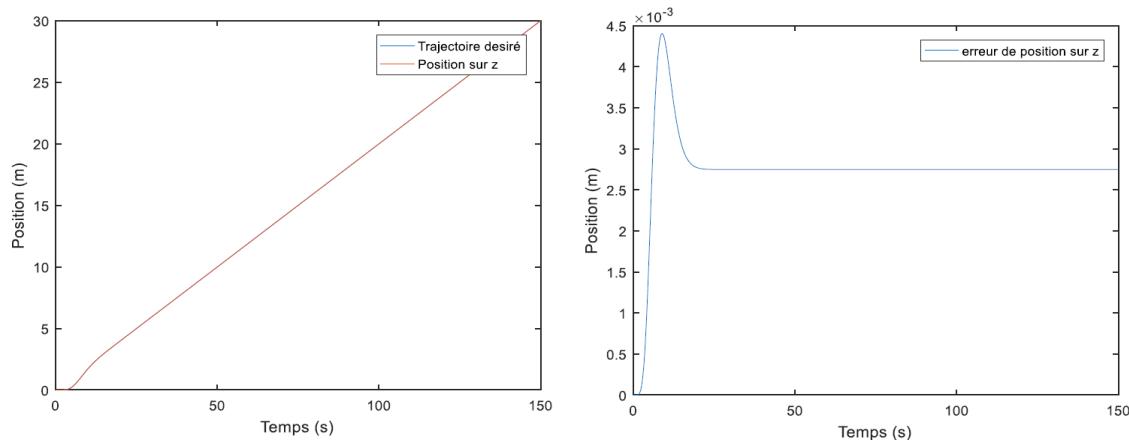


Figure 4.33 – Trajectoire selon z.

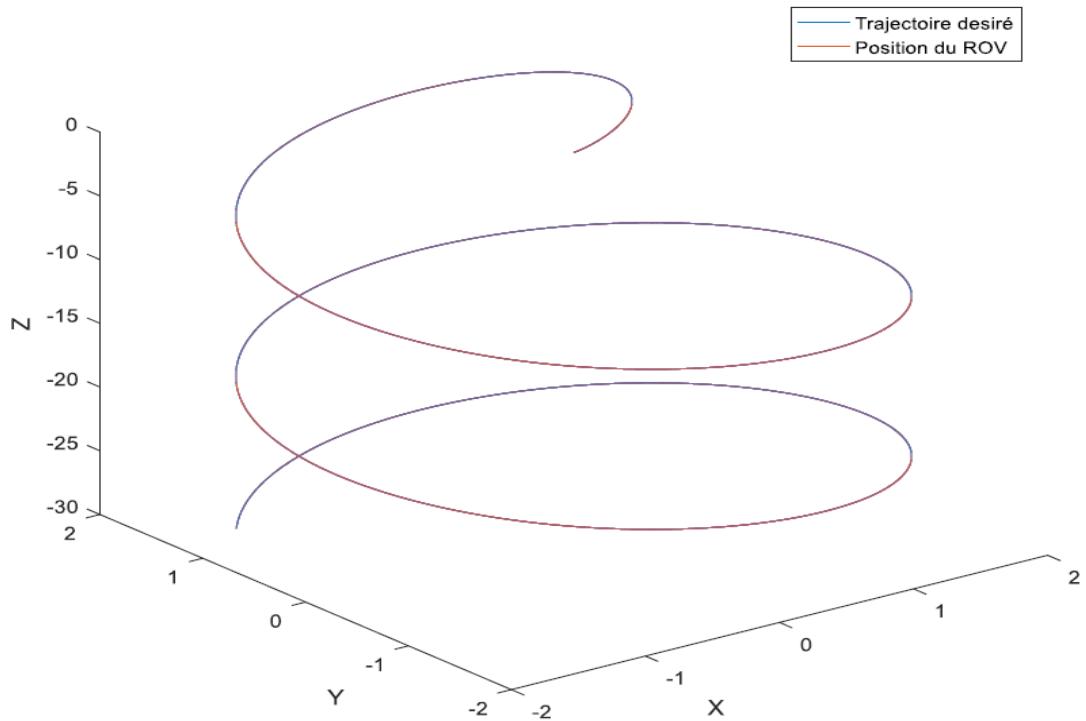


Figure 4.34 – Vue 3d de la trajectoire.

Interprétation

Après avoir contrôlé le système par mode glissement sur des positions constantes (fixes) alors on a refait le test de ce contrôleur pour une trajectoire (une consigne qui n'est pas constante), et comme il est montré dans la figure 4.34 notre ROV a bien suivi la trajectoire avec une petite erreur sur la position de l'axe x et y qui arrive jusqu'à 0.003 m et sur l'axe z de 0.0045 m. Par ces résultats il est clair que l'erreur était minimisée par rapport au résultat trouvé par l'utilisation des contrôleurs PID et presque la même erreur de position par rapport au PID fractionnaire.

4.9.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit trois techniques de commande PID, PID fractionnaire et SMC.

Les méthodes d'optimisation ont prouvé leur efficacité lors de la détermination des paramètres du contrôleur PID fractionnaire. Le travail de recherche bibliographique sur la commande des ROV's nous a appris que le contrôle par mode glissant est beaucoup mieux par rapport aux méthodes classiques.

4.10 Test et analyse des lois de commande

4.10.1 Introduction

Après l'étude de ces 3 lois de commande (PID, FOPIID et SMC) et les adapter avec notre système afin de tester ces lois, on a choisi trois scénarios :

Scénario basique : pour ce scénario le ROV doit suivre la trajectoire dans des conditions idéales sans aucune perturbation extérieure c'est le scénario testé précédemment.

Incertitudes des paramètres : tous les paramètres obtenus pour notre modèle sont des paramètres obtenus par simulation donc il y aura une différence avec les paramètres réels c'est pour cela on a ajouté ce scénario pour voir comment le contrôleur va réagir aux paramètres incertains.

Perturbation extérieure : dans ce scénario on va ajouter une force extérieure qui va s'appliquer à notre système, ce scénario dans la réalité peut être un objet qui est attaché au ROV accidentellement.

4.10.2 Incertitude des paramètres

Dans ce cas on a modifié les paramètres du notre modèle avec une variation entre 30% et 50% par rapport aux paramètres calculé et trouvé par simulation. Alors on a obtenu les résultats suivants :

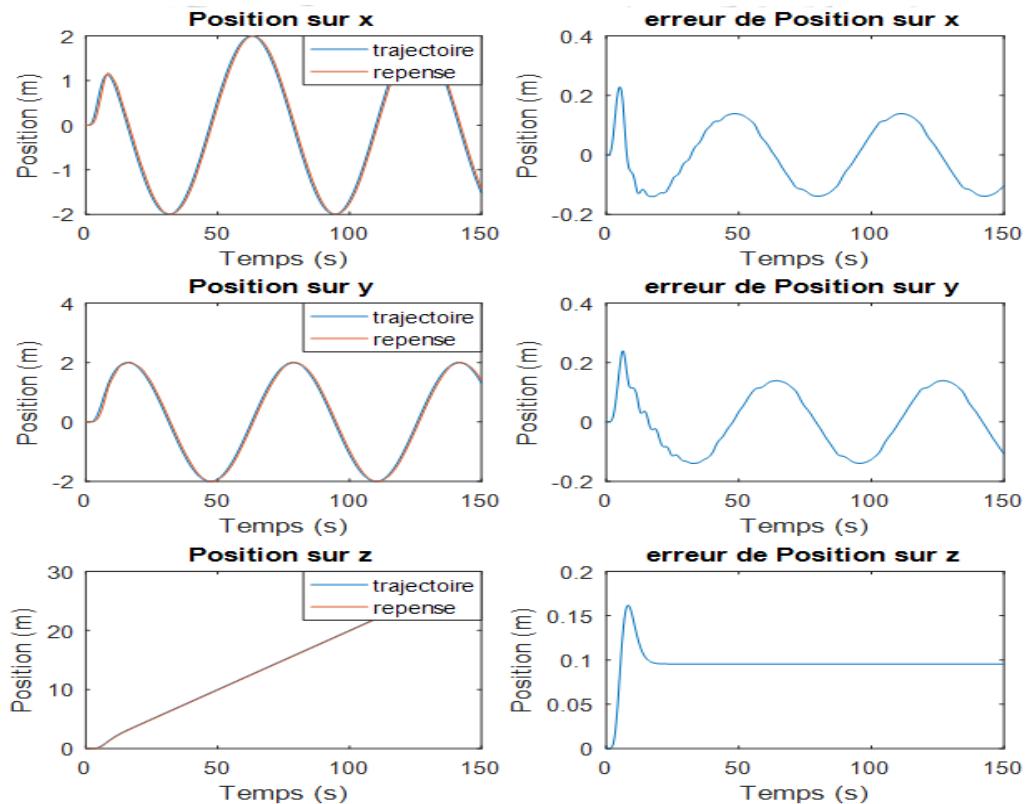


Figure 4.35 – réponses obtenues par PID pour le 2ème scénario

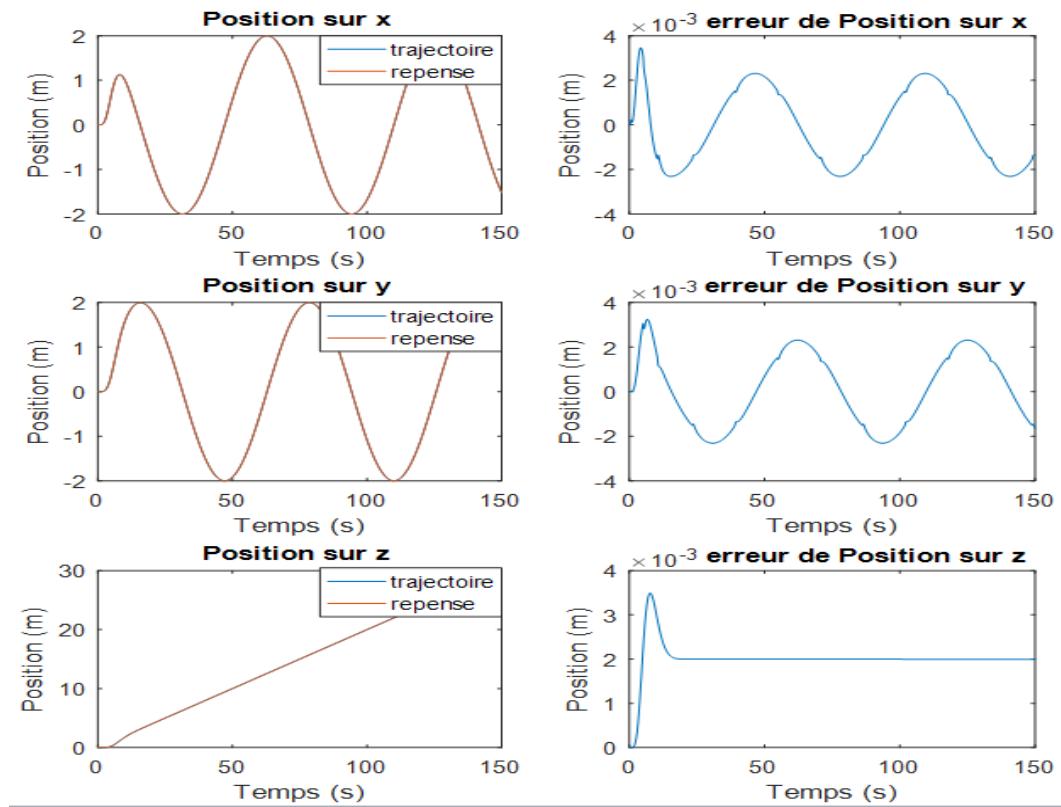


Figure 4.36 – réponses obtenues par FOPID pour le 2ème scénario

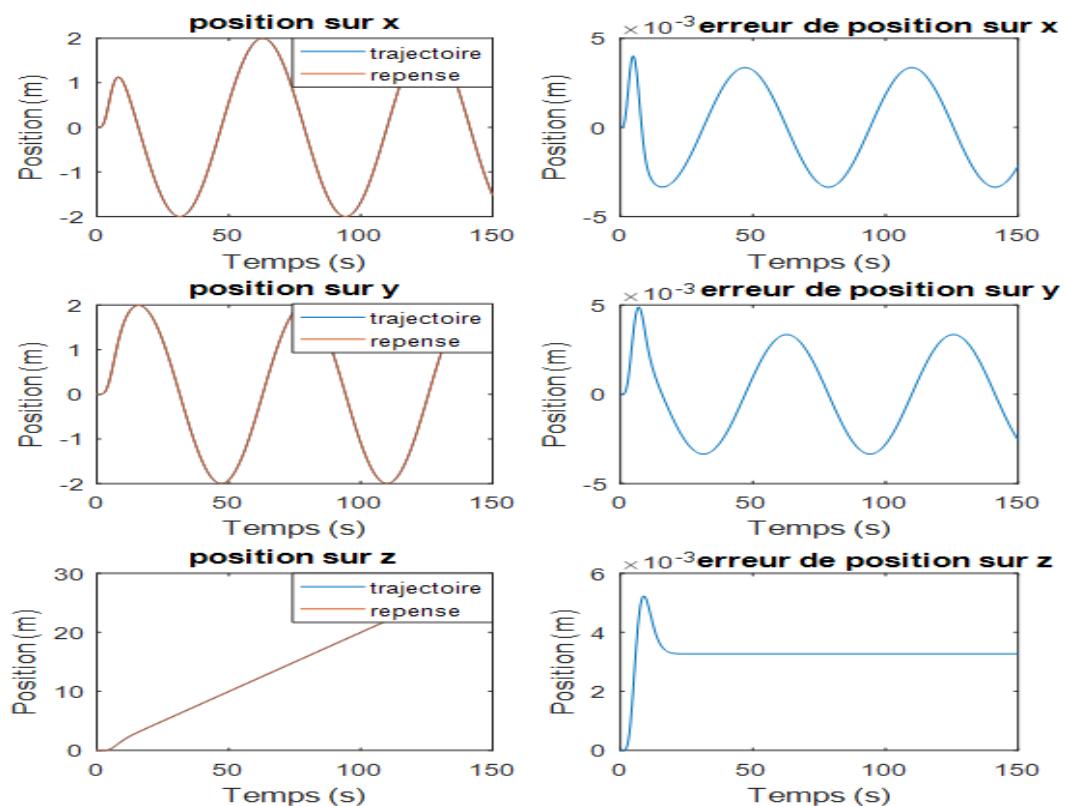


Figure 4.37 – réponses obtenues par SMC pour le 2ème scénario

Voici le tableau 4.3 qui montre les résultats en détaille :

Table 4.3 – Résultats obtenus par les trois contrôleurs

contrôleur	PID			FOPID			SMC		
axe	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Erreur de position max (m)	0.2282	0.2392	0.1617	0.0034	0.0032	0.0034	0.004	0.0048	0.0052
Différence avec cas idéal	0.0293	0.0262	0.0057	1.181 $\cdot 10^{-4}$	0.71 $\cdot 10^{-4}$	0.693 $\cdot 10^{-4}$	7.444 $\cdot 10^{-4}$	8.863 $\cdot 10^{-4}$	8.312 $\cdot 10^{-4}$

De ces résultats on remarque que l'erreur de position est augmentée par rapport aux résultats trouvés dans le scénario basique, pour le contrôleur PID fractionnaire et le contrôle par mode glissent. L'augmentation de l'erreur est presque nulle (quelques millimètres), par contre l'erreur de position avec le PID est augmenté par quelques centimètres, donc nous pouvons dire que la commande par mode glissement ou par FOPID est mieux qu'un PID classique pour le cas d'incertitudes des paramètres.

4.10.3 Perturbation extérieur

Dans cette partie on a ajouté une force de 5N à la 15ème seconde après le démarrage du robot contre le déplacement direct sur l'axe x du repère mobile pour simulé qu'un objet qui est attaché dans le ROV.

Après la simulation on a obtenu les résultats suivants pour les trois lois de commande :

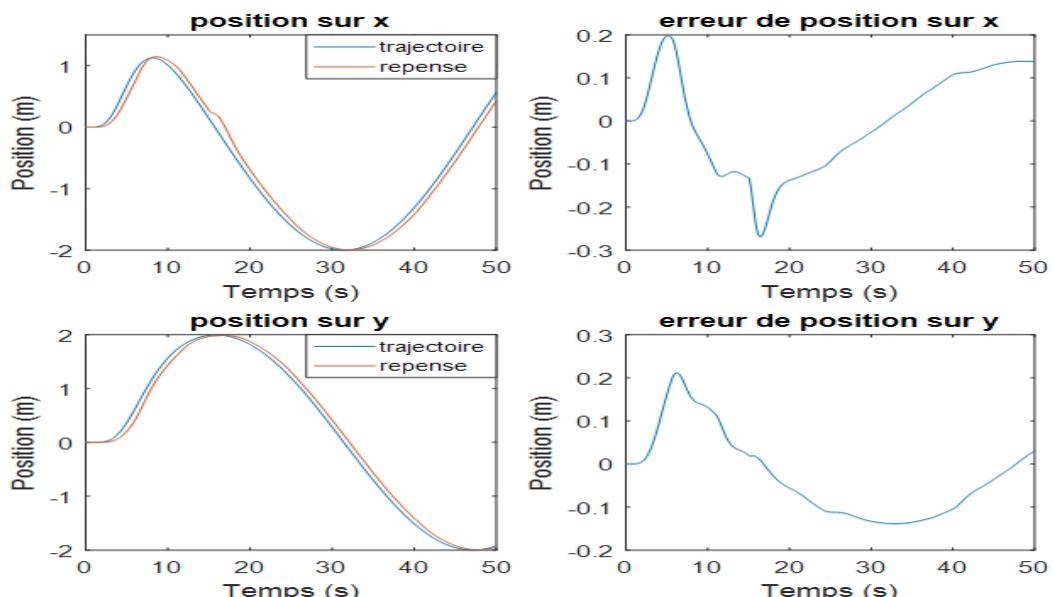


Figure 4.38 – réponses obtenues par PID pour le 3ème scénario

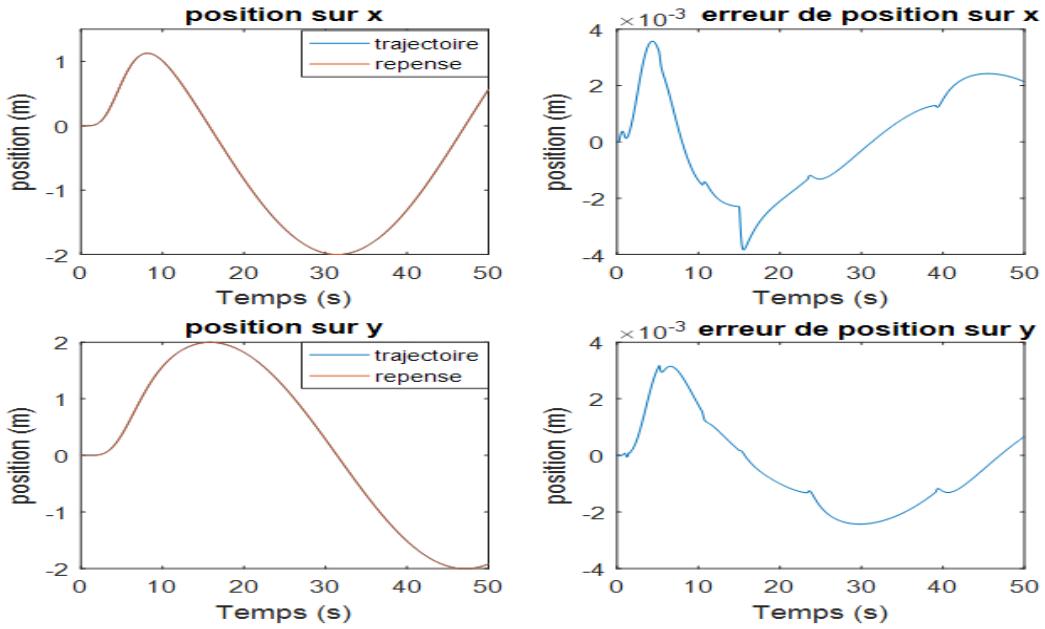


Figure 4.39 – réponses obtenues par FOPID pour le 3ème scénario

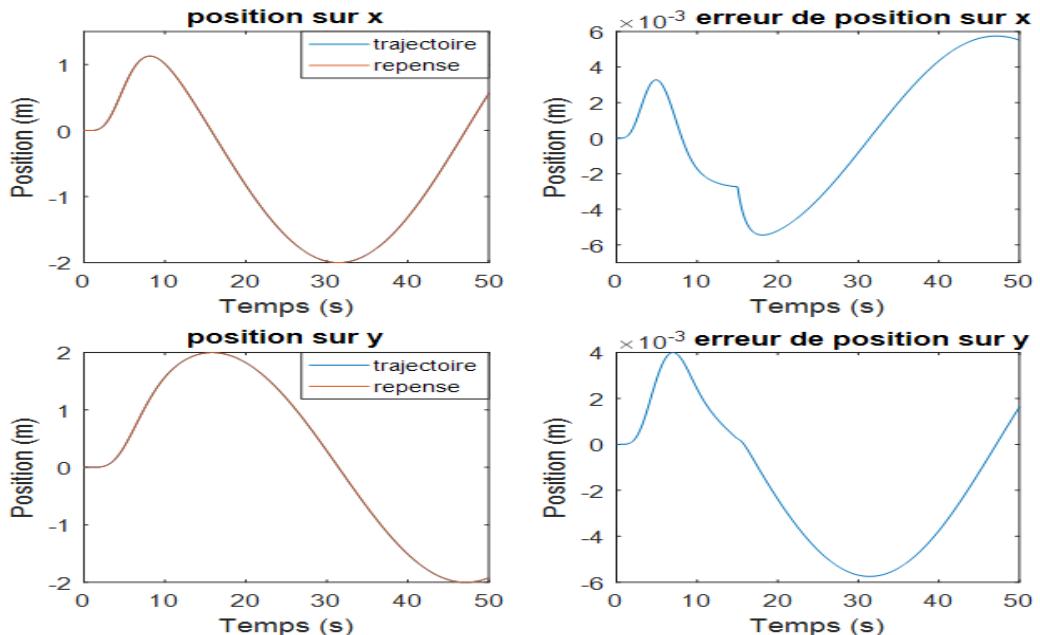


Figure 4.40 – réponses obtenues par SMC pour le 3ème scénario

Interprétation: De ces résultats, le ROV a bien suivi la trajectoire par les trois méthodes mais on remarque que dans la courbe d'erreur de position il y a un pic dans la 15ème seconde par comparaison avec le scénario basique, avec une variation arrivée jusqu'au 0.1315m pour les PID, 0.0018m pour FOPID et 0.0025m pour SMC. Alors par comparaison on remarque que pour les contrôleurs PID et FOPID cette variation était temporaire, elle a duré 7s pour un PID et 5.5 s pour un FOPID. Mais pour le mode glissant l'augmentation de l'erreur était continue dans le temps (la réponse n'est pas devenue comme dans le cas idéal).

Conclusion Générale

Le développement des robots sous -marin téléopéré est devenu plus populaire avec le développement de la technologie durant ces dernières années. Ce progrès est causé par le grand effort fait par les universités et les centres de recherche pour améliorer les modèles développés.

Dans ce manuscrit on a fait une synthèse de commande avancée sur notre modèle du robot sous -marin d'observation.

On a commencé par un état de l'art sur les robots sous-marins. Ensuite on a entamé la modélisation mathématique, cette partie consiste à développer les différentes équations de la cinématique et de la dynamique a afin d'obtenir à la fin une équation générale qui peut être représentée dans un modèle SIMULINK.

Le modèle SIMULINK nécessite les paramètres de l'hydrodynamique afin d'étudier son comportement en boucle ouverte. Ces paramètres sont obtenu par analyse CFD, et on a d'autres paramètres qui nécessitent des essais réels c'est pour cela on a identifié notre propulseur développé par dans un banc d'essai. Le test avec le banc d'essai était satisfaisant et on a pu déterminer une relation qui lie la force avec le signal PWM.

Il existe plusieurs méthodes pour faire la régulation de la réponse obtenue par notre système.

On a commencé par faire l'étude par un régulateur PID, le PID est linéaire mais notre système est non linéaire c'est pour cela on a utilisé la méthode de tune dans Matlab pour déterminer les paramètres de notre régulateur. Après l'interprétation des résultats on a décidé d'utiliser un autre contrôleur pour avoir une réponse plus performante cela est fait par le PID fractionnaire.

Le PID fractionnaire est le cas généralisé du PID classique il nécessite cinq paramètres à déterminer cela est fait par les algorithmes d'optimisation. Parmi ses méthodes on a le WCA (water cycle algorithm), NNA (neural network algorithm) et le GA (genetic algorithm). On finit notre travail par la commande par mode glissant, ce contrôleur est non linéaire donc il nécessite un développement mathématique pour déterminer la loi de commande à implémenter dans Matlab.

La commande par mode glissant permet d'associer les qualités de robustesse devant les incertitudes et les perturbations.

Les résultats obtenus par les trois contrôleurs étaient satisfaisants, par rapport les résultats obtenus on peut bien remarquer que le SMC et le FOPID ont donné des meilleurs résultats avec un dépassement minimal et une erreur presque nul.

L'objectif principal de ce travail était la réalisation d'un modèle réel d'un robot sous-marin d'observation, le travail a été divisé sur une équipe de trois groupes: conception, instrumentation et commande.

Perspectives

Les perspectives que nous pourrions lister sont :

Implémentation d'une loi de commande dans notre robot sous- marin réalisé par notre groupe.

Puisque notre but était de réaliser un ROV hybride (téléopéré et autonome) donc on a voulu :

Faire la commande du ROV avec un joystick dans ce cas notre ROV est téléopéré.

Donner une trajectoire désirée à notre ROV dans ce cas notre ROV est autonome.

La validation des lois de commande synthétisée sur le prototype réalisé.

L'implémentation d'autres lois de commande non linéaire et robuste sur le même prototype.

Faire un benchmark entre les lois de commande implémentée.

Annexe A

Identification du propulseur sous-marin et comportement en boucle ouvert

**ANNEXE A. IDENTIFICATION DU PROPULSEUR SOUS-MARIN ET
COMPORTEMENT EN BOUCLE OUVERT**

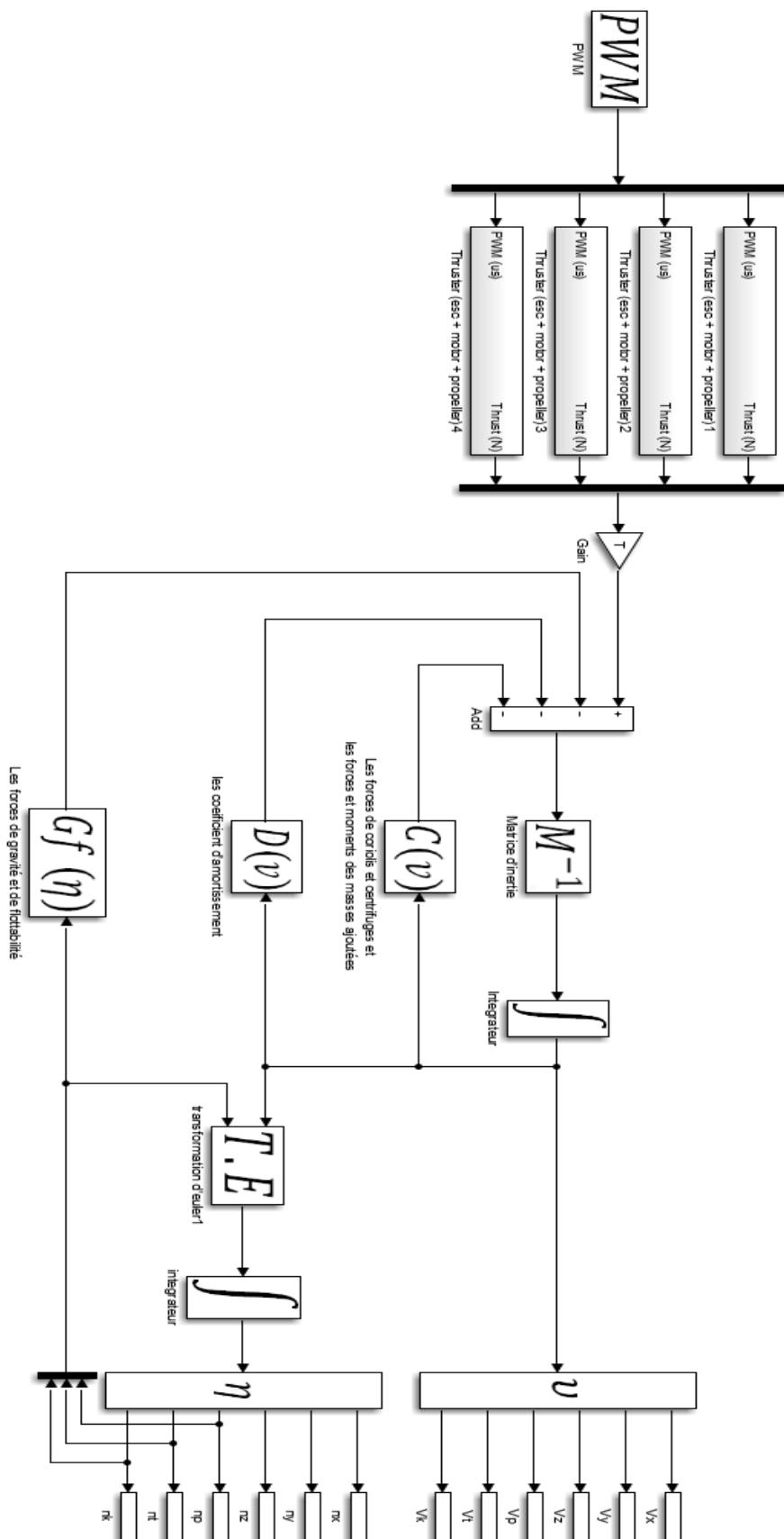


Figure A.1 – Modèle ROV avec entrée PWM .

ANNEXE A. IDENTIFICATION DU PROPULSEUR SOUS-MARIN ET COMPORTEMENT EN BOUCLE OUVERT

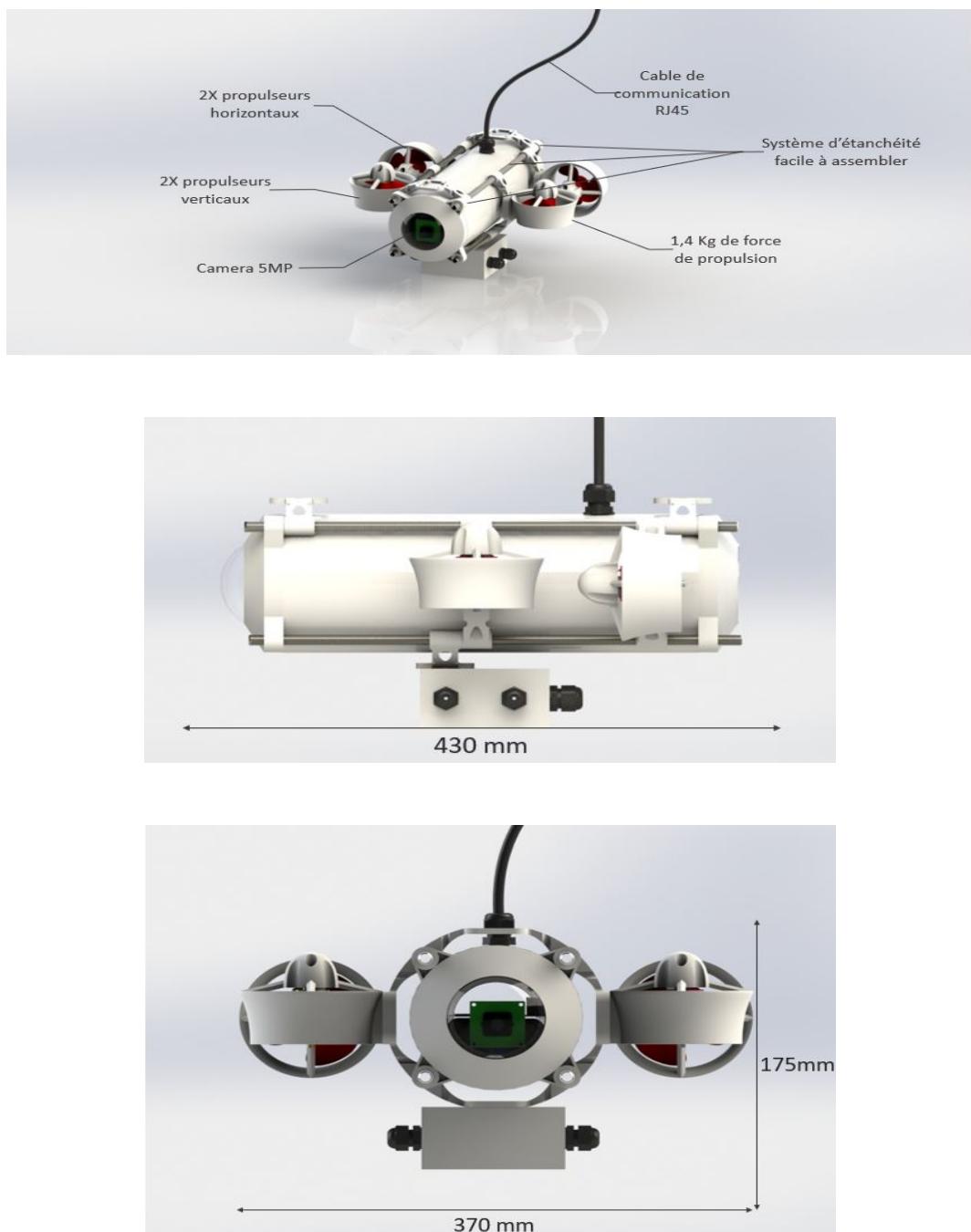


Figure A.2 – Design du ROV.

Annexe B

Modélisation mathématique du ROV

Table B.1 – Paramètres hydrodynamiques

1ère représentation		2ème représentation	
$X_u = 1.0809 \text{Kgs}^{-1}$	$X_{u u } = 9.4337 \text{Kgm}^{-1}$	$X_u = 9.6946 \text{Kgs}^{-1}$	$X_{\dot{u}} = 0.4 \text{Kg}$
$Y_v = 0.1003 \text{Kgs}^{-1}$	$Y_{v v } = 44.0709 \text{Kgm}^{-1}$	$Y_v = 41.1625 \text{Kgs}^{-1}$	$Y_{\dot{v}} = 5.26 \text{Kg}$
$Z_w = 2.0519 \text{Kgs}^{-1}$	$Z_{w w } = 23.2662 \text{Kgm}^{-1}$	$Z_w = 23.2959 \text{Kgs}^{-1}$	$Z_{\dot{w}} = 5.26 \text{Kg}$
$K_p = 0.0762 \text{Kgms}^{-1}$	$K_{p p } = -0.0103 \text{Kgm}$	$K_p = 0.0668 \text{Kgms}^{-1}$	$K_p = 0 \text{Kgm}$
$M_q = 0.1537 \text{Kgms}^{-1}$	$M_{q q } = 0.1394 \text{Kgm}$	$M_q = 0.281 \text{Kgms}^{-1}$	$M_{\dot{q}} = 0.19 \text{Kgm}$
$N_r = 0.2014 \text{Kgms}^{-1}$	$N_{r r } = 0.0381 \text{Kgm}$	$N_r = 0.2361 \text{Kgms}^{-1}$	$N_{\dot{r}} = 0.19 \text{Kgm}$

Table B.2 – Moments et inerties

$I_x = 0.021 \text{Kgm}^2$	$I_{xy} = I_{yx} = 0.00002 \text{kgm}^2$
$I_y = 0.044 \text{Kgm}^2$	$I_{yz} = I_{zy} = -0.00005 \text{kgm}^2$
$I_z = 0.057 \text{Kgm}^2$	$I_{zx} = I_{xz} = 0.0001 \text{kgm}^2$

Table B.3 – Centre de gravité et de flottabilité

Centre de gravité	Centre de flottabilité
$X_g = 0$	$X_b = 0$
$Y_g = 0$	$Y_b = 0$
$Z_g = 0$	$Z_b = -0.013$

masse=4kg

Annexe C

La commande du ROV

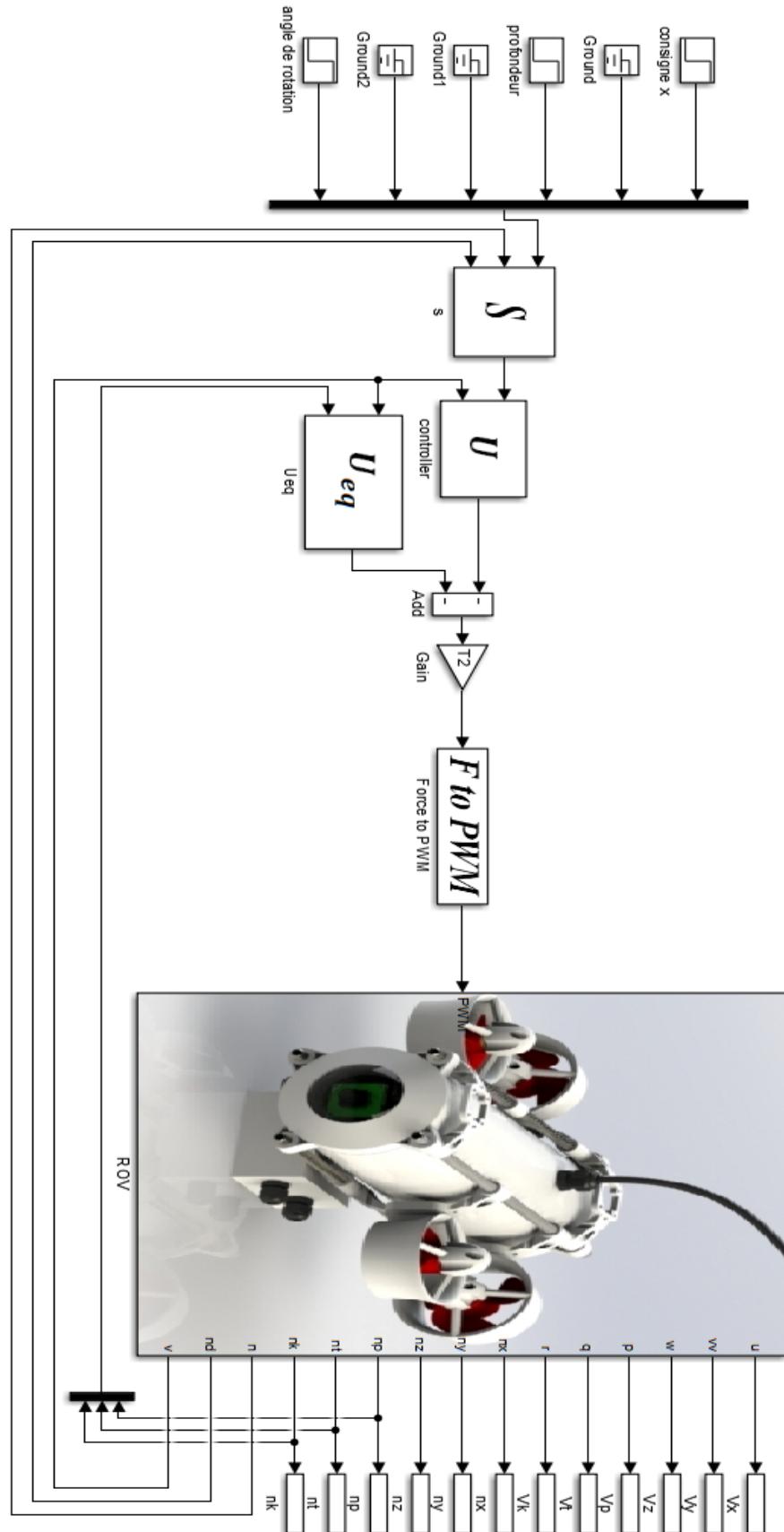


Figure C.1 – Modèle ROV avec SMC .

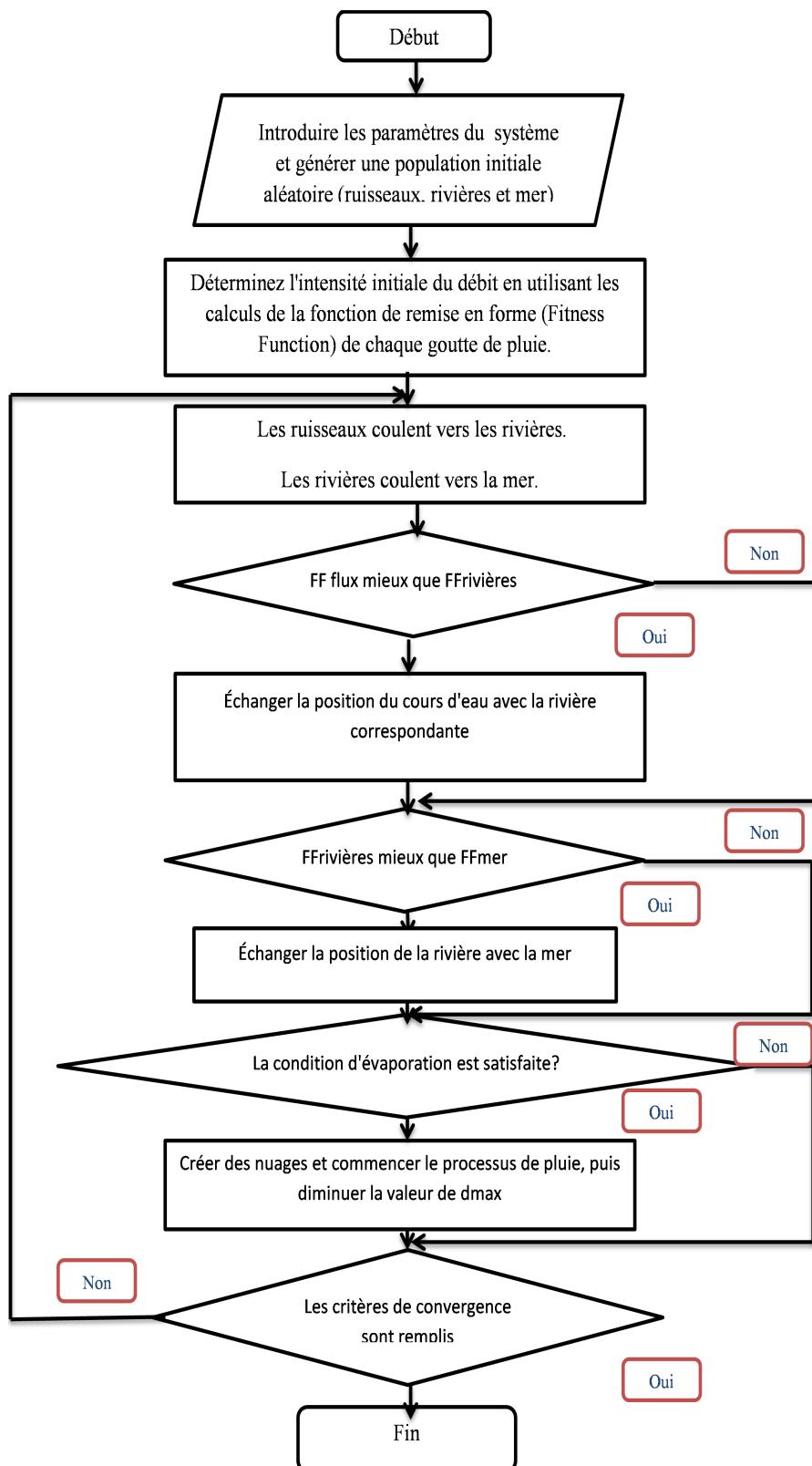


Figure C.2 – Un organigramme pour l'algorithme d'optimisation WCA.[34]

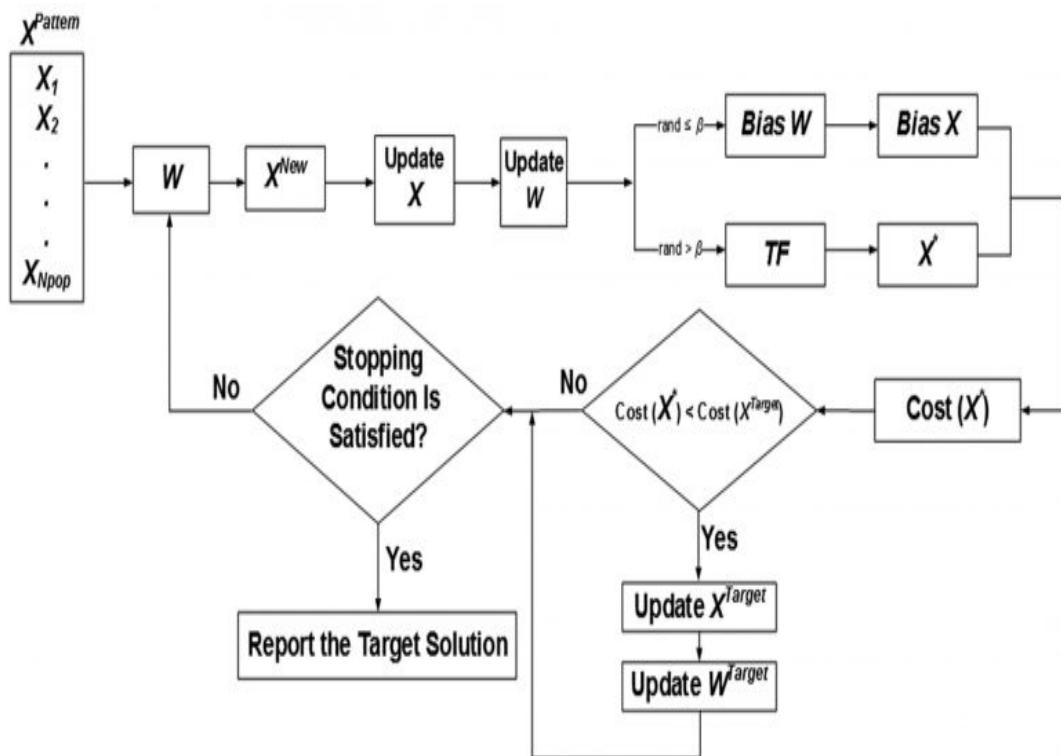


Figure C.3 – Algorithme NNA. [35]

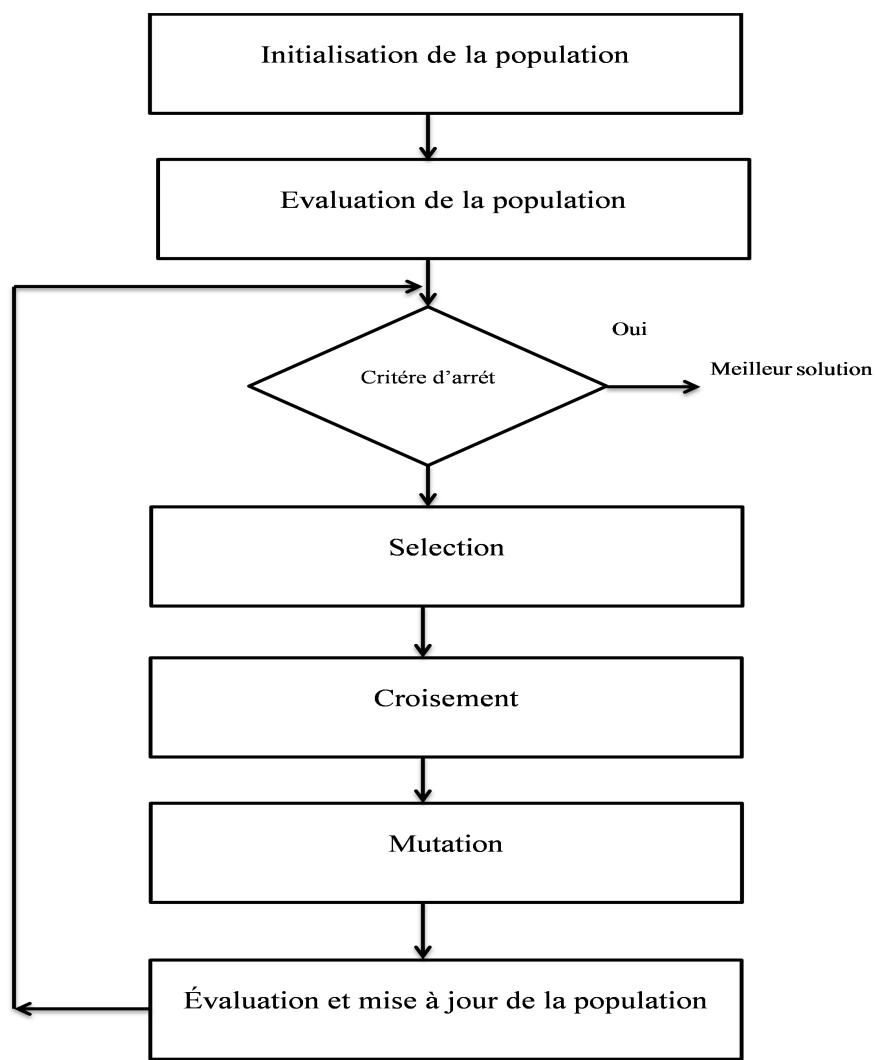


Figure C.4 – La procédure du Genetic Algorithme (GA).[36]

Bibliographie

- [1] Classification standard des rov. <https://www.lerus-training.com/blog/of-fshore-operations/rov-classifications->, 2021. [Online; consulté le 12 février 2021].
- [2] classification des rov selon leur taille et capacité. <https://www.marineinsight.com/tech/what-is-remotely-operated-underwater-vehicle-rov/>, 2021. [Online; consulté le 12 février 2021].
- [3] K Mohamed Hussain, R Allwyn Rajendran Zepherin, and M Shantha. Comparison of pid controller tuning methods with genetic algorithm for foptd system. *criterion*, 16:17, 2014.
- [4] HATTAB Abdellilah. *Modélisation et commande robuste d'un robot sous-marin autonome*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.
- [5] habité civile. <https://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/1559360>, 2021. [Online; consulté le 8 février 2021].
- [6] habité militaire. <http://sousmarin.chez.com/smms.htm>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [7] Le nautile sous marin d'intervention. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2018/07/02/sans-pdg-lifremer-veut-abandonner-le-nautile/>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [8] submersible chinoise habité des eaux profondes. <http://french.peopledaily.com.cn/n3/2018/0314/c31357-9436939.html>. [Online; consulté le 8 février 2021].
- [9] Sous marin des grands fonds avec bras robotisés. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/oceanographie-cyclops-nouveau-sous-marin-exploration-grands-fonds-49522/>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [10] Remus100. <https://www.hydroid.com/news/hydroid-introduces-new-generation-remus-100-auv>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [11] Uuv militaire. <https://sites.google.com/site/presentationofrobotics/home/unmanned-underwater-vehicle-uuv>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [12] Le déplacement du planeur en modifiant sa flottabilité . <https://noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/gliders>. [Online; consulté le 9 juin 2021].
- [13] Un planeur (seaglider) à la surface entre les plongées . https://www.wiktionary.com/en/Underwater_glider. [Online; consulté le 9 juin 2021].

- [14] Deep tow edgetech's 2400. <https://www.edgetech.com/product/2400-deep-towed/>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [15] Sea dragon rov d'inspection. <http://www.ttrobotix.com/products/detail/927.html>, 2021. [Online; consulté le 9 février 2021].
- [16] Micro rov. <http://www.geaco.eu/products/gnom/gnom-baby.htm>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [17] Mini rov. https://www.researchgate.net/figure/Underactuated-mini-R0V-under-water_fig15_307852688, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [18] Rov générale. <http://cyberneticzoo.com/tag/submarine-salvage-vessel/>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [19] Rov d'inspection. <https://www.seatools.com/projects/multi-purpose-inspection-rov-rohp-ii/>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [20] Rov travail léger. <https://www.oceannews.com/news/subsea-intervention-survey/deep-ocean-engineering-introduces-a-new-light-work-class-rov>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [21] Rov travail lourd. <https://www.offshore-mag.com/rigs-vessels/article/16761806/rov-system-redesign-targets-more-efficient-subsea-intervention>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [22] Rov de tranchée. <https://ocean-energyresources.com/2019/05/23/phasos-offshore-adds-q1000-to-fleet-of-subsea-trenching-vehicles/>, 2021. [Online; consulté le 13 février 2021].
- [23] The little benthic crawler rov . <https://www.designworldonline.com/gear-motors-drive-underwater-rovers/>, 2021. [Online; consulté le 1 Juin 2021].
- [24] Ihsan Al-Taie, Hamad Alsaiari, Ayman Amer, Fadl Abdellatif, Ali Outa, Hassane Trigui, Fernando Diaz Ledezma, Sahejad Patel, and Ameen Abedan. Survey of underwater ndt technologies for offshore assets. 09 2015.
- [25] Eca hytec roving bat . <https://www.rovinnovations.com/eca-hytec-roving-bat.html>, 2021. [Online; consulté le 1 Juin 2021].
- [26] The omni-crawler . <https://newatlas.com/omni-crawler-moves-in-all-directions/20386/>, 2021. [Online; consulté le 1 Juin 2021].
- [27] Rotation de coordonnées cartésiennes 3d (euler) (vi). https://zone.ni.com/reference/fr-XX/help/371361R-0114/gmath/3d_cartesian_coordinate_rotation_euler/?fbclid=IwAR3e1hD0iiEucZiokNRwdKYum7wuBK0QsxjdJ8JnM65p2RndYd0ynrIBTog. [Online; consulté le 3 juin 2021].
- [28] Sheng Sion Shin. *computer-aided control systems design*. CRC press, 31 January 2017,Boca Raton.
- [29] Description des entrées/sorties de la carte arduino uno . <https://www.editions-eni.fr/open/mediabook.aspx?idR=8457f073dc836b48a324c65a97bdc71b>. [Online; consulté le 12 juin 2021].
- [30] Un sch ema fonctionnel d'un contrôleur pid dans une boucle de régulation. https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller. [Online; consulté le 11 juin 2021].

- [31] Younes Boucetta, Redouane Ayad, and Zoubir Foitih. Control of mobile robot using fractional order pid controller. *Transactions on Electrical Engineering*, 17:138–146, 09 2019.
- [32] Pritesh Shah and Sudhir Agashe. Review of fractional pid controller. *Mechatronics*, 38:29 – 41, 09 2016.
- [33] Le water cycle algorithm. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56339-water-cycle-algorithm-wca>, 2021. [Online; consulté le 16 mai 2021].
- [34] Un organigramme pour l'algorithme d'optimisation water cycle algorithm. https://www.researchgate.net/figure/A-flowchart-for-water-cycle-optimization-algorithm_fig2_324944651, 2021. [Online; consulté le 5 Mai 2021].
- [35] Nna. <https://ali-sadollah.com/neural-network-algorithm-nna/>, 2021. [Online; consulté le 16 mai 2021].
- [36] La procédure du genetic algorithme. https://www.researchgate.net/figure/Genetic-algorithm-procedure_fig1_266146665, 2021. [Online; consulté le 31 Mai 2021].
- [37] Mohd Shahriel Mohd Aras, Muhammad Nizam Kamarudin, M.H.B. Rusli, and Iktisyam Zainal. Small scale unmanned underwater remotely operated crawler (roc). *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3:481–488, 09 2016.
- [38] Edson Cavalcanti Neto, Rejane Sa, Guilherme Holanda, Francisco Mota, Antonio Varela, André Araújo, Italo Loiola, Rogerio Oliveira, Auzuir Alexandria, and V.H.C. Albuquerque. Autonomous underwater vehicle to inspect hydroelectric dams. *International Journal of Computer Applications*, 101:1, 09 2014.
- [39] Observation class rov. <https://www.deeptrekker.com/resources/underwater-rovs>. [Online; consulté le 9 juin 2021].
- [40] Adel Khadhraoui. *Modélisation et simulation interactive pour la navigation d'un robot sous-marin de type ROV Observer*. PhD thesis, Université Paris Saclay, 2015.
- [41] Jean-Mathias Spiewak. *Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes*. PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2007.
- [42] Melle. ACHOUR MERIEM et Melle. BENABED MALIKA. Modélisation et analyse structurelle d'un rov à cinq moteurs. PFE Master 2013, USTO-MB.
- [43] Le deep tow. <https://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/deptow.html#:~:text=DEEP>, 2021. [Online; consulté le 12 février 2021].
- [44] Nicolas Boëly. *Modélisation non linéaire et contrôle linéaire par retour entrée-sortie linéarisant d'un drone sous-marin quadri hélices à poussée vectorielle*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2010.
- [45] Angles d'euler. http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/angleeuler.html?fbclid=IwAR2EDYUDH1J2Exj1FuXprVZgTGqxAo0BzbJ_AC8Vkd60WVbP-VwCjzqAAVo. [Online; consulté le 3 juin 2021].

- [46] Badache Mohamed Al amine. Conception et simulation d'un robot télé-opéré. PFE Master ACSI 2015, USTO-MB.
- [47] Cheng Siong Chin and Michael Wai Shing Lau. *Benchmark Models of Control System Design for Remotely Operated Vehicles*. Springer, 2020.
- [48] Sia Chuan Tang. *Modeling and simulation of the autonomous underwater vehicle, Autolycus*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [49] Abdelmalek Laidani, Mohamed Bouhamida, Mustapha Benghanem, Karl Sammut, and Benoit Clement. A low-cost test bench for underwater thruster identification. *IFAC-PapersOnLine*, 52(21):254–259, 2019.
- [50] Le bldc . <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/what-is-bldc-motor-and-arduino-bldc-motor-control>. [Online; consulté le 12 juin 2021].
- [51] Gauge de contrainte . <https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/what-is-a-strain-gauge->. [Online; consulté le 12 juin 2021].
- [52] Pwm . <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>. [Online; consulté le 6 juin 2021].
- [53] Katsuhiko Ogata. *Modern control engineering*. Prentice hall, 2010.
- [54] Mohammad Moradi, Ali Sadollah, Hoda Eskandar, and Hadi Eskandar. The application of water cycle algorithm to portfolio selection. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 30(1):1277–1299, 2017.
- [55] A quick introduction to sliding mode control and its applications . https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/Please_I_am_working_on_Sliding_Mode_Control_of_Active_Filters_for_Industrial_Application_I_am_having_Difficult_in_Proposing_a_Sliding_Surface/attachment/59d6386179197b807799599c/AS:397270366343171@1471728044595/download/A+QUICK+INTRODUCTION+TO+SLIDING+MODE+CONTROL.pdf. [Online; consulté le 17 juin 2021].
- [56] Le chattering . http://math.ucsd.edu/~helton/MTNSHISTORY/CONTENTS/2000PERPIGNAN/CDROM/articles/SI14_4.pdf. [Online; consulté le 19 juin 2021].